PORSCHE

Crashsimulation von Klebverbindungen des Rohkarosseriebaus

Dipl.-Ing. Frank Burbulla

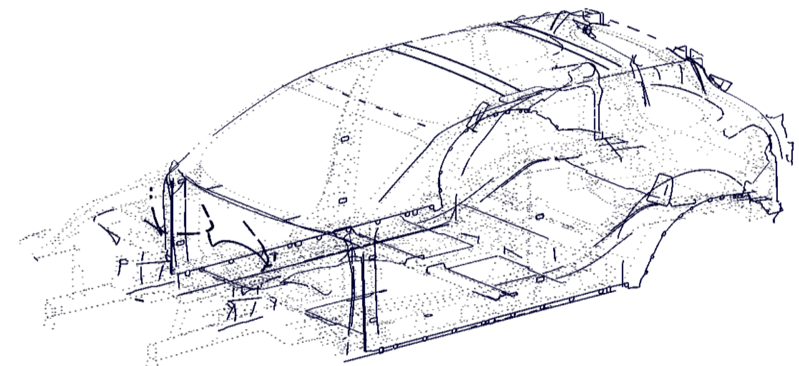
und

Prof. Dr.-Ing. Anton Matzenmiller (Institut für Mechanik IfM, Uni-Kassel)

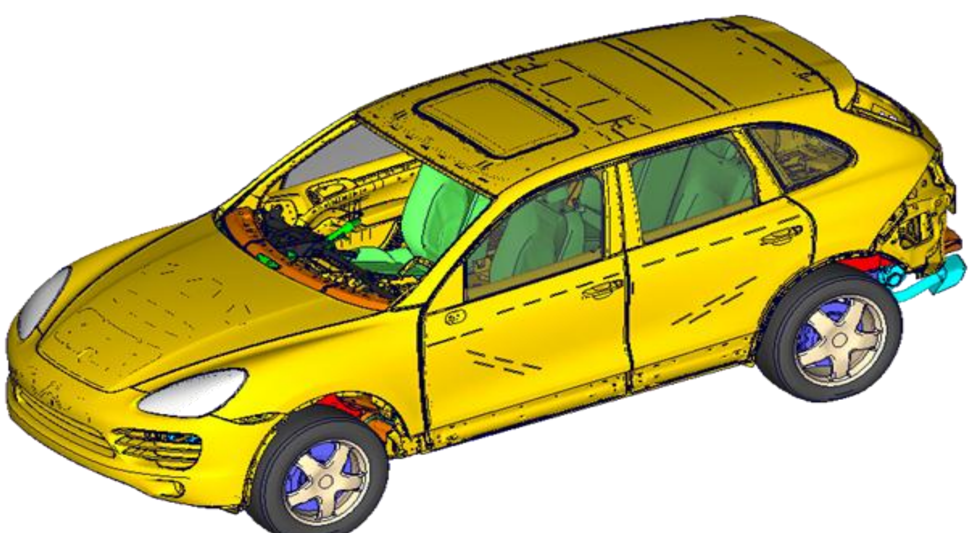
Motivation

Hauptaufgaben der Klebverbindungen

- Einfache Montage der Fügepartner
- Kraftübertragung zwischen strukturellen Bauteilen erhöhen
- Ermöglichung der Mischbauweise



[Fügeverbindungen Cayenne 2010]



[Porsche Cayenne 2010]

Anforderungen an das Modell "Strukturkleben" in der FEM

- Darstellung der Beanspruchungen in der Klebschicht
- Beschreibung des Versagens
- Erfassung von dehnratenabhängigen Materialeigenschaften
- Effizienz hinsichtlich der Rechenzeit (krit. Zeitschritt)
- Eindeutige Identifikation der Werkstoff- und Versagensparameter

Fazit: Komplexe Modellbildung von sehr dünnen Klebschichten in der FEM

Inhaltsübersicht

- **Nichtassoziiertes elastoviskoplastisches Materialmodell für duktil modifizierte Klebschichten (TAPO)**

- **Verifikation an Grundversuchen**

- **Modellierungsansätze der Klebverbindung**
  - ➢ **Schnittstellenmodell für Grenzschichtelemente**

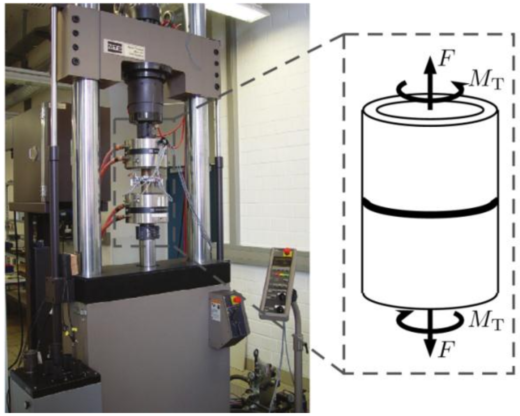
- **Validierung an bauteilähnlichen Proben**

Grundversuche an Klebstoffverbindungen

Charakterisierung des elastoplastischen Klebstoffverhaltens:

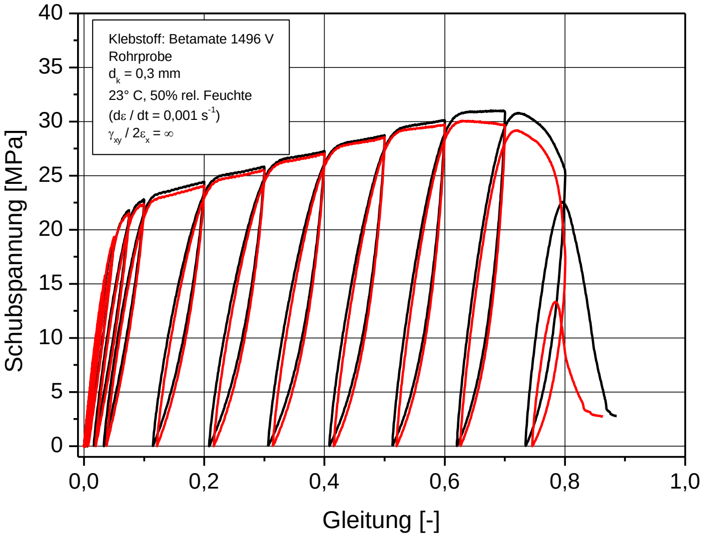
Warmaushärtender Klebstoff
auf Epoxidharzbasis

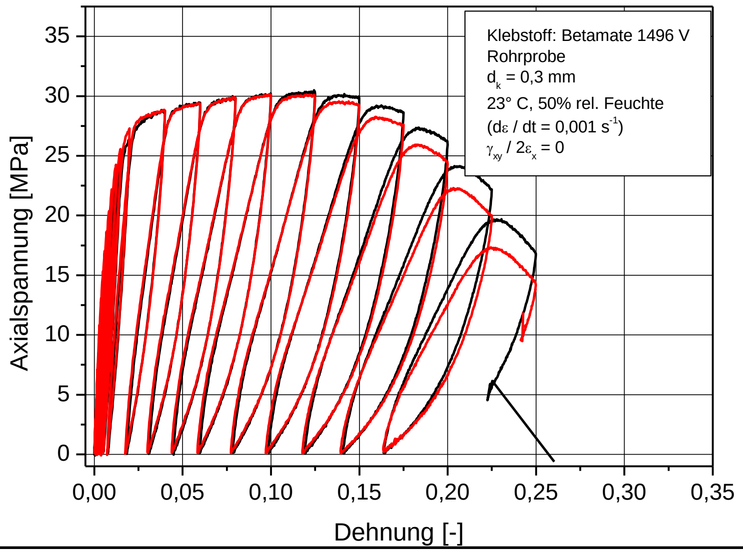
Doppelrohrprobe nach DIN EN 14869-1



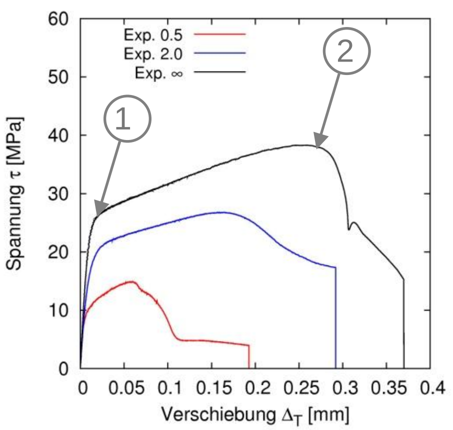
[Schlimmer / Forschungsbericht P676 FOSTA, 2007]

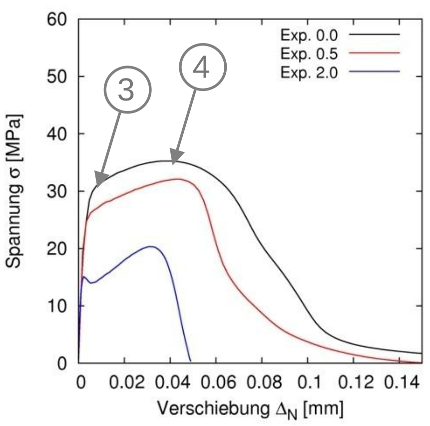
Torsions-, Zug- und Kombinationsversuche
sowie Be- und Entlastungsversuche

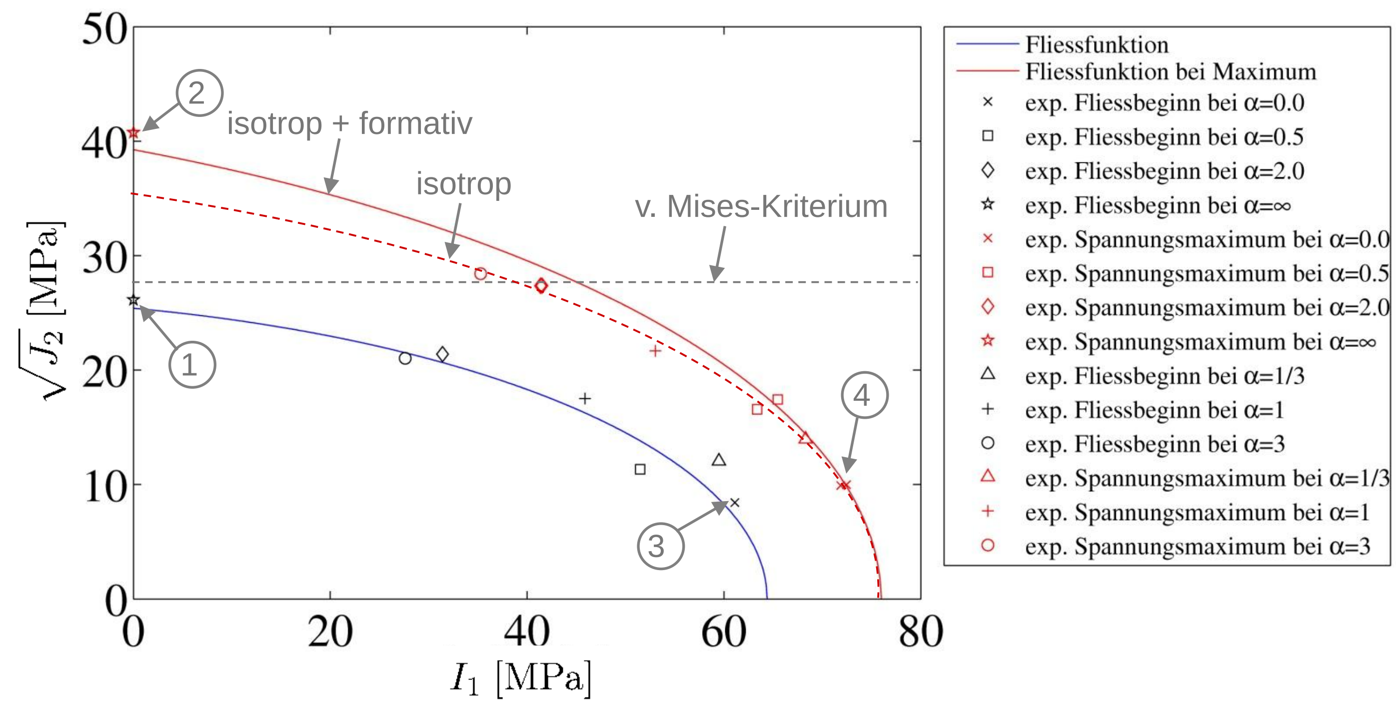




Fließortskurven zu Fließbeginn und beim Maximum







Zug- und Torsionsbeanspruchungen

charakterisiert: $\alpha = \dfrac{|\gamma_{xy}|}{2\,\varepsilon_{xx}}$

Mittlere Prüfgeschwindigkeit: 2.0e-4 mm/s

Modifikation für Zug-Druck-Unsymmetrie

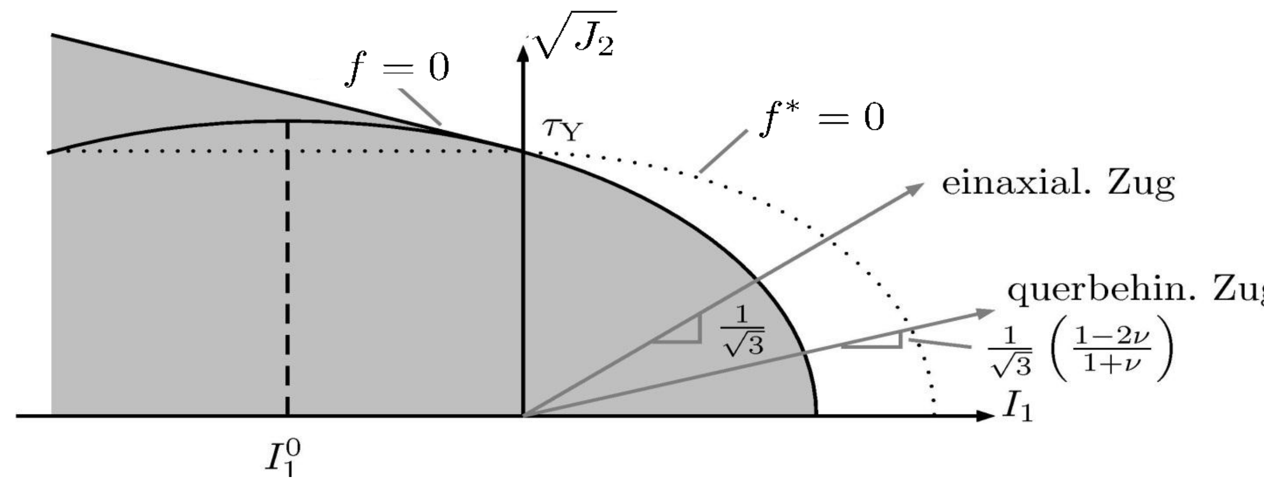
Ersetzung der elliptischen Fließfunktion im Druckbereich durch DRUCKER & PRAGER-Kriterium (FLG=1)

Fließbedingung des **T**OUGHENED-**A**DHESIVE-**PO**LYMERE-MODELLS:

$$f := \frac{J_2}{(1-D)^2} + \frac{1}{\sqrt{3}} a_1 \tau_0 \frac{I_1}{1-D} + \frac{a_2}{3} \left\langle \frac{I_1}{1-D} \right\rangle^2 - \tau_Y^2 = 0 \quad , \quad a_1 := \hat{a}_1(r)$$

Berücksichtigung der Mikroreibung unter Druck $I_1 < 0$ durch formative Verfestigung:
[Yee und Pearson / J. Mat. Science, 1986]

$$\dot{a}_1 := a_{H1} \dot{r} \quad \wedge \quad a_1(r) \geq 0$$



Plast. Potential: $f^* := \frac{J_2}{(1-D)^2} + \frac{a_2^*}{3} \left\langle \frac{I_1}{1-D} \right\rangle^2 - \tau_Y^2$

