Verbesserte Crashsimulation von LFT-Bauteilen durch Berücksichtigung der Faserorientierungsverteilungen aus der Prozesssimulation

Lukas Schulenberg*, Jörg Lienhard

Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik IWM, Freiburg

Thomas Seelig

Institut für Mechanik (IfM), KIT Karlsruhe

Kooperationspartner

© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

Inhalt

- Einführung & Motivation
- Faserorientierungsverteilung in tensorieller Form
- Materialmodell (UMAT) mit Berücksichtigung der Faserorientierungsverteilung
- Simulation positionsabhängiger Zugversuche
- Anpassung eines isotropen Materialmodells
- Simulation von Probenversuchen in Abhängigkeit der Mehrachsigkeit und Dehnrate
- Simulation eines Bauteilversuchs
- Zusammenfassung

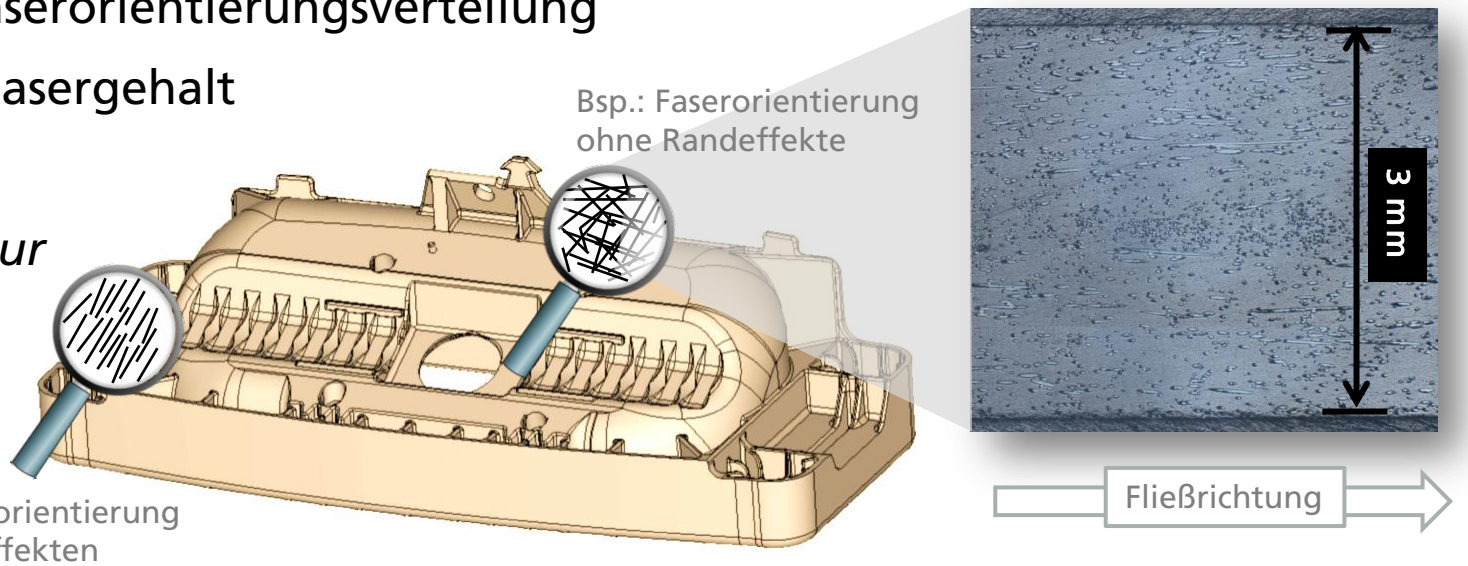
© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

Einführung & Motivation

- Spritzgegossener langfaserverstärkter Thermoplast (LFT)
  - Matrix: Polypropylen (E = 1 450 MPa, v=0.39)
  - Fasern: E-glas, 30 Gew.-% (E = 73 000 MPa, v=0.23)

  ⇨ Gewichtsgemittelte Faserlängen ca. 2 bis 3 mm

- Materialverhalten ist abhängig von ...
  - lokaler Faserorientierungsverteilung
  - lokalem Fasergehalt
  - Dehnrate
  - *Temperatur*



Ref.: Fa. Autoliv: Airbaggehäuse, Fa. SABIC: Werkstoffdaten

© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

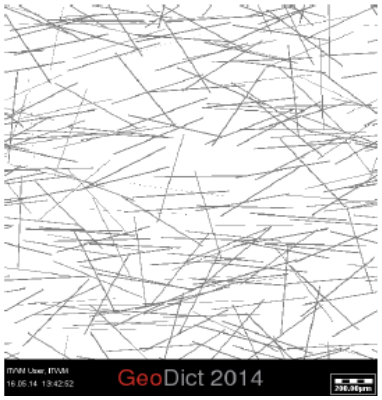
Fraunhofer IWM

Faserorientierungsverteilung in tensorieller Form

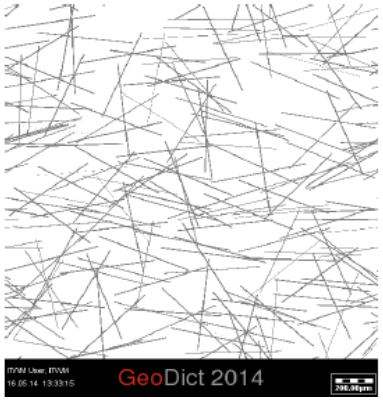
Bsp.: 2D-Faserorientierungen (12,9 Vol-%)

a_{ij}= (1.0 / 0.0 / 0.0)

a_{ij}= (0.9 / 0.1 / 0.0)



a_{ij}= (0.8 / 0.2 / 0.0)



a_{ij}= (0.7 / 0.3 / 0.0)

a_{ij}= (0.6 / 0.4 / 0.0)

a_{ij}= (0.5 / 0.5 / 0.0)

Ref.: Fraunhofer ITWM

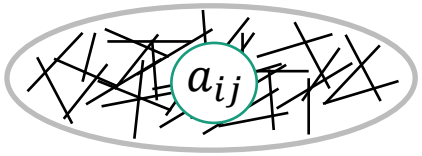
© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