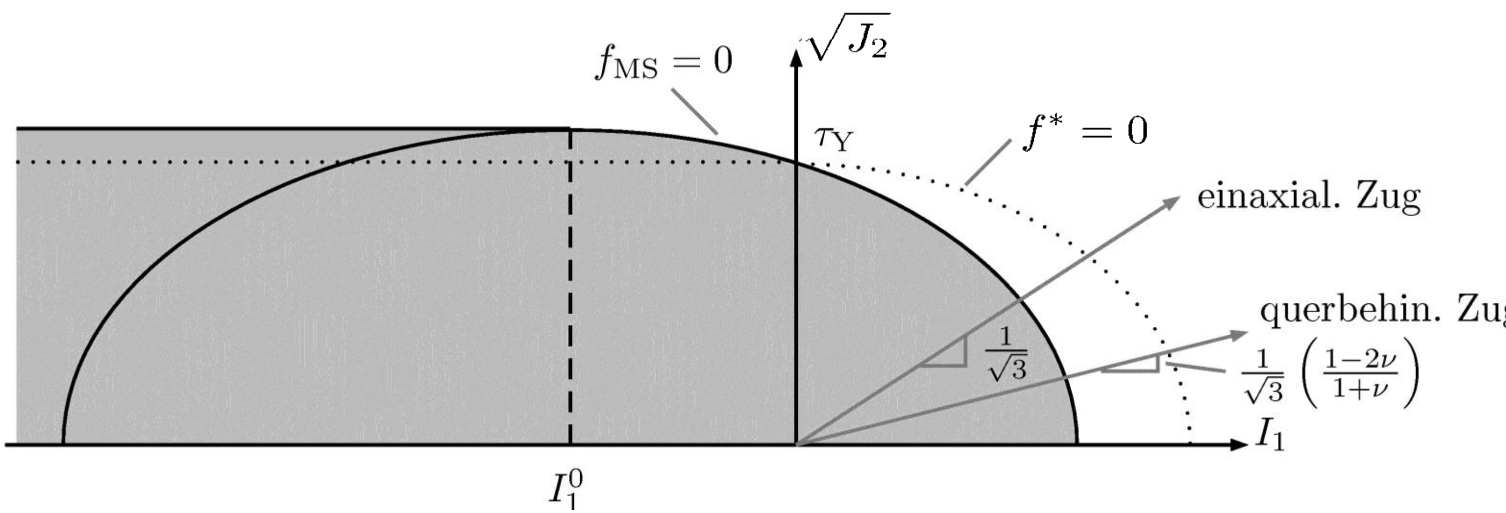
Fließregel: $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{pl} = \lambda \frac{\partial f^*}{\partial \boldsymbol{\sigma}} = \frac{\lambda}{(1-D)^2} \left(\boldsymbol{\sigma}^D + \frac{2}{3} a_2^* \langle I_1 \rangle \mathbf{1} \right)$

Konservative Formulierung der Zug-Druck-Unsymmetrie

Bei fehlenden Druckversuchen kann DRUCKER & PRAGER-Kriterium (FLG=1) durch von MISES-Fließbedingung (FLG=2) ab Scheitelpunkt ersetzt werden:

$$f_{\mathrm{MS}} := \frac{J_2}{(1-D)^2} + \frac{a_2}{3}\left\langle \frac{I_1}{1-D} + \frac{\sqrt{3}a_1\tau_0}{2a_2} \right\rangle^2 - \left(\tau_{\mathrm{Y}}^2 + \frac{a_1^2\tau_0^2}{4a_2}\right) = 0$$

Konservative Abschätzung der Druck-Scher-Festigkeit!



Die nichtassoziierte Fließregel $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\mathrm{pl}} = \lambda \frac{\partial f^*}{\partial \boldsymbol{\sigma}}$ mit plastischem Potential f^* bleibt identisch

Dehnratenabhängigkeit der Fließspannung

Definition der schubbasierten plastischen Bogenlänge:

$$\dot{\gamma}_\mathrm{v} := \sqrt{2\,\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_\mathrm{pl}\cdot\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_\mathrm{pl}} = \sqrt{2}\lambda\sqrt{\frac{\partial f^*}{\partial\boldsymbol{\sigma}}\cdot\frac{\partial f^*}{\partial\boldsymbol{\sigma}}} = \frac{\lambda}{(1-D)^2}\sqrt{4\left[J_2 + \frac{2}{3}\left(a_2^*\langle I_1\rangle\right)^2\right]}$$

geschädigte Verfestigungsvariable:
[Lemaitre: A Course on Damage Mechanics, 1992]

$$\dot{r} := (1-D)\,\dot{\gamma}_\mathrm{v}$$

isotrope Verfestigung:

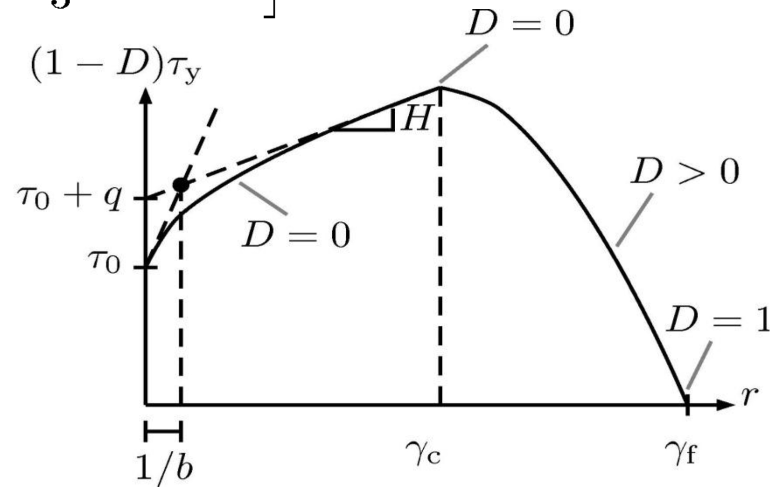
$$R = q[1-\exp(-b\,r)] + H\,r$$

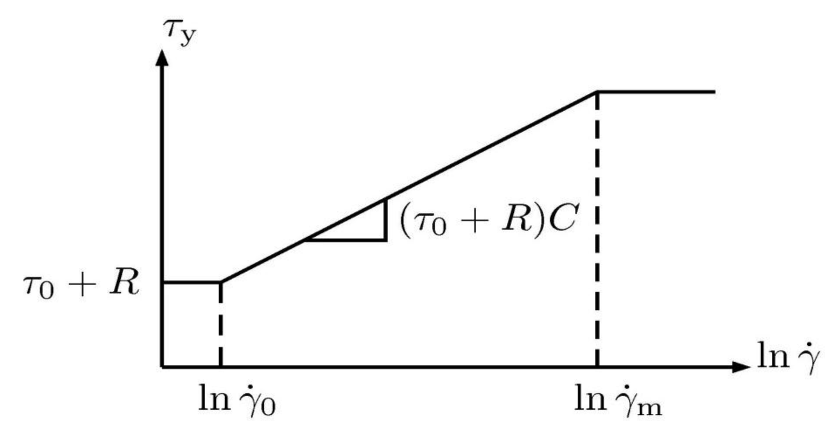
ratenabhängige Schubfließspannung τ_Y
des I_1-J_2-Plastizitätsmodells gemäß
JOHNSON & COOK-Modell:

$$\tau_\mathrm{Y} = (\tau_0 + R)\left[1 + C\left(\left\langle\ln\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0}\right\rangle - \left\langle\ln\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_\mathrm{m}}\right\rangle\right)\right]$$

$$\dot{\gamma} := \sqrt{2\,\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}\cdot\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}}$$

geschwindigkeitsabhängige Versuchsdaten*
approximiert durch lineare Ausgleichsgeraden
in halblogarithmischer Darstellung
oberhalb der Bezugsverzerrungsrate $\dot{\gamma}_0$



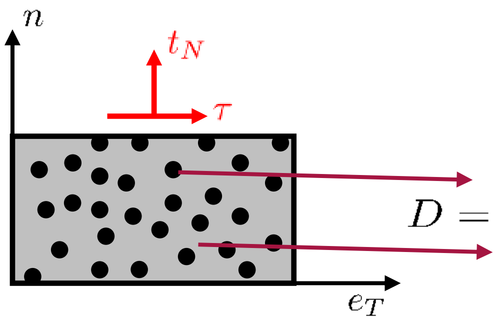


*) M. Brede, IFAM, FhG Bremen, Forschungsbericht zu P676, FOSTA, 2007

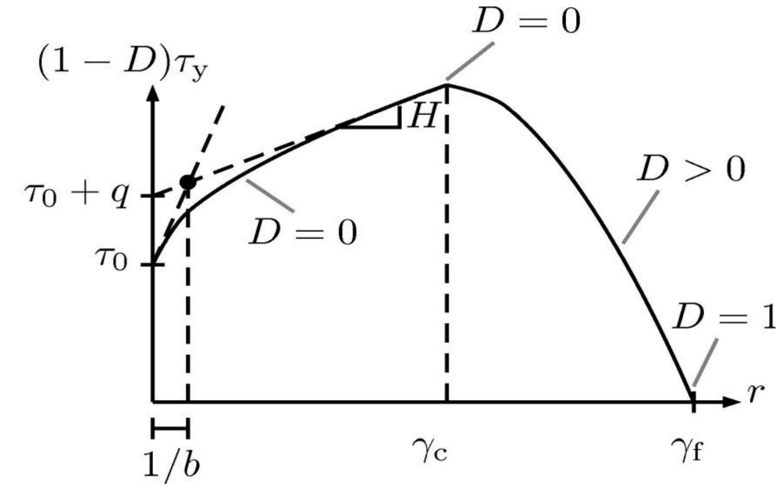
Schädigung und Versagen der Klebschicht

Bildung der effektiven Spannung $\boldsymbol{\sigma}^{\text{eff}} = \dfrac{\boldsymbol{\sigma}}{\psi}$ nach RABOTNOV mittels der Integrität ψ (Kontinuität)

KACHANOV-Schädigung:



$$D = \frac{A_{Defekt}}{A_{Brutto}} \qquad \psi = 1 - D$$



Schädigung des Klebstoffs nur durch irreversiblen Zug und Gleitung der Klebschicht.

Als schädigungsinduzierende Vergleichsverzerrung $\dot{r}$ dient die geschädigte plastische Bogenlänge: $\dot{r} = (1 - D)\,\dot{\gamma}_{\text{v}} = \lambda\sqrt{4\left[J_2^{\text{eff}} + \frac{2}{3}\left(a_2^{*}\langle I_1^{\text{eff}}\rangle\right)^2\right]}$

Evolutionsgleichung für Schädigung
als Funktion der Plastifizierung:

$$\dot{D} = n\left\langle\frac{r - \gamma_{\text{c}}}{\gamma_{\text{f}} - \gamma_{\text{c}}}\right\rangle^{n-1}\frac{\dot{r}}{\gamma_{\text{f}} - \gamma_{\text{c}}}$$

Empirischer Ansatz für Schädigung:
[Lemaitre / J. Eng. Mater. Tech., 1985]

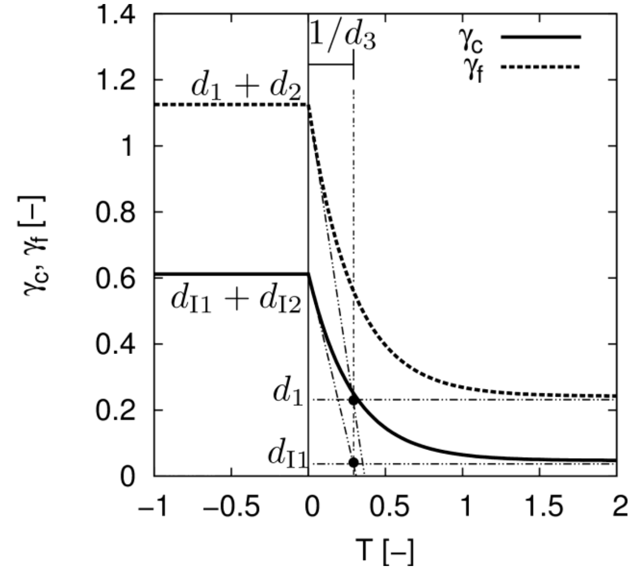
$$D = \left\langle\frac{r - \gamma_{\text{c}}}{\gamma_{\text{f}} - \gamma_{\text{c}}}\right\rangle^{n}$$

Verzerrungsbasiertes Bruchkriterium (JOHNSON-COOK)

Bruchverzerrung γ_f (Schub- bzw. Zugbruch) hängt von der Beanspruchung ab.

Maß der Beanspruchung sei die Triaxialität $T := \sigma_\mathrm{m}/\sigma_\mathrm{eq}$, die die Bruchverzerrung gemäß JOHNSON & COOK-Modell beeinflusst:

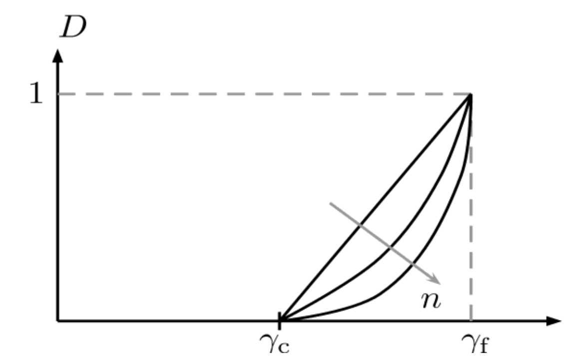
$$\gamma_\mathrm{f} = [d_1 + d_2 \exp(-d_3 \langle T \rangle)] \left(1 + d_4 \left\langle \ln \frac{\dot\gamma}{\dot\gamma_0} \right\rangle\right)$$



Mehrachsigkeit der Bruchdehnung
[Rice und Tracy / J. Mech. Phys. Solids, 1969]

Kritische Verzerrung γ_c soll proportional zur Versagensverzerrung γ_f sein:

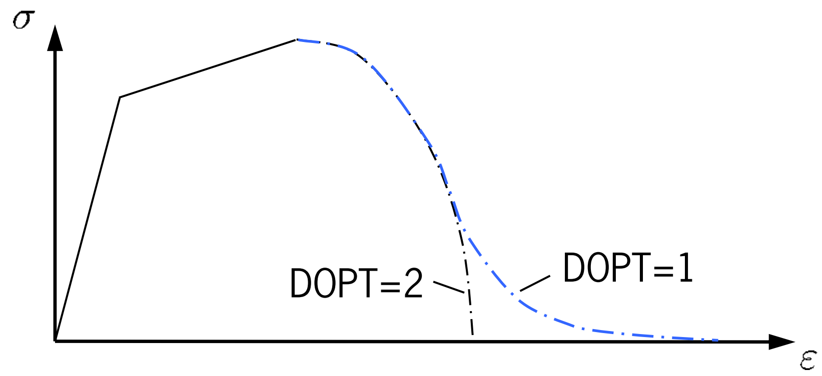
$$\gamma_\mathrm{c} = [d_{\mathrm{I}1} + d_{\mathrm{I}2} \exp(-d_3 \langle T \rangle)] \left(1 + d_4 \left\langle \ln \frac{\dot\gamma}{\dot\gamma_0} \right\rangle\right)$$



Wachstum der Schädigung $\dot D > 0$ findet oberhalb der Defekt induzierenden Vergleichsverzerrung $r \geq \gamma_\mathrm{c}$ statt

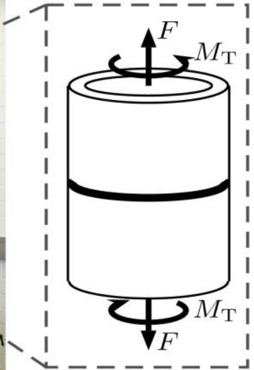
Zusammenfassung Konstitutivgleichungen des TAPO-Modells: *MAT_TOUGHENED_ADHESIVE_POLYMER bzw. *MAT_252

- Zwei Fließbedingungen zur Beschreibung der Zug-Druck-Unsymmetrie (FLG=1: DRUCKER-PRAGER, FLG=2: MISES)
- Nichtlineare isotrope Verfestigung über erweiterten Exponentialansatz oder *CURVE (in Bearbeitung)
- Ratenabhängigkeit durch JOHNSON & COOK-Ansatz oder *TABLE (in Bearbeitung)
- Formative Verfestigung erfasst Mikroreibung zwischen Klebstoffpartikel
- Schädigungsinitiierung und Bruchgleitung mit JOHNSON & COOK-Ansatz oder *CURVES (Funktion der Triaxialität, in Bearbeitung) bzw. *TABLES (Funktion der Triaxialität und Verzerrungsrate, in Bearbeitung)
- Bruchgleitung zusätzlich mit Regularisierung versehen (in Bearbeitung)
- Zwei Schädigungsmodelle (DOPT=1: mit Wendepunkt, DOPT=2: ohne Wendepunkt)

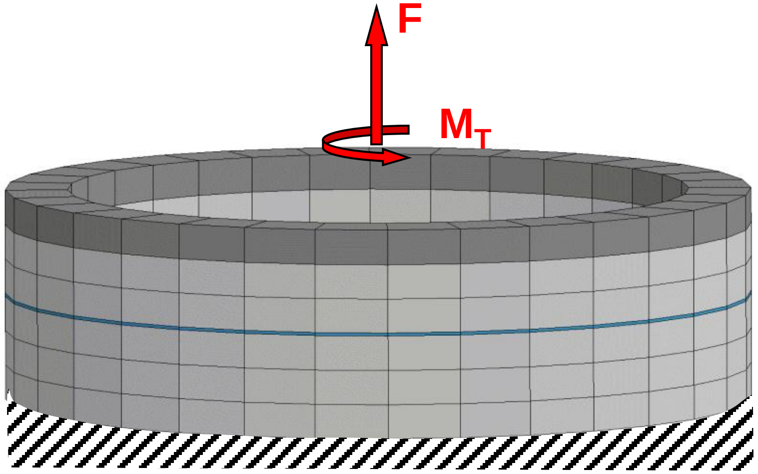


Simulation der Grundversuche zur Verifikation

Doppelrohrprobe nach DIN EN 14869-1



Modell-
bildung

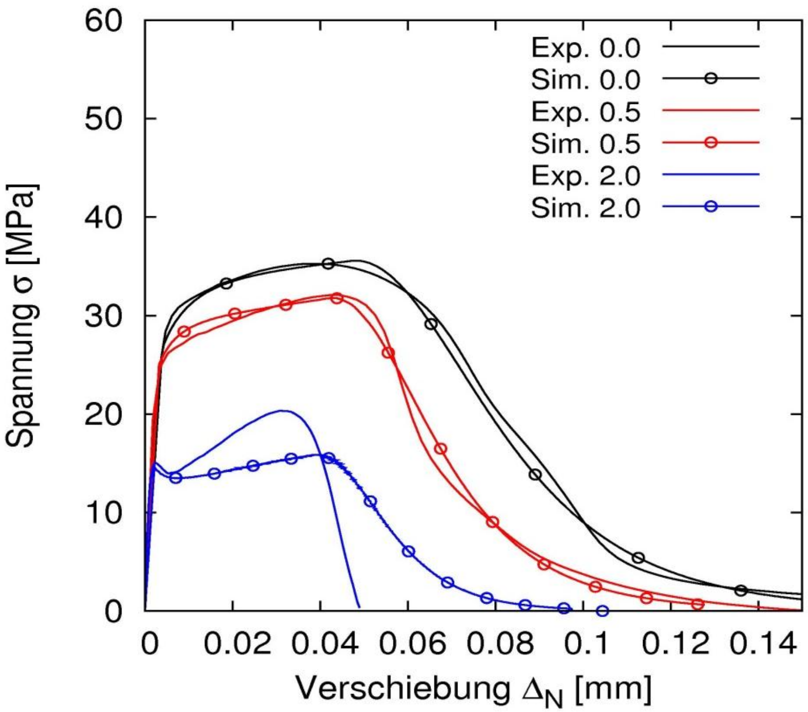


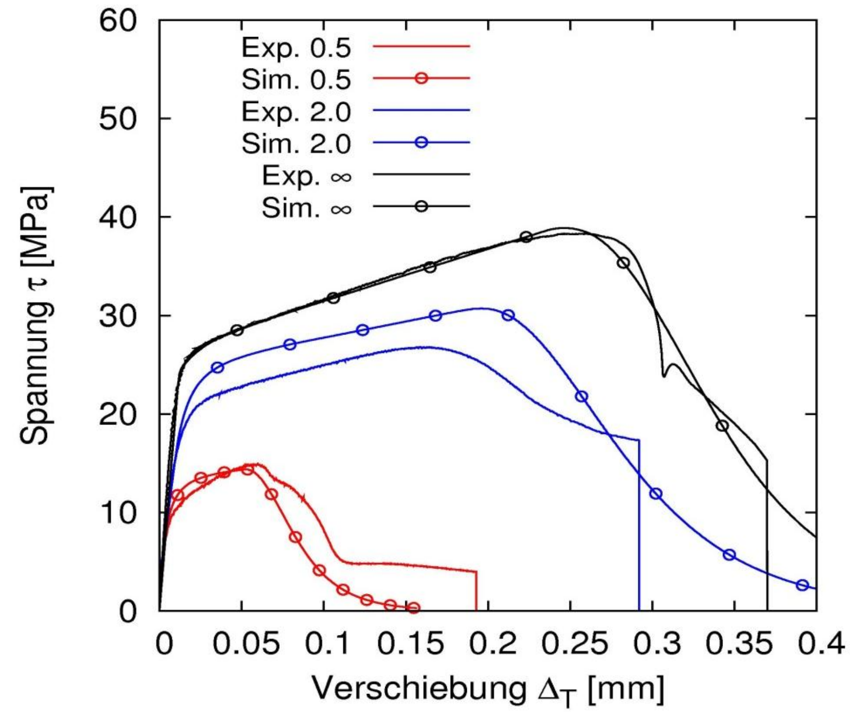
[Schlimmer / Forschungsbericht P676 FOSTA, 2007]

- Klebschicht mit 1 Volumenelement über Höhe $d_\mathrm{k} = 0.2\ \mathrm{mm}$
- Mittlere Prüfgeschwindigkeit: $v = 2 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{mm/s}$
- Identifikation der Materialparameter für den elastisch-plastischen Bereich inklusive Schädigung und Versagen mittels Optimierungssoftware LS-OPT
- Identifikationsgrundlage bilden 6 statische Doppelrohrprobenversuche

Simulation der Grundversuche

Vergleiche von Experiment* und Simulation mit LS-DYNA am Rohrprobenversuch

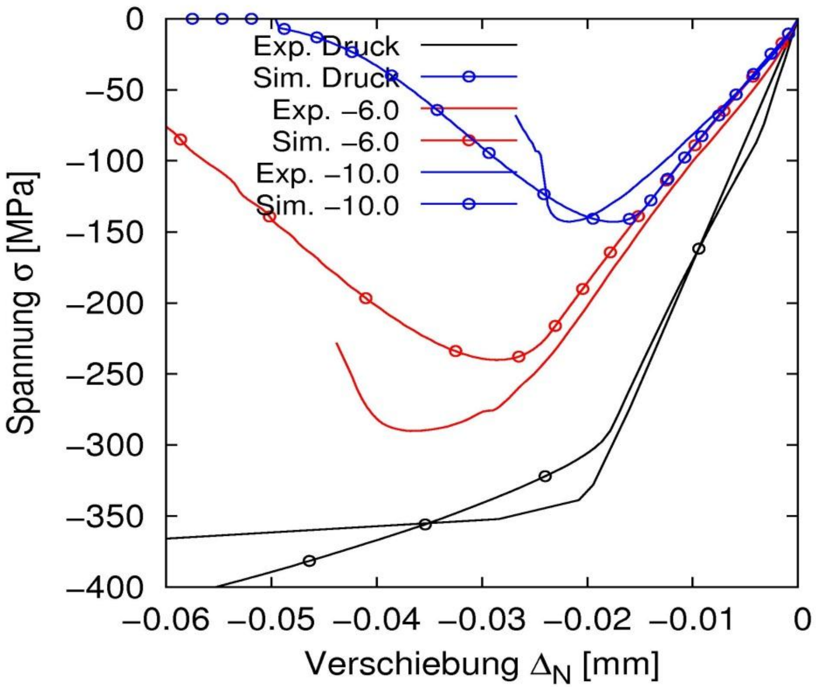


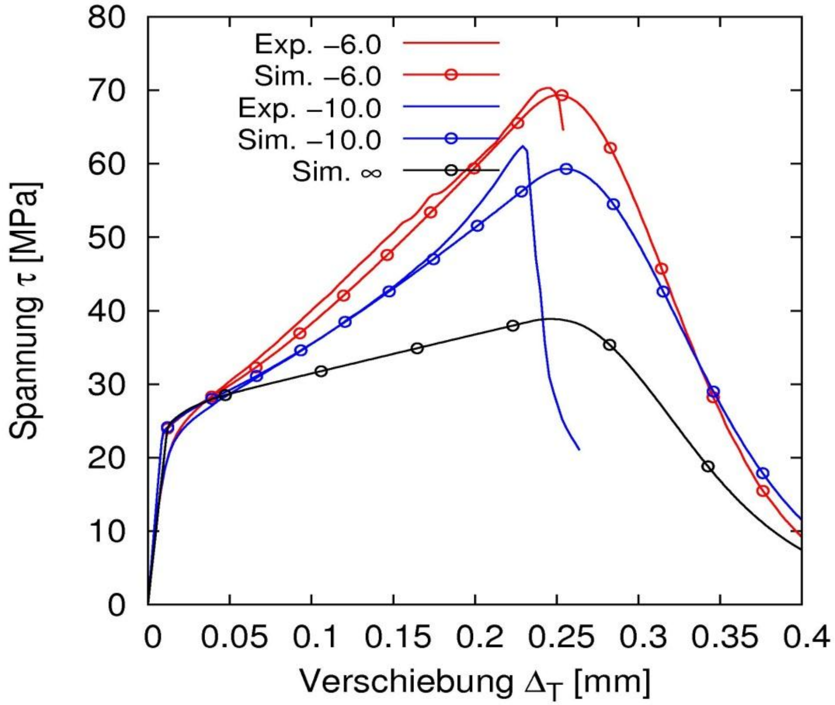


*) M. Schlimmer, C. Barthel, IfW, Universität Kassel, Forschungsbericht zu P676, FOSTA, 2007

Simulation der Grundversuche – Forts.

Vergleiche von Experiment* und Simulation mit LS-DYNA an der Rohrprobe unter Druck und Torsion



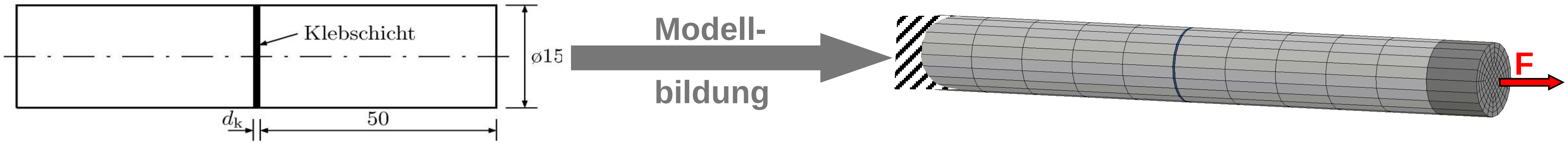


- Statische Rohrprobenversuche geeignet zur Identifikation der Materialparameter für plastische Verfestigung und Schädigung
- TAPO-Modell erfasst die grundlegenden phänomenologischen Materialeigenschaften des duktil modifizierten Klebstoffs

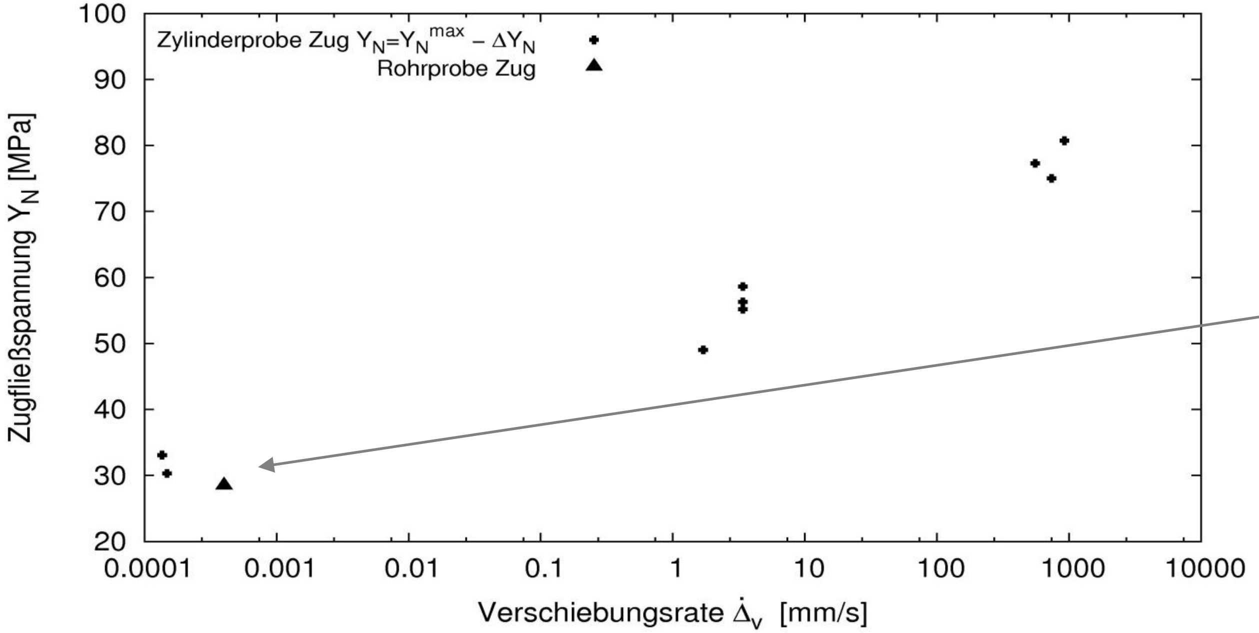
*) M. Schlimmer, C. Barthel, IfW, Universität Kassel, Forschungsbericht zu P676, FOSTA, 2007

Simulation der Grundversuche zur Verifikation

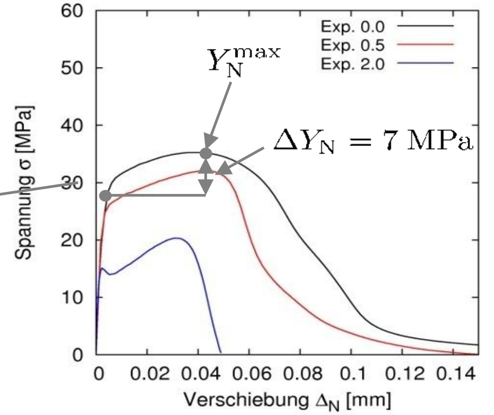
Dynamische Versuche an der Kopfzugprobe*



- Klebschicht mit 1 Volumenelement über Höhe $d_{\mathrm{k}} = 0.4\ \mathrm{mm}$
- Prüfgeschwindigkeiten an der Probe: $\dot{\Delta}_{\mathrm{v}} = 8.0\,10^{-5},\ 3.4,\ 740\ [\mathrm{mm/s}]$