Fraunhofer IWM

Materialmodell (UMAT): Elasto-plastisch
Faserorientierungsverteilung

Faserorientierungstensor

Elastizität



Plastizität

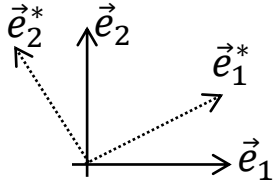
- Nach Advani & Tucker

$$\bar{C}_{ijkl} = f\,(C^{MT}_{ijkl}\,, a_{ij})$$

Orientierungs-gemittelter Steifigkeits-tensor

Mori-Tanaka Steifigkeits-tensor *(transv. isotrop)*

⇨ Berücksichtigung von Faserlänge, Faserorientierung & Faservolumengehalt

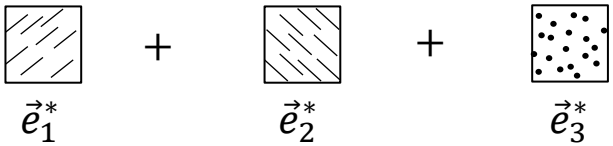


$$a_{ij} = \sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{3} a_{ij}\,\underline{\vec{e}_i \otimes \vec{e}_j}$$ *globales KOS*

$$= \sum_{i=1}^{3} a_i\,\underline{\vec{e}_i^{\,*} \otimes \vec{e}_i^{\,*}}$$ *Haupt-richtungen*

⇨ Eigenwerte a_i: $\sum_{i=1}^{3} a_i = 1\ ; a_i \in [0,1]$

- Hill-Plastizität (3 Richtungen):



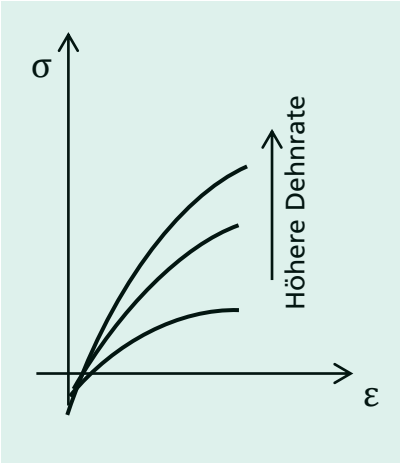
$$\boldsymbol{\sigma}_{ep} = \boldsymbol{\sigma}(\vec{e}_1^{\,*})a_1 + \boldsymbol{\sigma}(\vec{e}_2^{\,*})a_2 + \boldsymbol{\sigma}(\vec{e}_3^{\,*})a_3$$

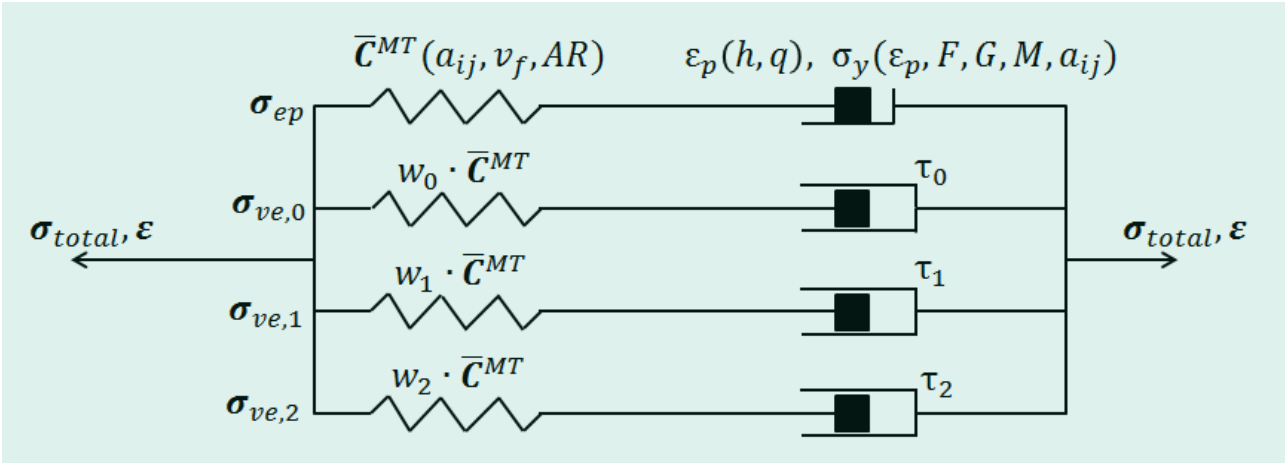
© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

Fraunhofer IWM

Materialmodell (UMAT): Visko-elasto-plastisch

Parallelschaltung der Teilmodelle





- Berechnung der visko-elasto-plastischen Spannung:

$$\boldsymbol{\sigma}_{total} = \boldsymbol{\sigma}_{ep} + \boldsymbol{\sigma}_{ve,0} + \boldsymbol{\sigma}_{ve,1} + \boldsymbol{\sigma}_{ve,2}$$

Plastizität		Visko-Elastizität	
Fließbedingung (Hill)	Verfestigung (Power-Law)	3 Maxwell-Elemente	
$\sigma_0 = 10MPa,\ F = 2.5,$ $G = 0.5,\ M = 1.5$	$h = 2$ $q = 0.23$	$\tau_0 = 10^5 s^{-1}$ $\tau_1 = 80 s^{-1}$ $\tau_2 = 1 s^{-1}$	$w_0 = 0.3$ $w_1 = 0.25$ $w_3 = 0.3$

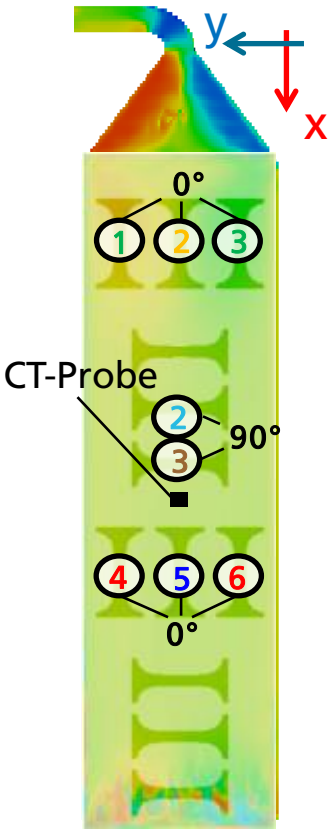
© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