Referenz Doppelrohrprobe Zug

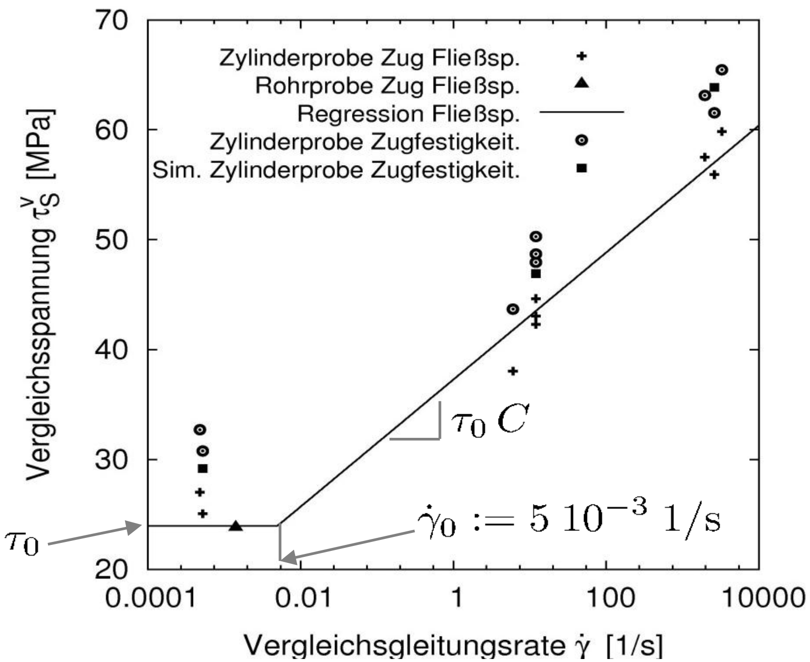


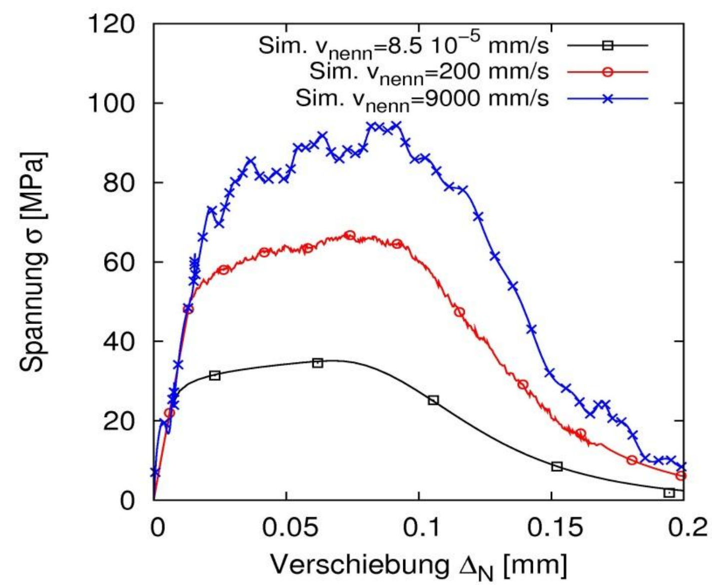
*) M. Brede, IFAM, FhG Bremen, Forschungsbericht zu P676, FOSTA, 2007

Simulation der Grundversuche – Forts.

Identifikation der dehnratenabhängigen Materialparameter am dynamischen Kopfzugversuch*

- Vergleichsspannung: $\tau_S^v := \sqrt{J_2 + \frac{1}{\sqrt{3}} a_1 \tau_0 I_1 + \frac{1}{3} a_2 I_1^2}$
- Vergleichsgleitungsrate: $\dot{\gamma} = \sqrt{2\dot{\varepsilon} \cdot \dot{\varepsilon}}$
- Ermittlung von C für $\dot{\gamma}_0 := 5\,10^{-3}\ 1/\mathrm{s}$: $\tau_S^v = \tau_0 + \tau_0\, C \left\langle \ln \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} \right\rangle$

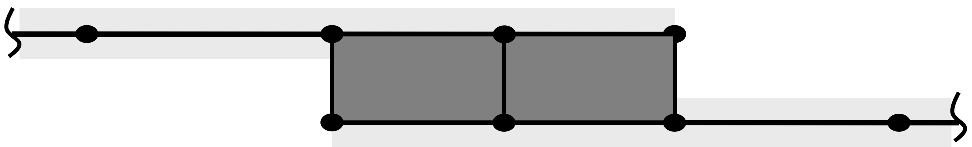




*) M. Brede, IFAM, FhG Bremen, Forschungsbericht zu P676, FOSTA, 2007

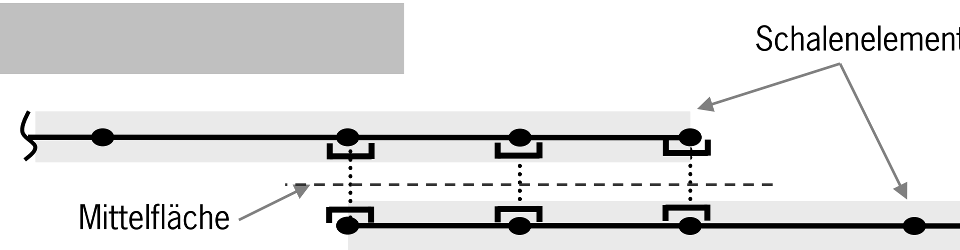
Modellierungsansätze der Klebverbindung

Kinematik



Volumenelemente ELFORM 1 und 2

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} & \varepsilon_{23} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix}$$



Grenzschichtelemente ELFORM 19 und 20

$$\boldsymbol{\Delta} = \begin{bmatrix} \Delta_{\mathrm{T1}} \\ \Delta_{\mathrm{T2}} \\ \Delta_{\mathrm{N}} \end{bmatrix} \qquad \Delta_{\mathrm{T}} = |\boldsymbol{\Delta}_{\mathrm{T}}|$$

Materialmodelle

3D-Kontinuum

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & \sigma_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{13} & \tau_{23} & \sigma_{33} \end{bmatrix}$$

Verbundmodell

$$\mathbf{t} = \begin{bmatrix} t_{\mathrm{T1}} \\ t_{\mathrm{T2}} \\ t_{\mathrm{N}} \end{bmatrix} \qquad \tau = |\mathbf{t}_{\mathrm{T}}|$$

Modellgenauigkeit ←

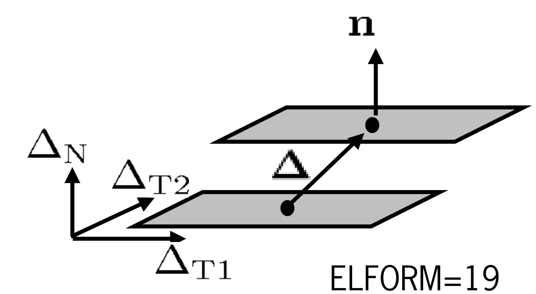
→ Recheneffizienz

Schnittstellenmodell *MAT_ADD_COHESIVE für das Grenzschichtelement

$$\boldsymbol{\Delta} = \begin{bmatrix} \Delta_{\mathrm{T1}} \\ \Delta_{\mathrm{T2}} \\ \Delta_{\mathrm{N}} \end{bmatrix}$$ mit Annahme des Verzerrungszustands $$\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{qD}} := \begin{bmatrix} 0 & 0 & \varepsilon_{13} \\ 0 & 0 & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} & \varepsilon_{23} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix}$$

Verzerrungsraten

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{\mathrm{qD}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{2}\left(\frac{\dot{\Delta}_{\mathrm{T1}}}{d_{\mathrm{k}}+\Delta_{\mathrm{N}}}\right) \\ 0 & 0 & \frac{1}{2}\left(\frac{\dot{\Delta}_{\mathrm{T2}}}{d_{\mathrm{k}}+\Delta_{\mathrm{N}}}\right) \\ \frac{1}{2}\left(\frac{\dot{\Delta}_{\mathrm{T1}}}{d_{\mathrm{k}}+\Delta_{\mathrm{N}}}\right) & \frac{1}{2}\left(\frac{\dot{\Delta}_{\mathrm{T2}}}{d_{\mathrm{k}}+\Delta_{\mathrm{N}}}\right) & \frac{\dot{\Delta}_{3}}{d_{\mathrm{k}}+\Delta_{\mathrm{N}}} \end{bmatrix}$$



ELFORM=19

TAPO-Kontinuumsmodell bzw. alle klassischen Solidmodelle

$$\boldsymbol{\sigma}_{\mathrm{qD}} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & 0 & \tau_{13} \\ 0 & \sigma_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{13} & \tau_{23} & \sigma_{33} \end{bmatrix}$$

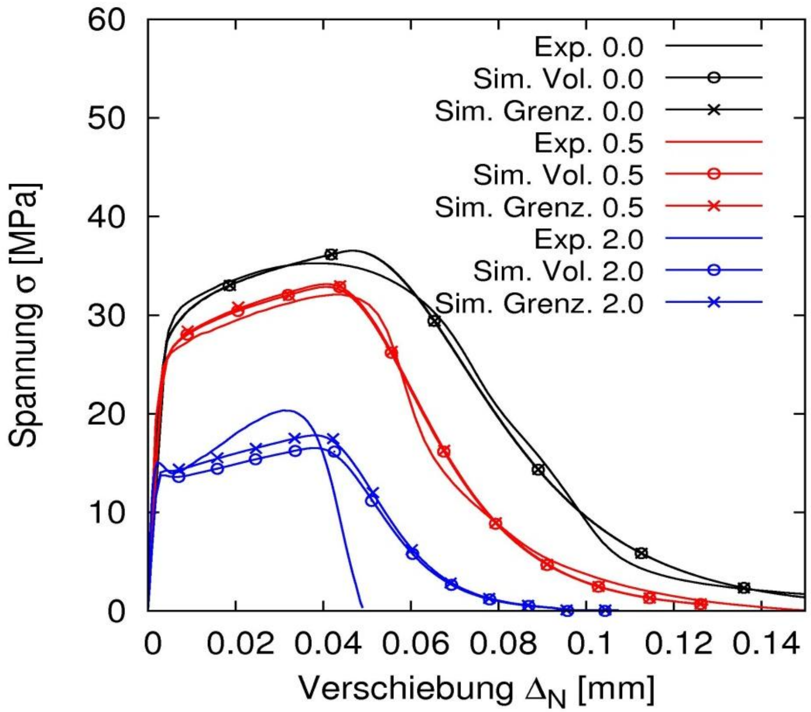
Rückrechnung auf Spannungsvektor mittels CAUCHY-Theorem

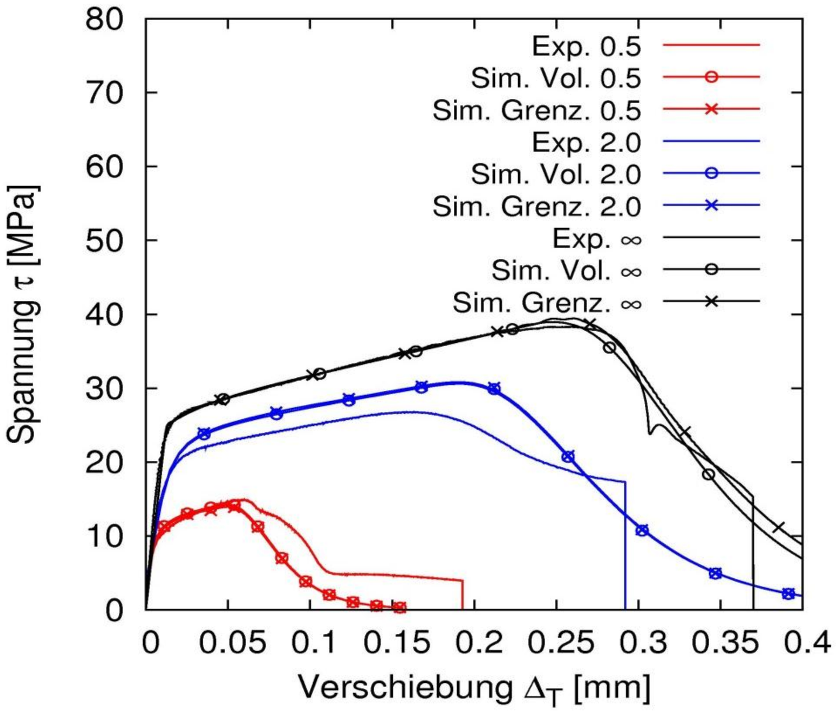
$$\mathbf{t} = \begin{bmatrix} t_{\mathrm{T1}} \\ t_{\mathrm{T2}} \\ t_{\mathrm{N}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_{13} \\ \tau_{23} \\ \sigma_{33} \end{bmatrix} = \boldsymbol{\sigma}_{\mathrm{qD}}\,\mathbf{n}$$

$(.)_{\mathrm{qD}}$: querdehungsbehinderte Klebschicht

Schnittstellenmodell *MAT_ADD_COHESIVE für das Grenzschichtelement

Vergleich zwischen Simulationen mit Volumen- und Grenzschichtelement sowie dem Experiment*
anhand des Rohrprobenversuchs (LS-DYNA)





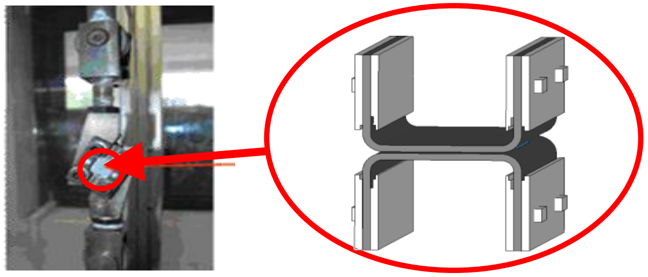
Vorteile des Verfahrens:

- Keine neue Parameteridentifikation notwendig.
- Höhere Recheneffizienz mit Grenzschichtelement ELFORM=19 bei quasi identischer Modellgenauigkeit.

*) M. Schlimmer, C. Barthel, IfW, Universität Kassel, Forschungsbericht zu P676, FOSTA, 2007

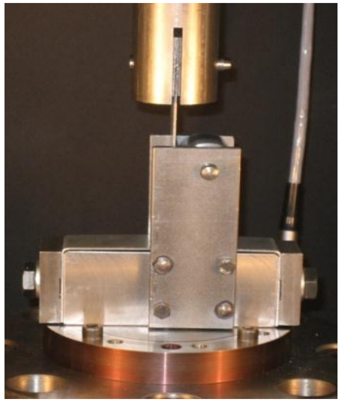
Validierung des TAPO-Modells an bauteilähnlichen Proben

KS2 Probe



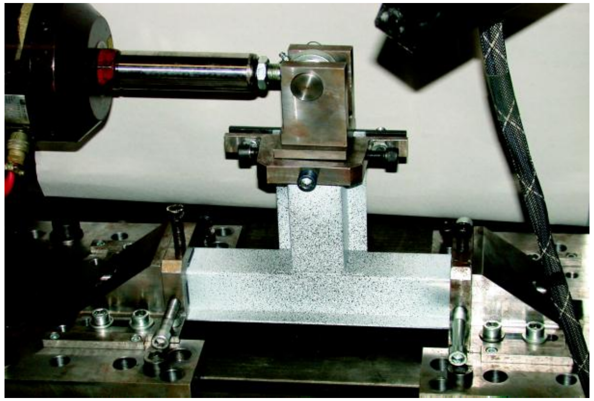
LWF, Paderborn

Schäl-Scher-Versuch



IfM, Kassel

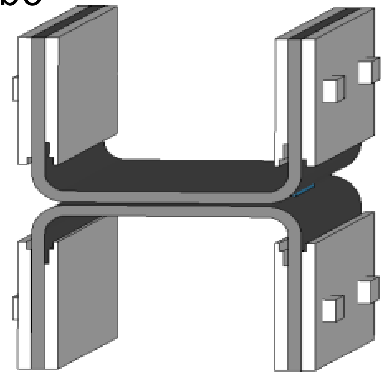
T-Stoß

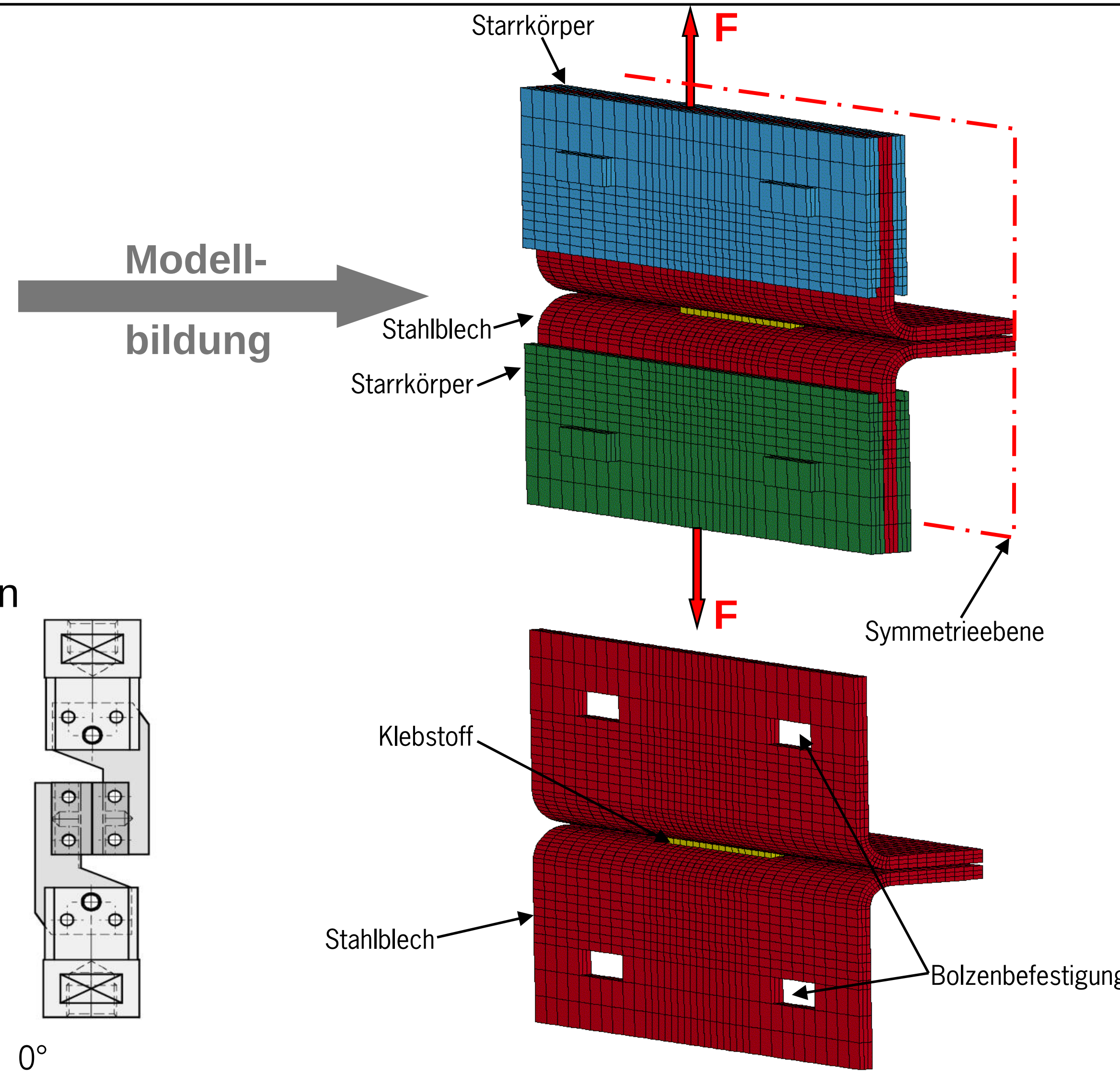


LWF, Paderborn

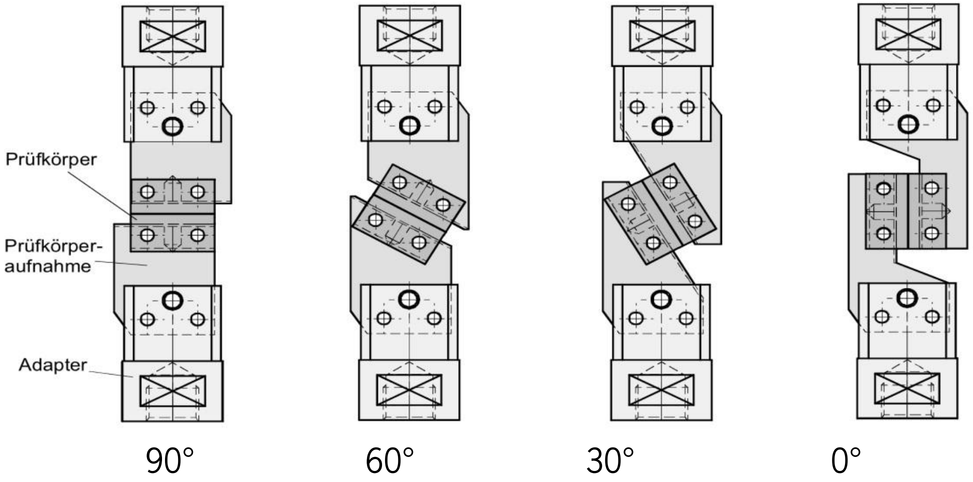
Validierung an KS2-Versuch

FE-Modell der KS2-Probe*



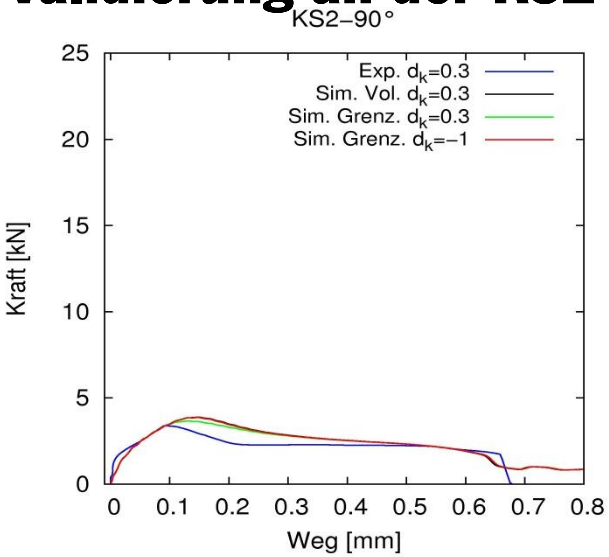


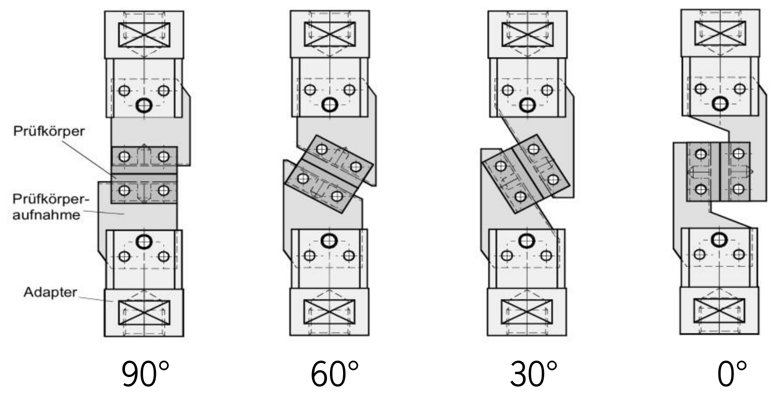
Kombinierte Zug-Scherbelastungen

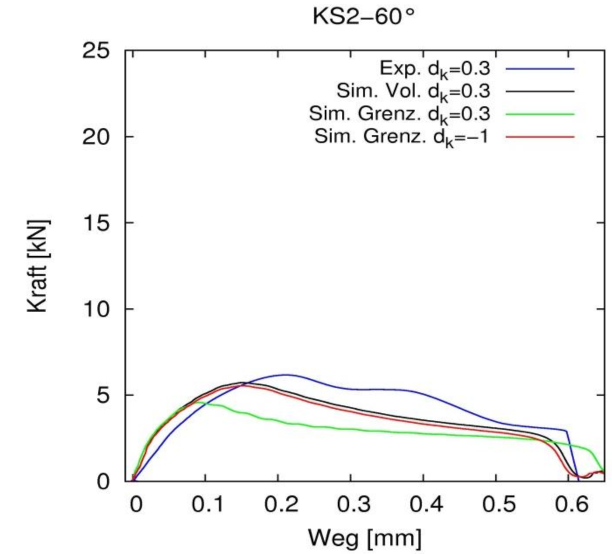


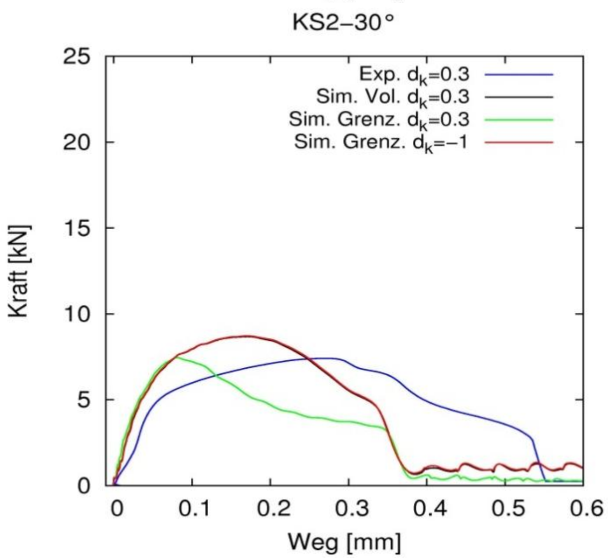
*) O. Hahn, M. Wißling, LWF, Universität Paderborn, Forschungsbericht zu P676, FOSTA, 2007

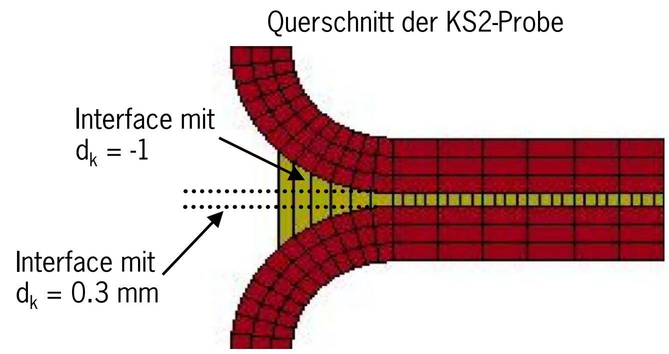
Validierung an der KS2-Probe (nom. v = 10 mm/min)

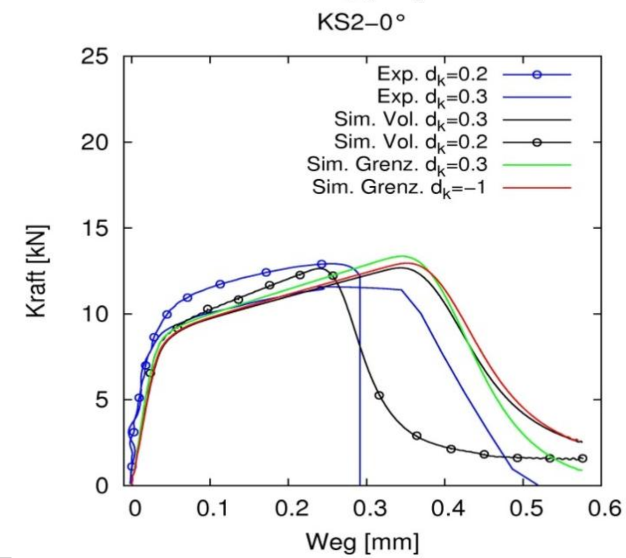




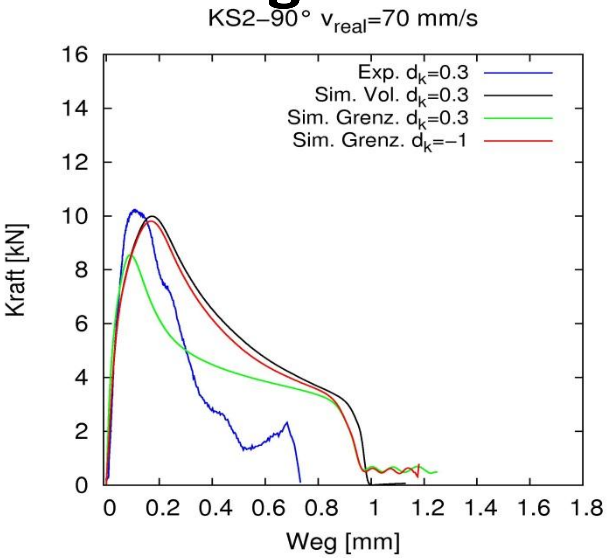


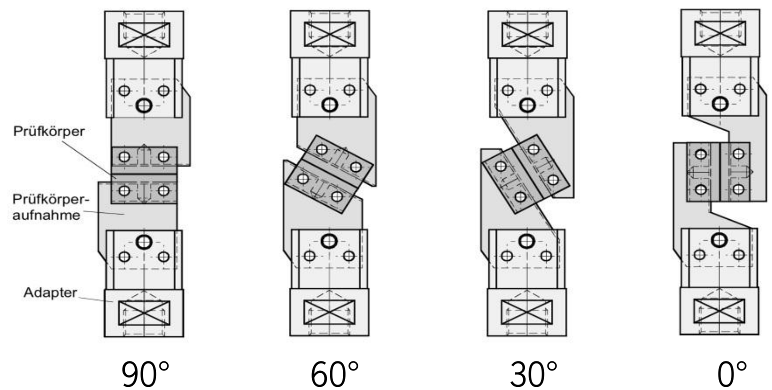


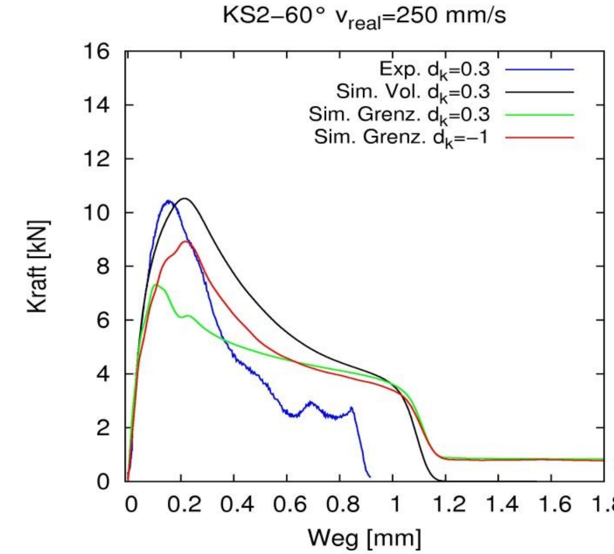


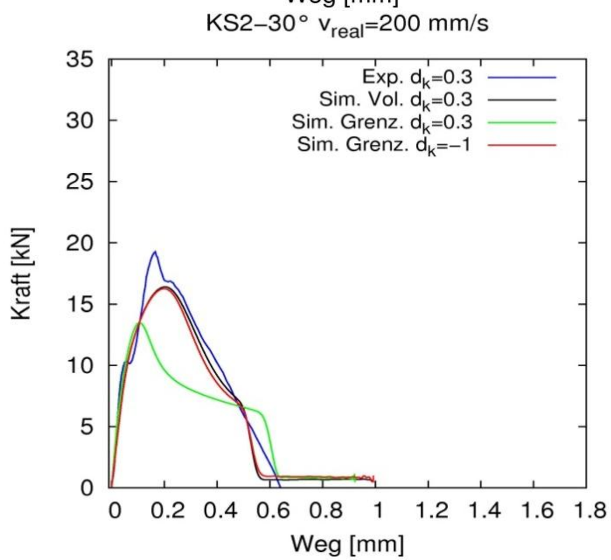


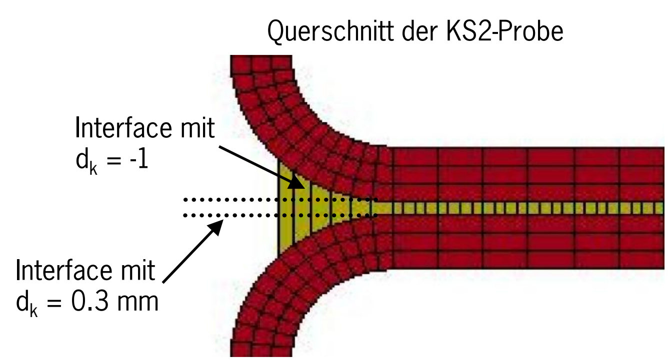
Validierung an der KS2-Probe (nom. v = 1 m/s)