Fraunhofer IWM

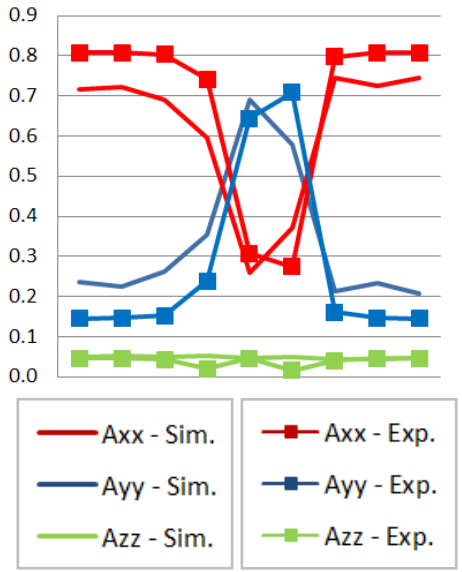
Simulation Zugversuche mit UMAT

Positionen abhängig von Faserorientierungsverteilung

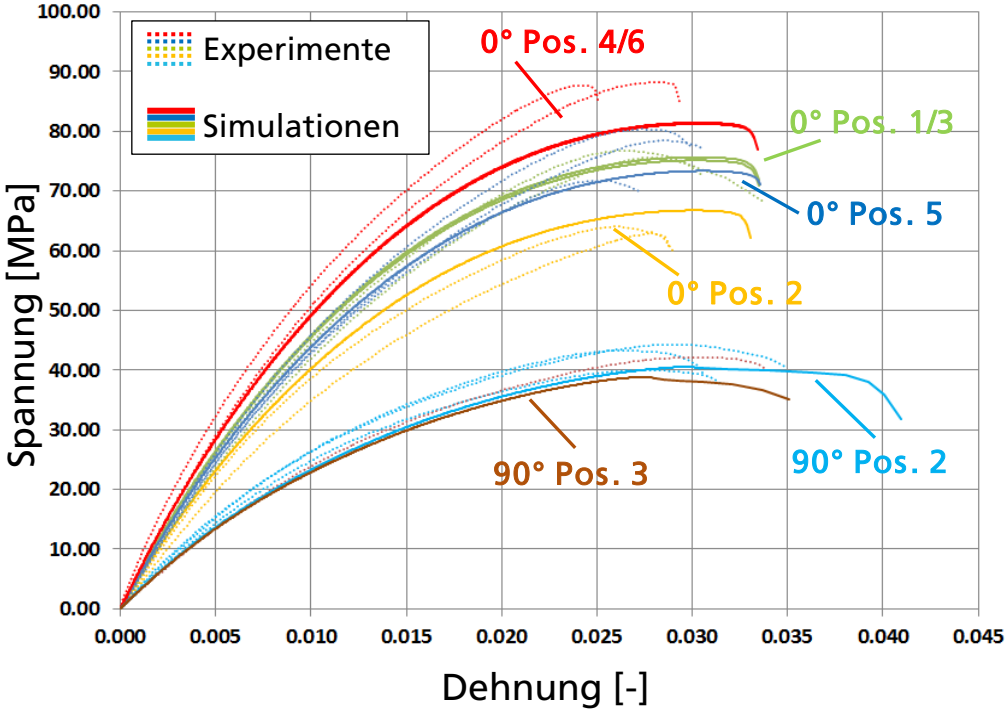
Spritzgusssimulation der Probenplatte



Validierung simulierter Faserorientierungen



FEM-Simulation gemappter Zugproben



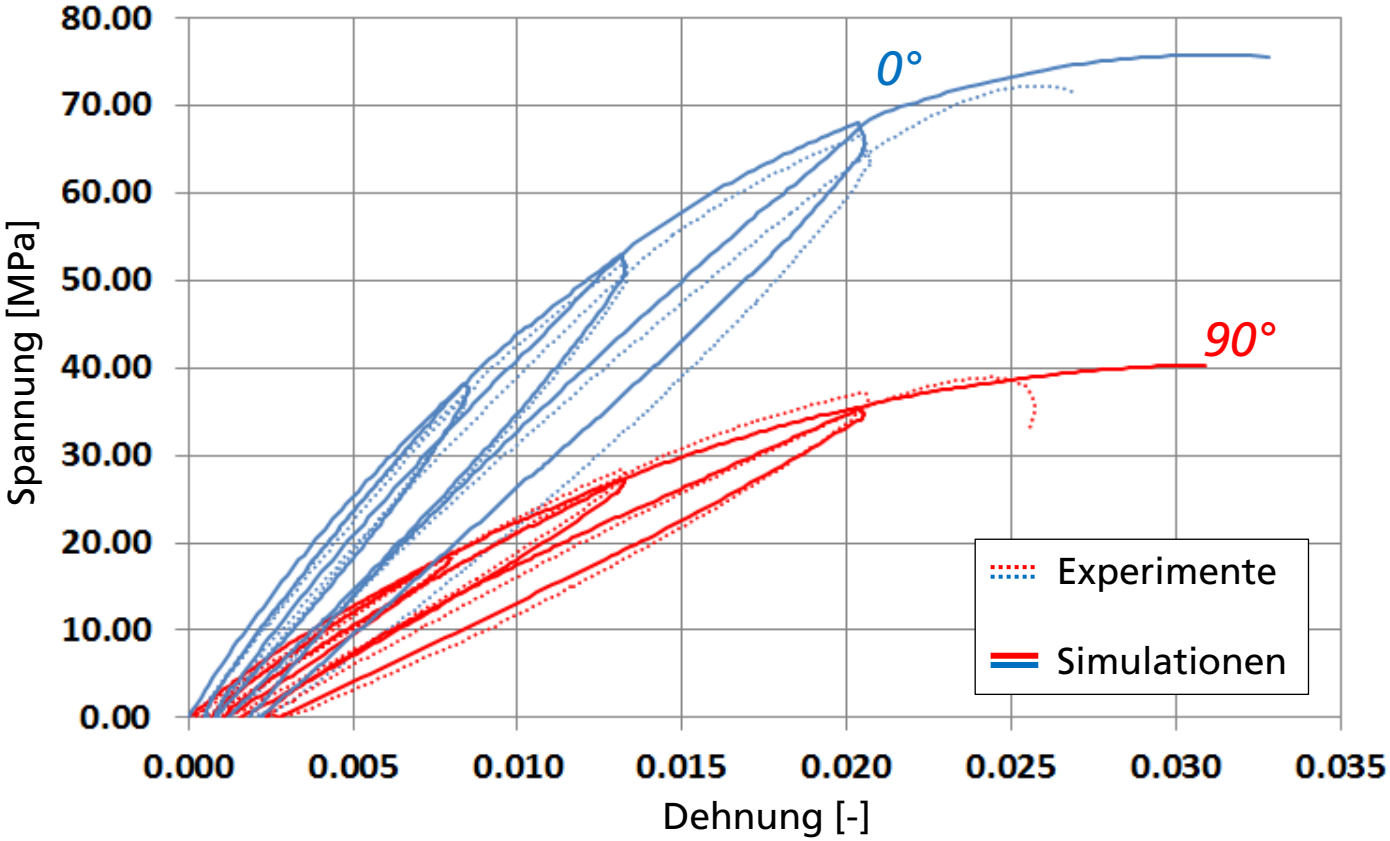
Ref.: Fraunhofer ITWM: Spritzgusssimulation