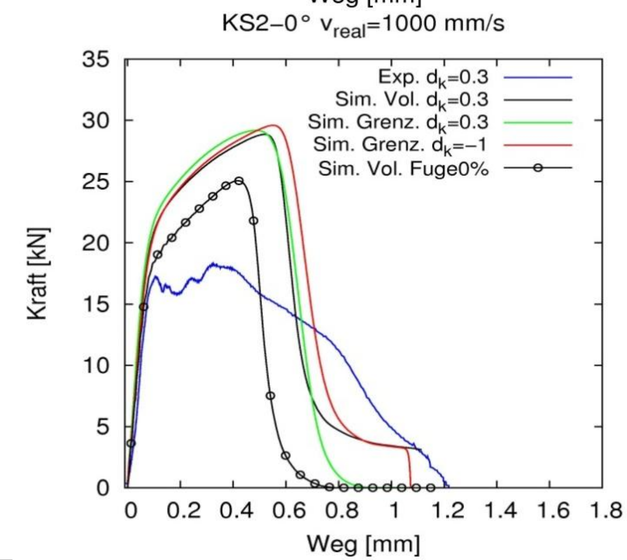




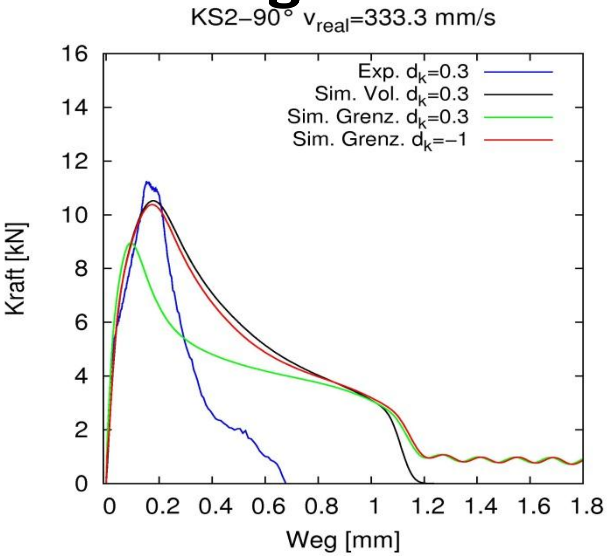


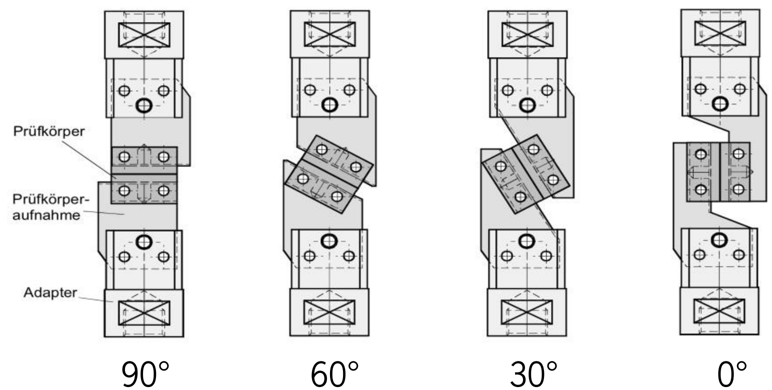


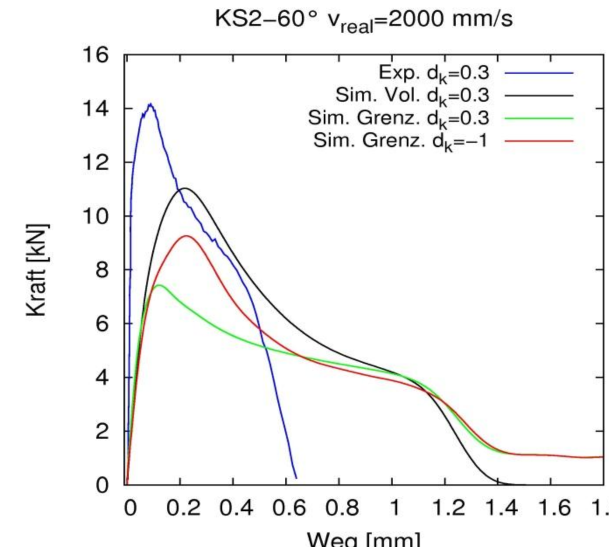


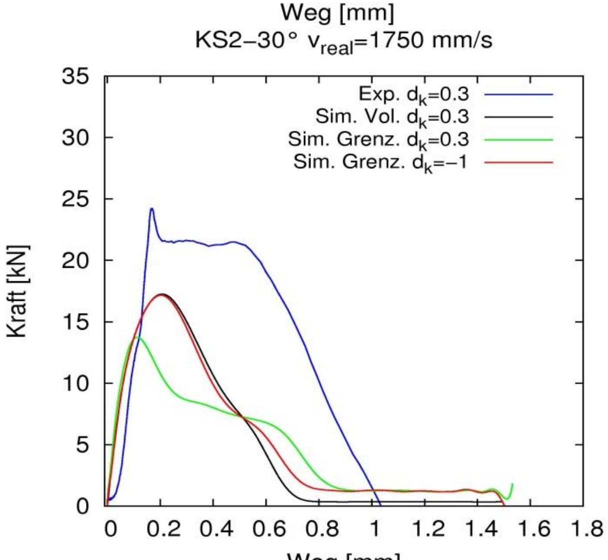


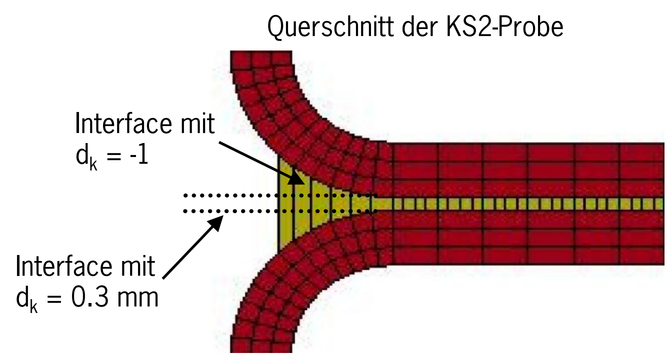
Validierung an der KS2-Probe (nom. v = 2.5 m/s)

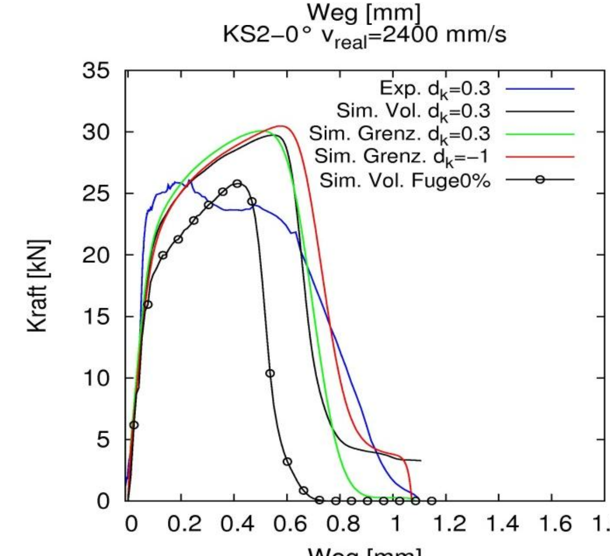




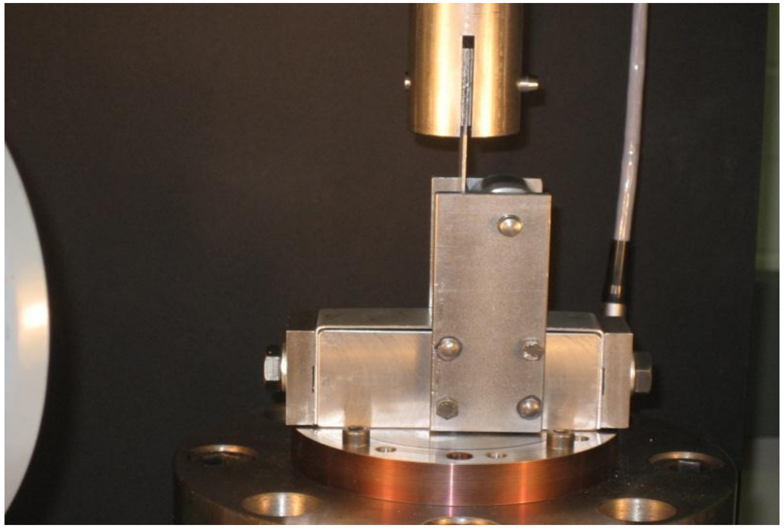


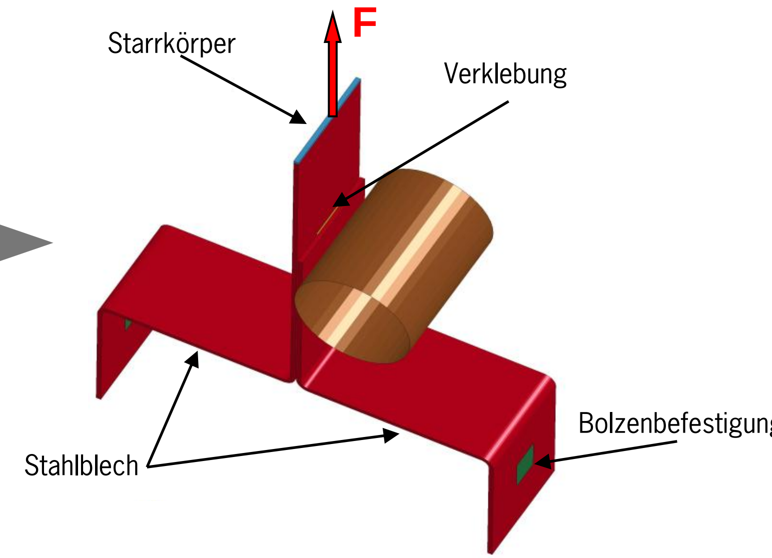


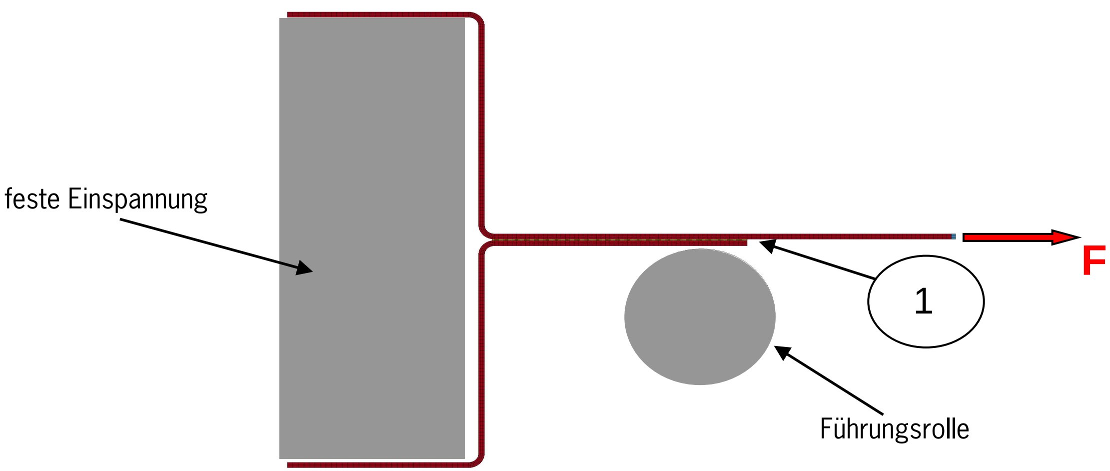


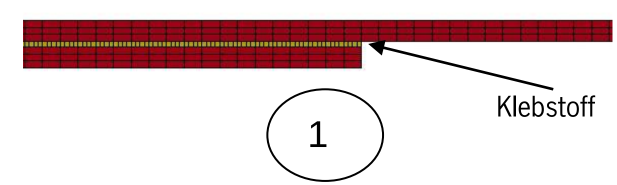


Validierung am Schäl-Scher-Versuch*



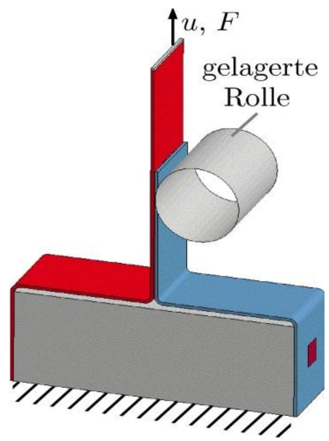


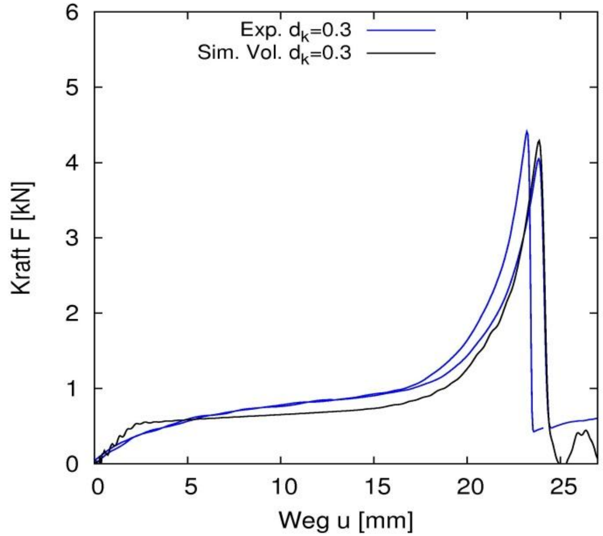


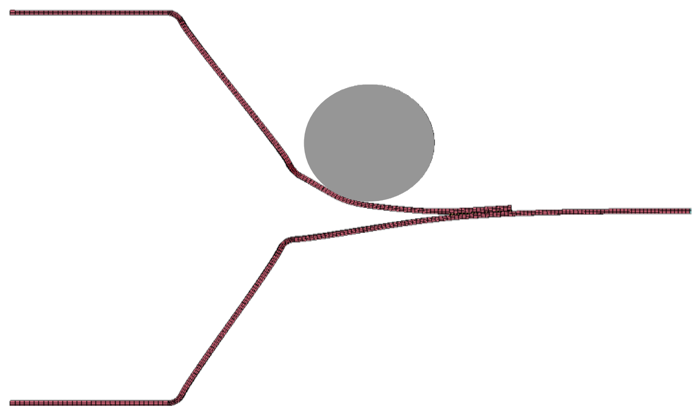


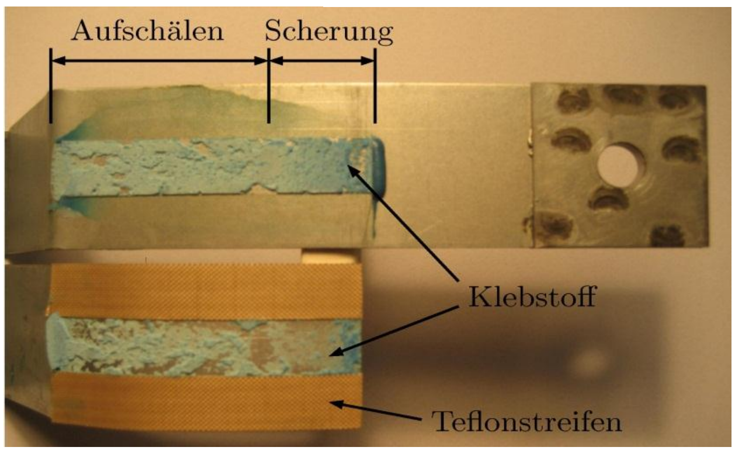
*) F. Burbulla: Kontinuumsmechanische und bruchmechanische Modelle für Werkstoffverbunde. Dissertationsschrift, Disputation 16.07.2013, Fachbereich Maschinenbau, Universität Kassel

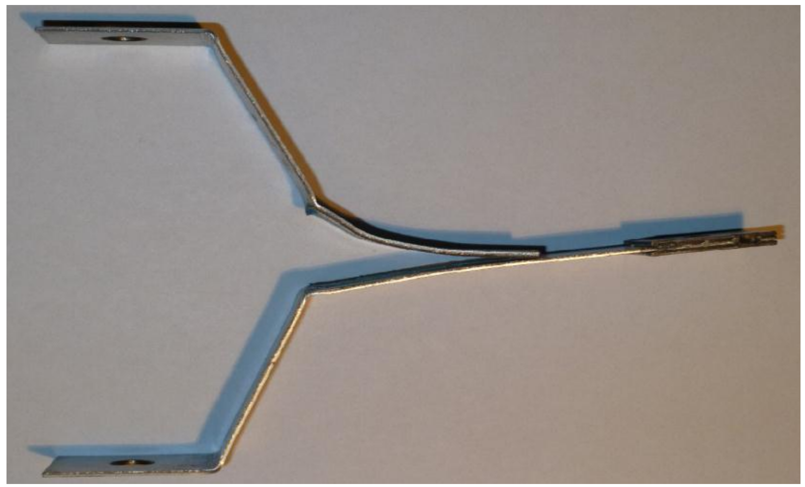
Validierung am Schäl-Scher-Versuch*





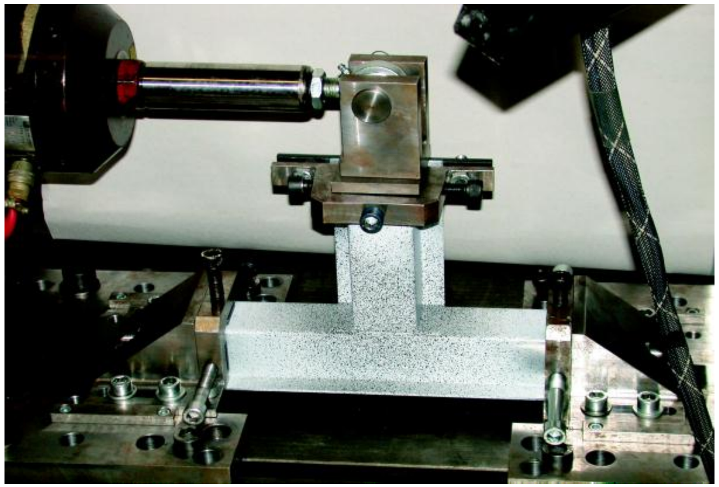




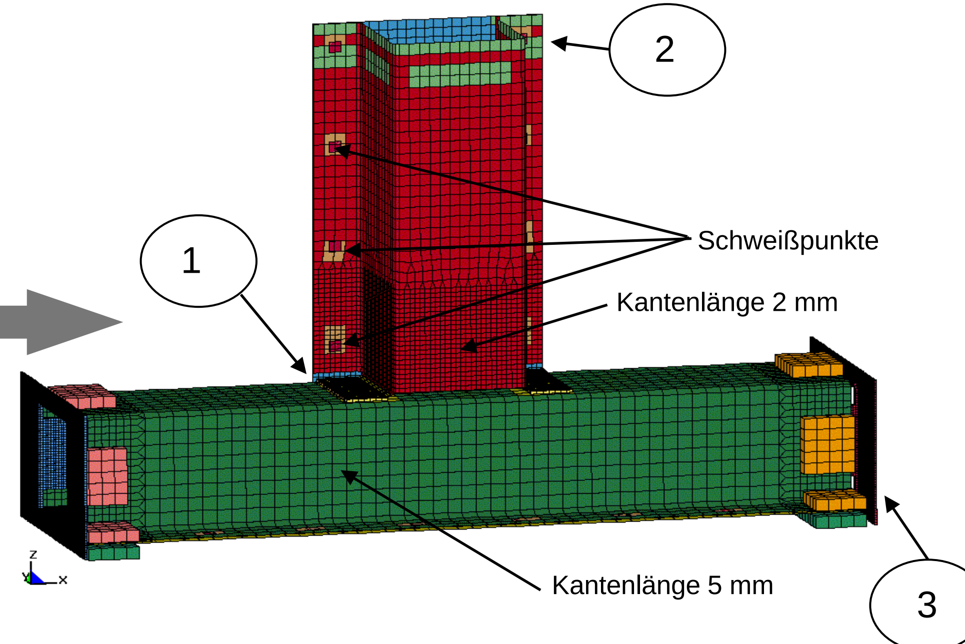


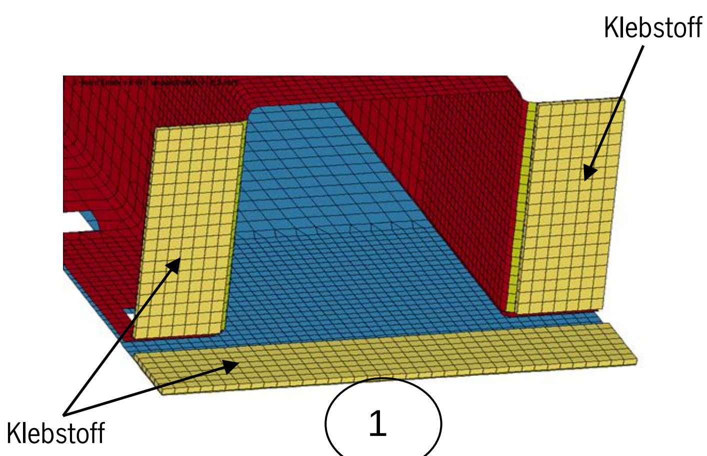
*) F. Burbulla: Kontinuumsmechanische und bruchmechanische Modelle für Werkstoffverbunde. Dissertationsschrift, Disputation 16.07.2013, Fachbereich Maschinenbau, Universität Kassel

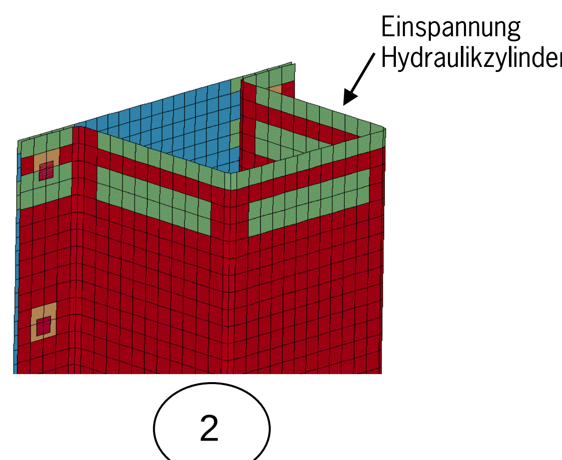
Validierung am T-Stoß* (quasistatisch)

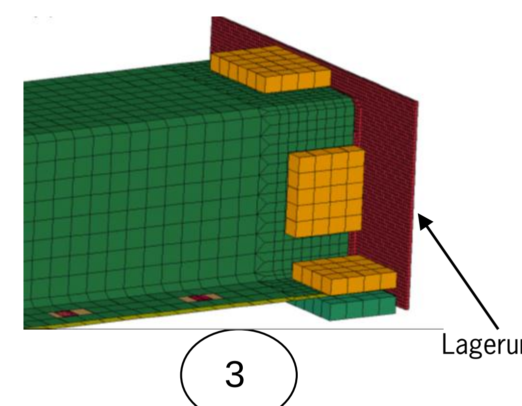


Modell-
bildung



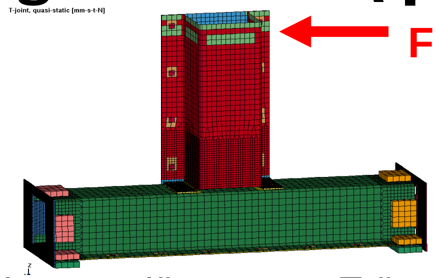


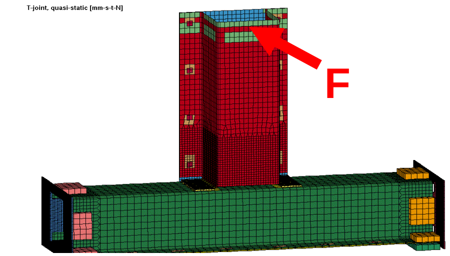




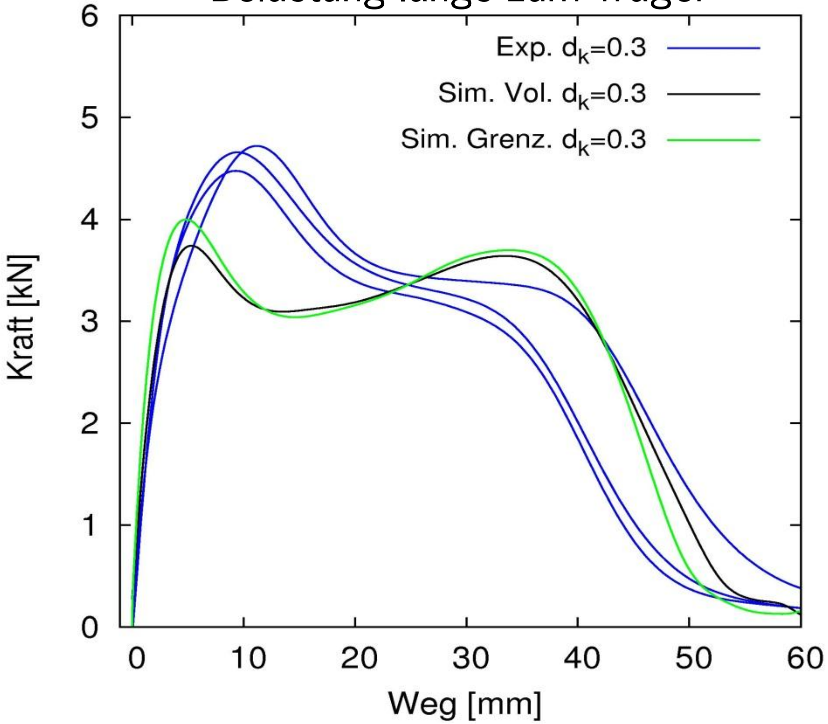
*) O. Hahn, M. Wißling, LWF, Universität Paderborn, Forschungsbericht zu P676, FOSTA, 2007

Validierung am T-Stoß* (quasistatisch)

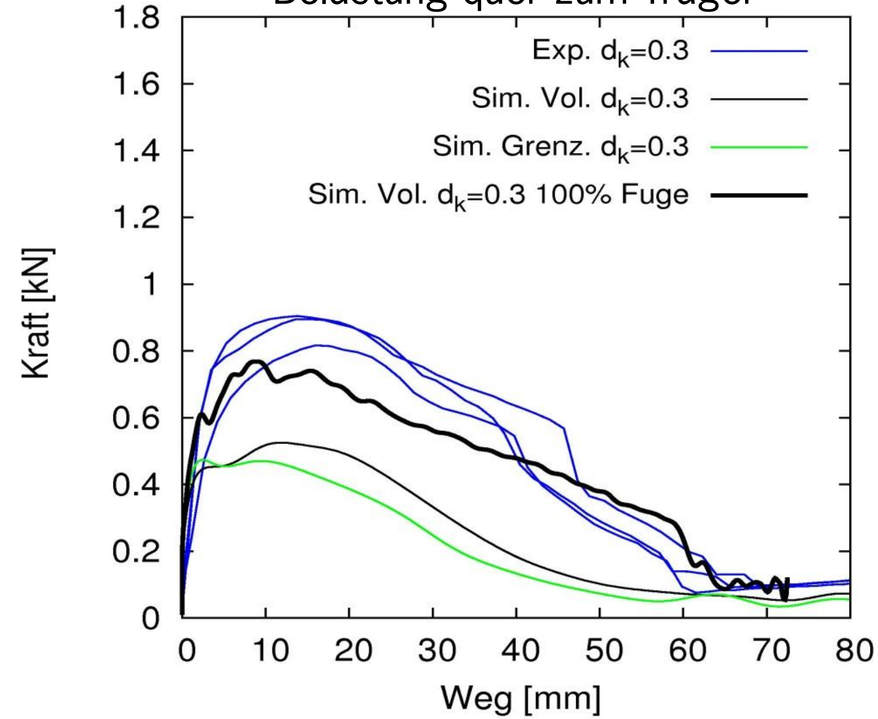




Belastung längs zum Träger



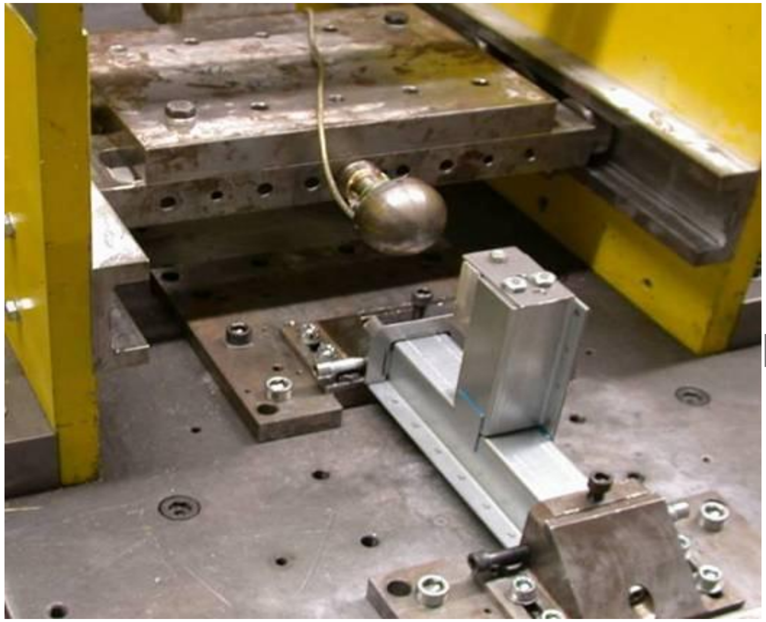
Belastung quer zum Träger



*) A. Matzenmiller, F. Burbulla,: Kontinuumsmechanische Modellierung von Stahlblechklebverbindungen für die FE-Crashanalyse, 7. LS-DYNA Anwenderforum, Bamberg, 2008

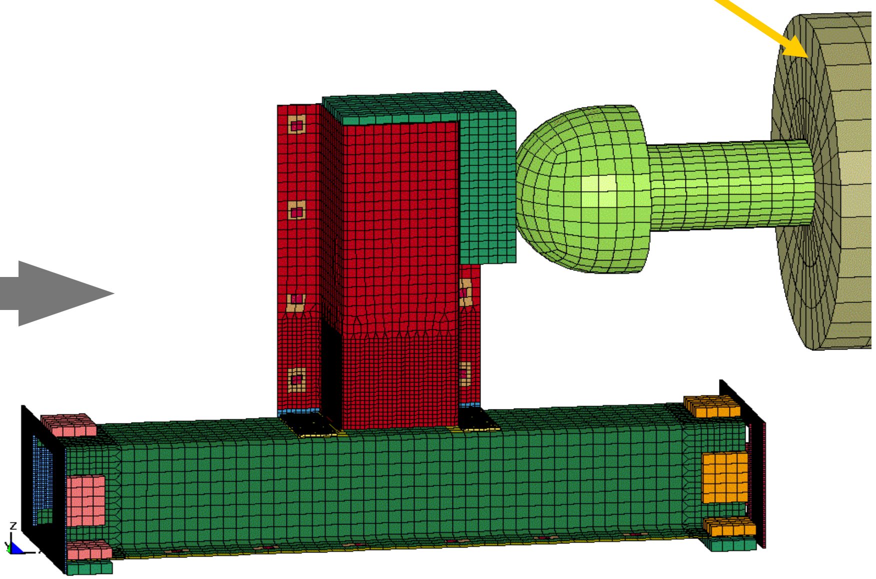
Validierung am T-Stoß* (dynamisch)