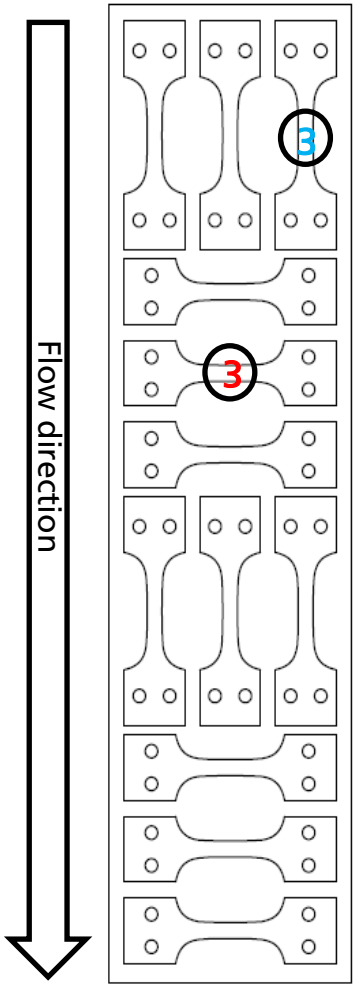
© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

Fraunhofer IWM

Simulation Zugversuche mit UMAT

Be- und Entlastungsversuch





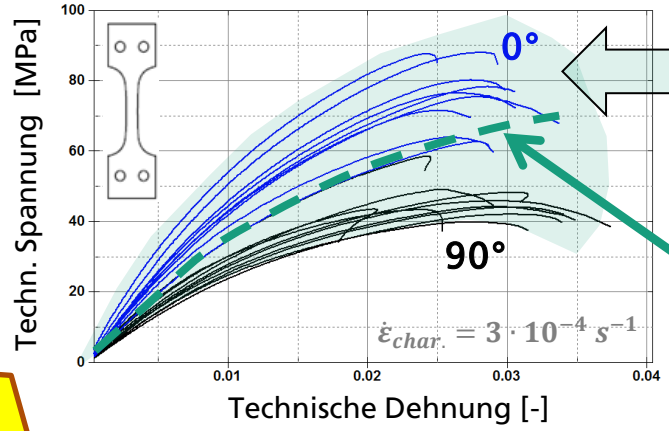
© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

Fraunhofer IWM

Anpassung eines isotropen Modells (MAT_024+GISSMO)

Mittelung von E-Modul & Verfestigung

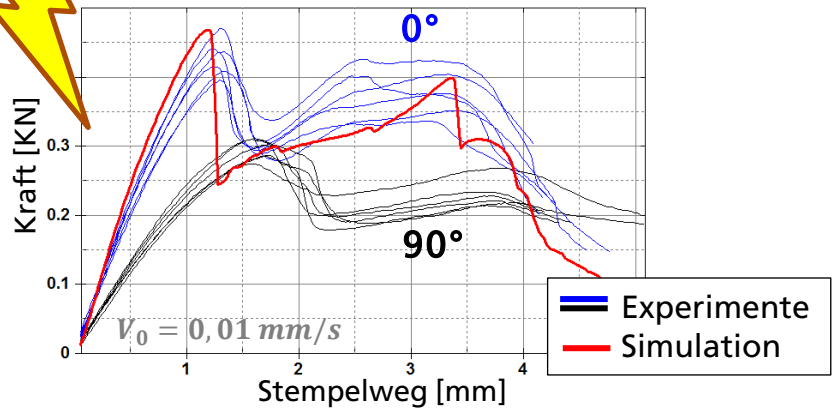
- <u>Möglichkeit 1:</u> Arithmetischer Mittelwert zwischen min./max.-Zugversuch

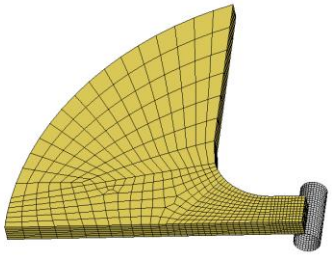


Bereich der quasi-statischen Versuche aller Positionen 0° & 90° zur Fließrichtung

Mittelung der höchsten und niedrigsten Festigkeit

Festigkeit des Werkstoffes wird überschätzt *(Bsp. taillierter Durchstoßversuch)*





FEM-Modell Viertelsymmetrie

© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

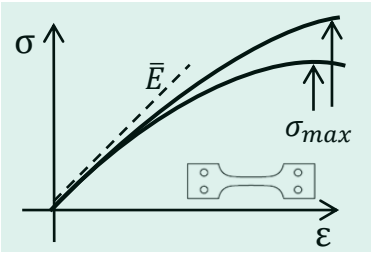
Fraunhofer IWM

Anpassung eines isotropen Modells (MAT_024+GISSMO)

Mittelung von E-Modul & Verfestigung

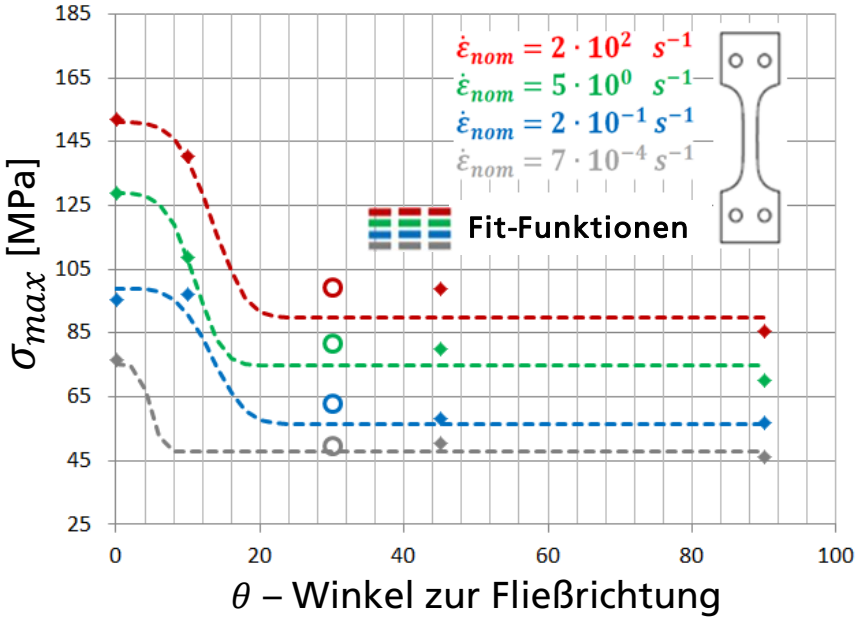
- <u>Möglichkeit 2:</u> Integraler Mittelwert über Orientierungen
- E-Modul aus quasi-statischen Versuchen

$$\bar{E} = \frac{1}{90°} \int_{0°}^{90°} E(\theta) d\theta$$



- Mehrere dehnratenabhängige Verfestigungskurven
- Skalieren einer quasi-statischen Referenzkurve auf 3 höhere Spannungsniveaus

$$\bar{\sigma}_{max} = \frac{1}{90°} \int_{0°}^{90°} \sigma_{max}(\theta) d\theta$$