Anfangsgeschwindigkeit Schlitten v=2.5 m/s



Modell-

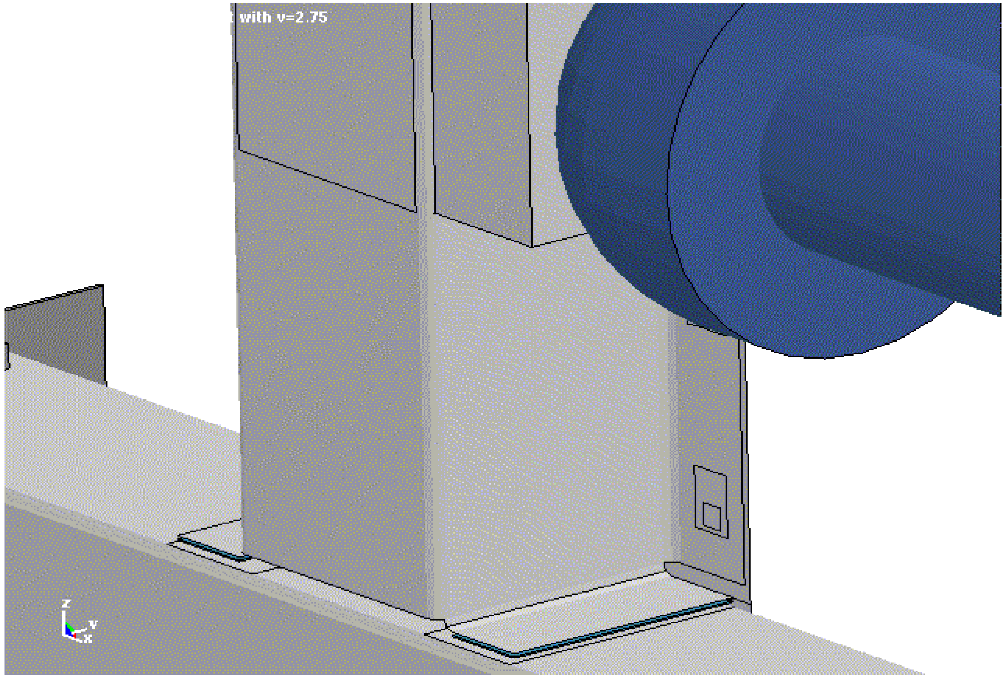
bildung



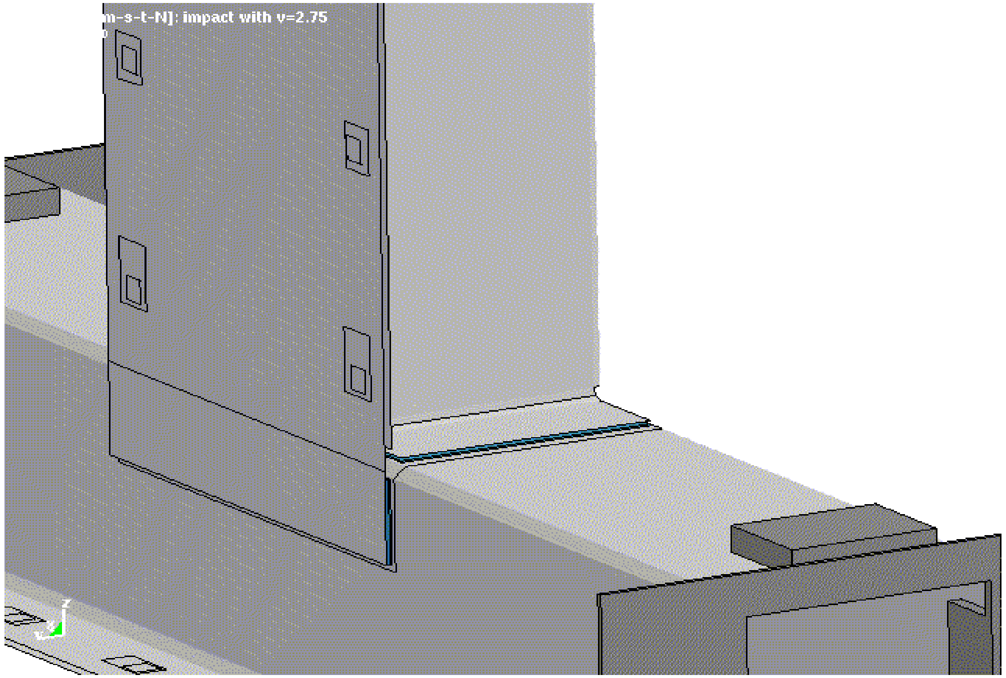
*) O. Hahn, M. Wißling, LWF, Universität Paderborn, Forschungsbericht zu P676, FOSTA, 2007

Validierung am T-Stoß (dynamisch)

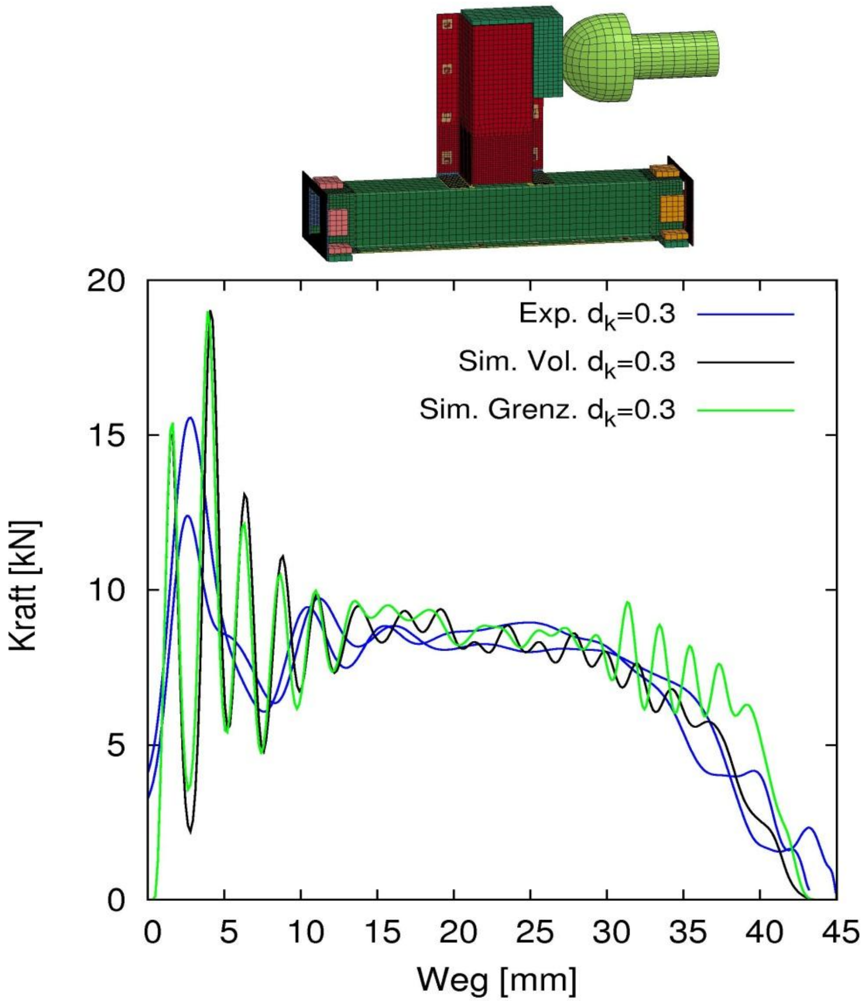
Vorderseite T-Stoß:

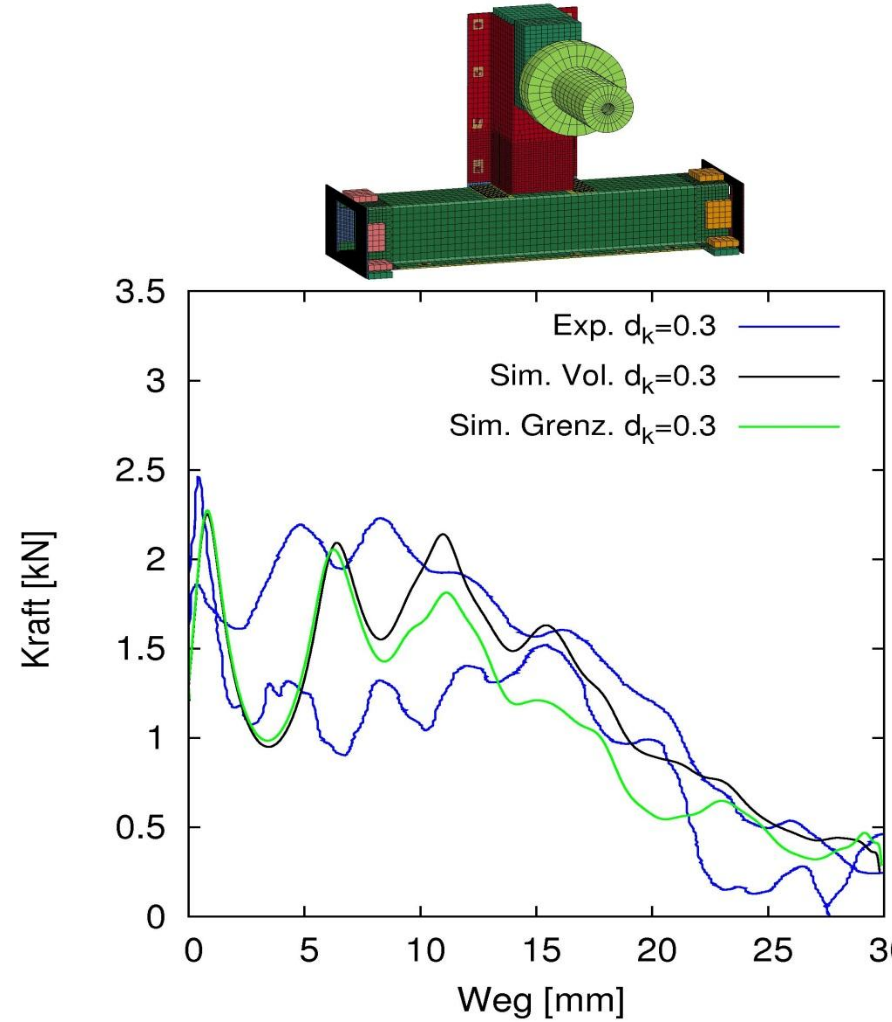


Rückseite:



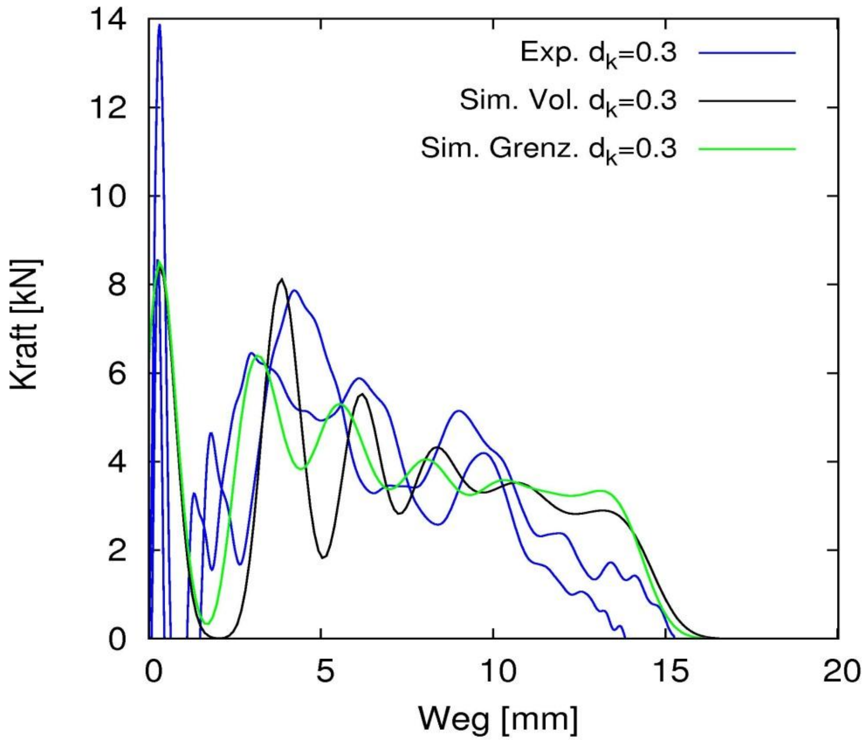
Validierung am T-Stoß* (dynamisch)



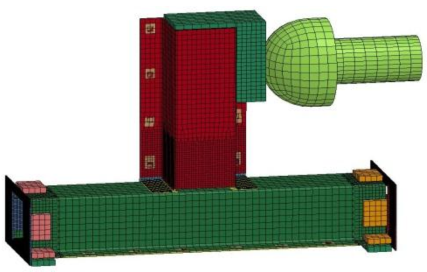


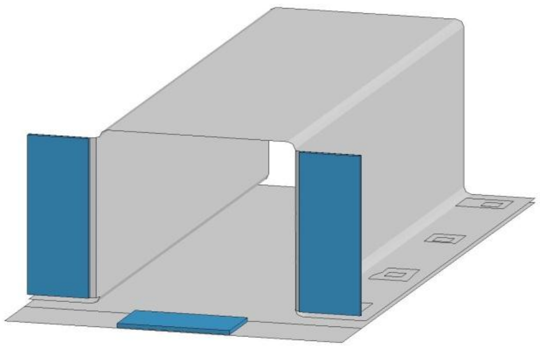
*) A. Matzenmiller, F. Burbulla,: Kontinuumsmechanische Modellierung von Stahlblechklebverbindungen für die FE-Crashanalyse, 7. LS-DYNA Anwenderforum, Bamberg, 2008

Validierung am T-Stoß* (dynamisch)



Belastung längs zum Träger mit verkürzter Klebung





*) A. Matzenmiller, F. Burbulla,: Kontinuumsmechanische Modellierung von Stahlblechklebverbindungen für die FE-Crashanalyse, 7. LS-DYNA Anwenderforum, Bamberg, 2008

Zusammenfassung

- TAPO-Modell erfasst die grundlegenden phänomenologischen Materialeigenschaften des duktil modifizierten Klebstoffs.

- Effiziente Parameteridentifikation an Grundversuchen mittels Optimierungsprogramm LS-OPT.

- Rechenzeiteffiziente Schnittstelle zwischen dem räumlichen Kontinuumsmodell (TAPO) und dem Grenzschichtelement.

- Erfolgreiche Validierung der Modelle mit statischen und dynamischen Versuchen.
- Klebschichtdicke und Fugenfüllung sind als Hauptstörgrößen identifiziert.

- Die Implementierung des TAPO-Konstitutivmodells sowie der Schnittstelle erfolgt in das FE-Programm LS-DYNA:
 ***MAT_TOUGHENED_ADHESIVE_POLYMER** bzw. ***MAT_252**
 ***MAT_ADD_COHESIVE**
- Die Formulierung ***MAT_ADD_COHESIVE** kann in Verbindung mit Solidmaterialien (***MAT_1, 3, 4, 6, 15, 24, 41-50, 81, 82, 89, 96, 98, 103, 104, 105, 106, 107, 115, 120, 123, 124, 141, 168, 173, 187, 188, 193, 224, 225, 252, 255)** genutzt werden.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Danksagung:

Das Projekt wird aus Haushaltsmitteln des
Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie
über die
Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AIF)
im Rahmen des Programms
„Zukunftstechnologien für kleine und mittlere Unternehmen“ (ZUTECH)
im Auftrag der
„Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.“ (FOSTA)
gefördert.