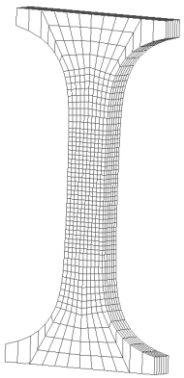
© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

Fraunhofer IWM

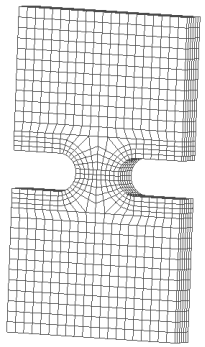
Simulation der Probenversuche - UMAT vs. MAT_024

FEM-Modelle (Solids)

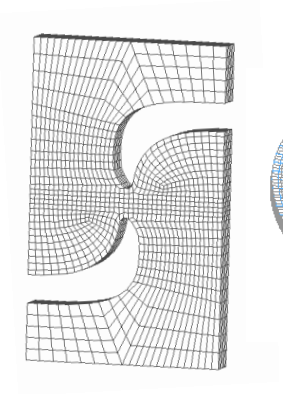
- Versuche unterschiedlicher Lastpfade/Spannungszustände
- 4 Verschiedene Dehnraten/Belastungsgeschwindigkeiten



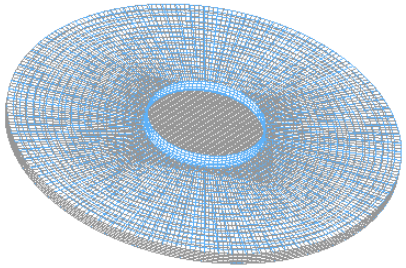
Flachzug



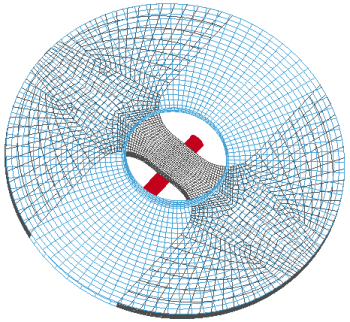
Kerbzug



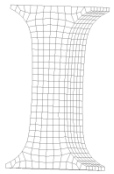
Scherzug



Durchstoß



Durchstoß (tailliert)



Druck

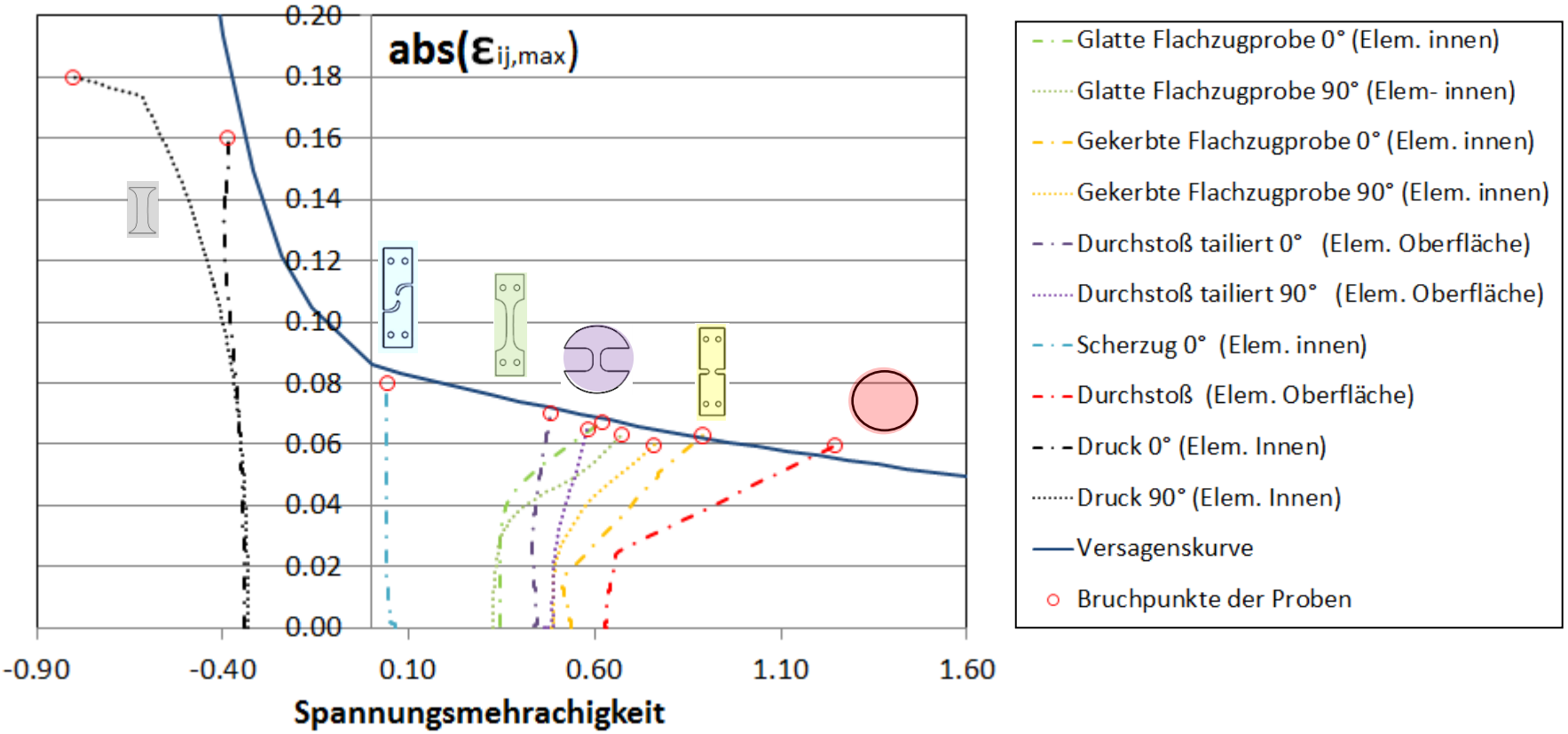
- Solid-Elemente (Hexaeder, Elementkantenlänge: 0,5 mm)

© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

Fraunhofer IWM

Versagensdehnung UMAT (anisotrop)

Versuche unterschiedlicher Spannungsmehrachsigkeiten



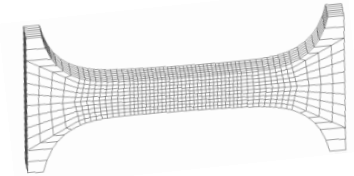
- Graph zeigt jeweils kritisches Element aus Simulation (Versagensbeginn)
- Isotropes Materialmodell (MAT_024+GISSMO) hat qualitativ gleiche Versagenskurve aber abhängig von effektiver plastischer Dehnung

© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

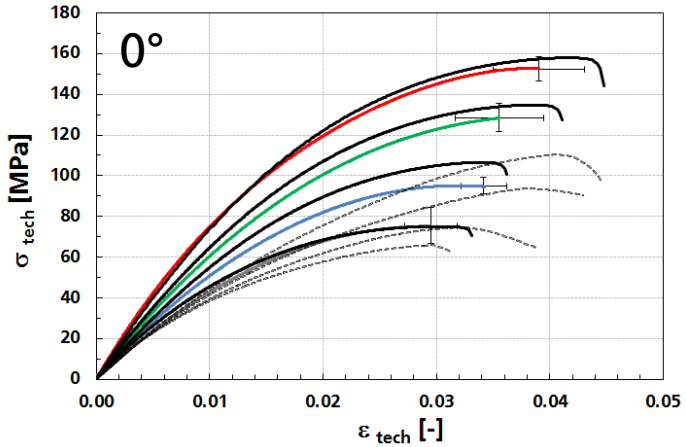
Fraunhofer IWM

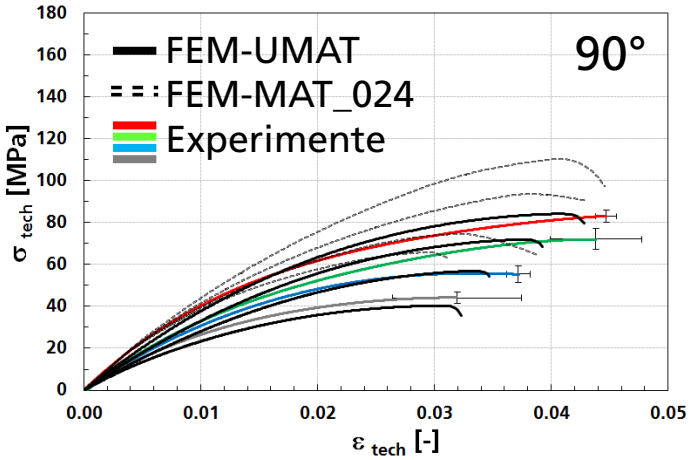
Simulation der Probenversuche

Zugversuche (dynamisch)

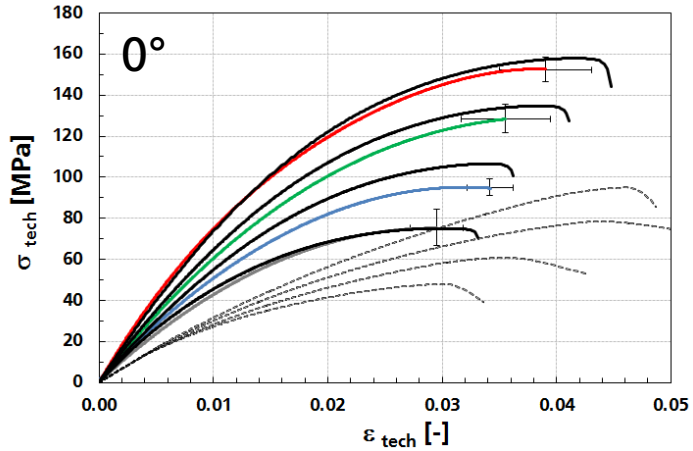


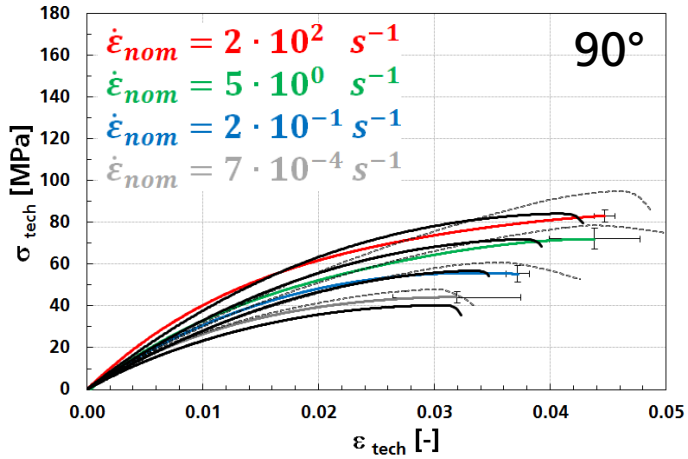
- Arithmetischer Mittelwert bei isotr. Materialmodell

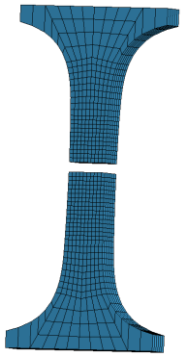




- Integraler Mittelwert bei isotr. Materialmodell





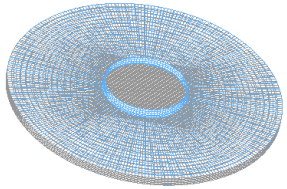


Ref.: J. Lienhard, Fraunhofer IWM: Dyn. Versuche

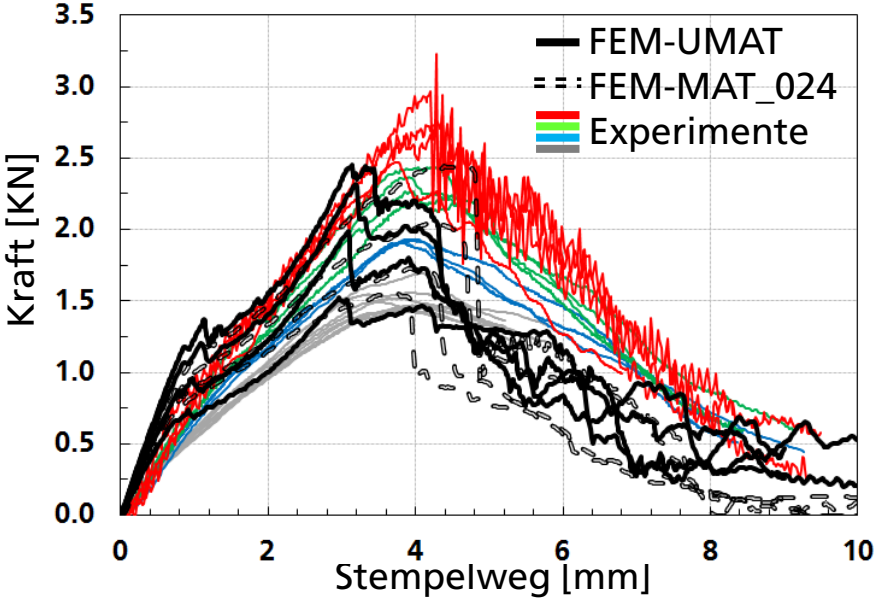
© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

Fraunhofer IWM

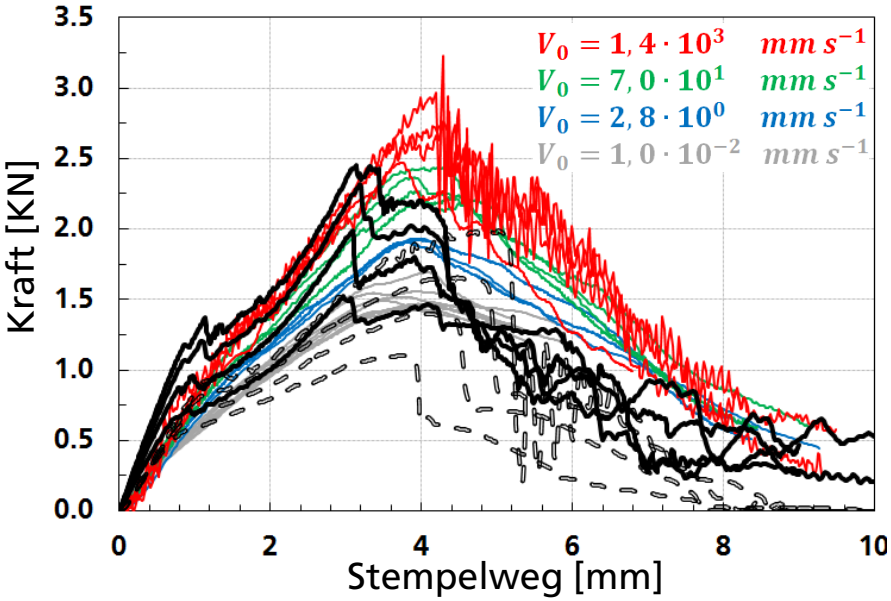
Simulation der Probenversuche
Durchstoßversuche (dynamisch)



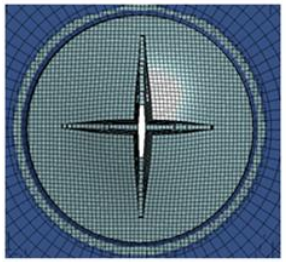
- Arithmetischer Mittelwert bei isotr. Materialmodell

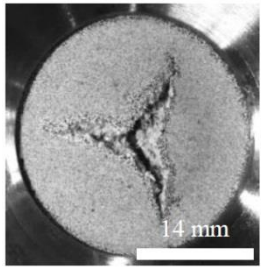


- Integraler Mittelwert bei isotr. Materialmodell



- Simulierte Kraft-Weg-Verläufe mit verbesserungspotential im Nachbruchverhalten
- Arithmetische Mittelung des isotrotropen Modells zeigte bessere Übereinstimmung





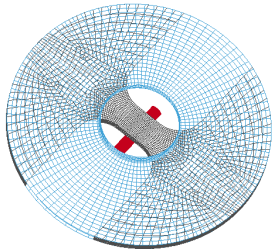
Ref.: J. Lienhard, Fraunhofer IWM: Dynamische Versuche

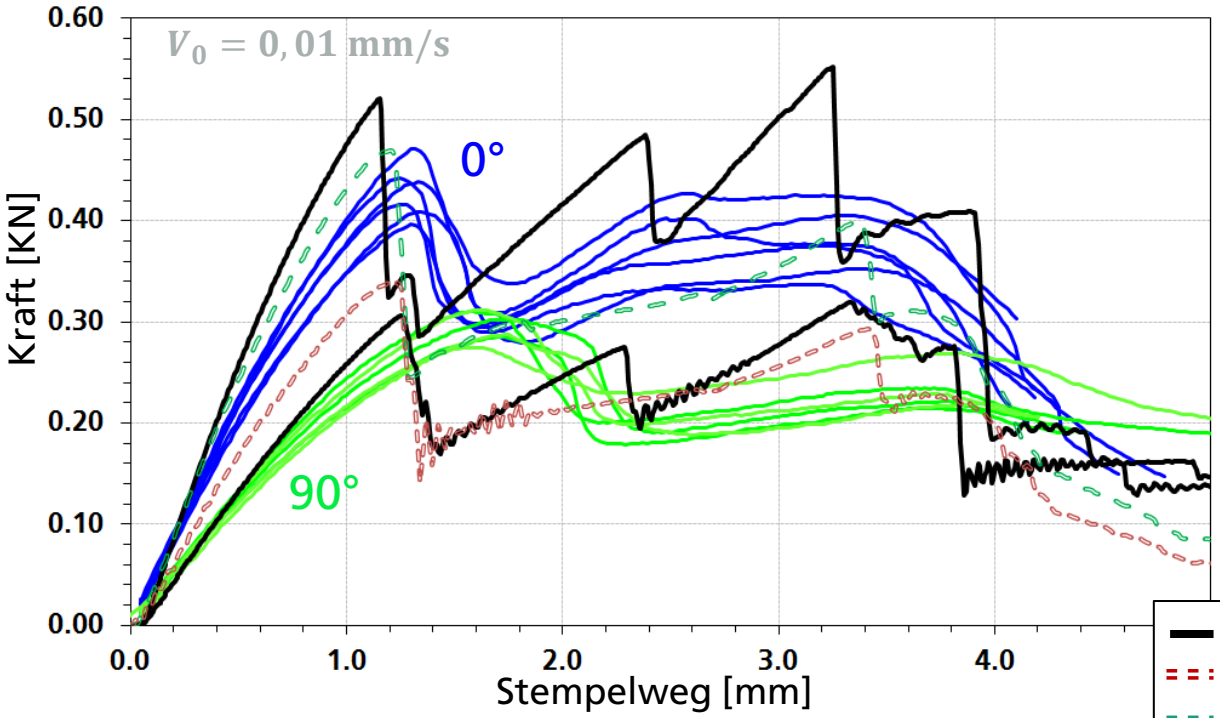
© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

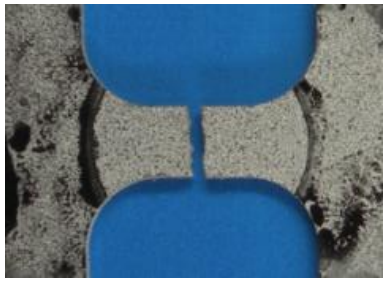
Fraunhofer IWM

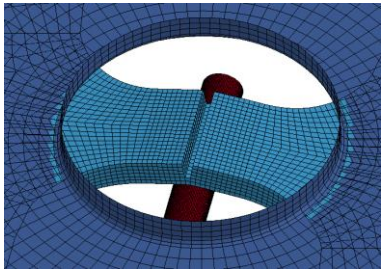
Simulation der Probenversuche

Durchstoßversuche tailliert (quasi-statisch)









- FEM-UMAT
- FEM-MAT_024 (integr. MW)
- FEM-MAT_024 (arithm. MW)
- Experimente

- UMAT zeigt gute Approximation der Anisotropie
- Isotropes Modell mit integralem Mittelwert liegt im Mittel der Versuche
- Arithmetischer Mittelwert überschätzt die Kraft bei isotr. Modell

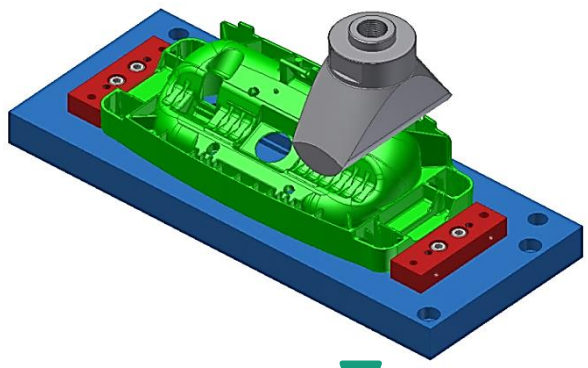
© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

Fraunhofer IWM

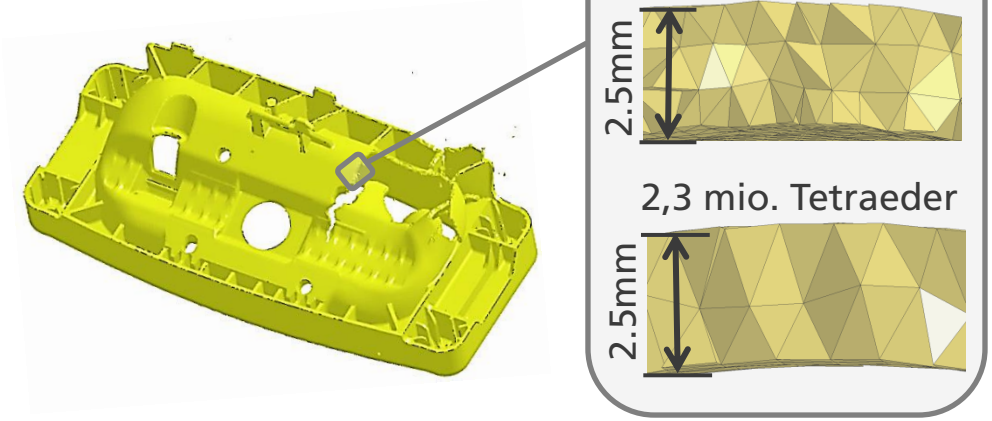
Simulation eines Bauteilversuchs

Prozesssimulation →Mapping → Crashsimulation

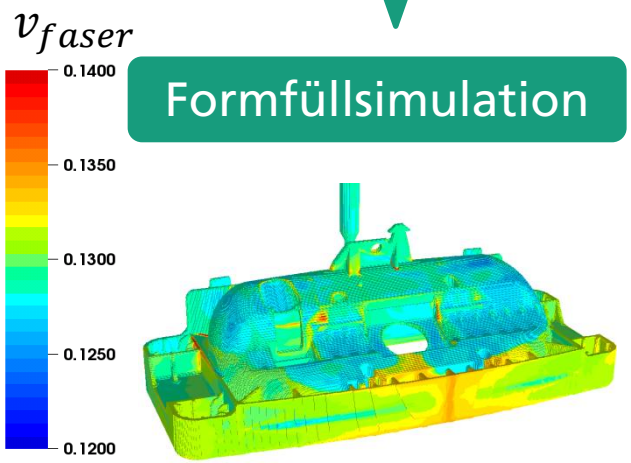
Versuchsaufbau: Airbaggehäuse



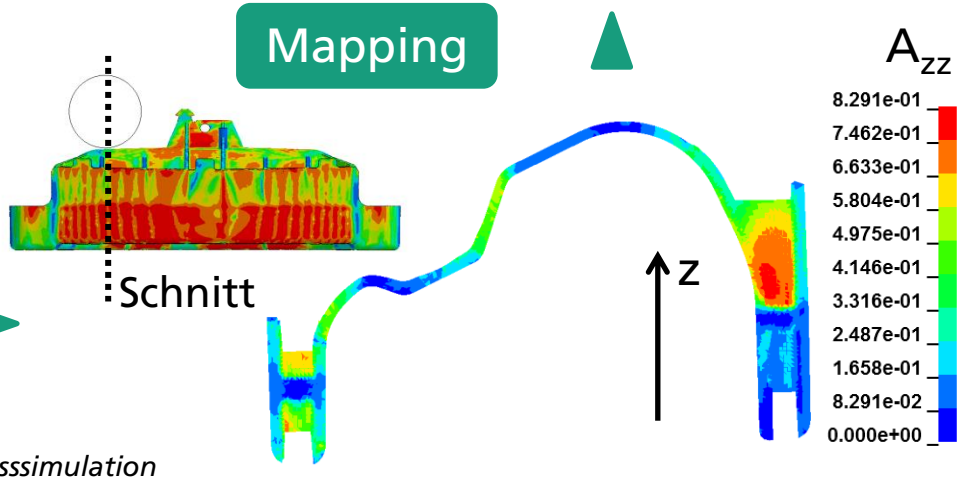
Crashsimulation



Formfüllsimulation



Mapping



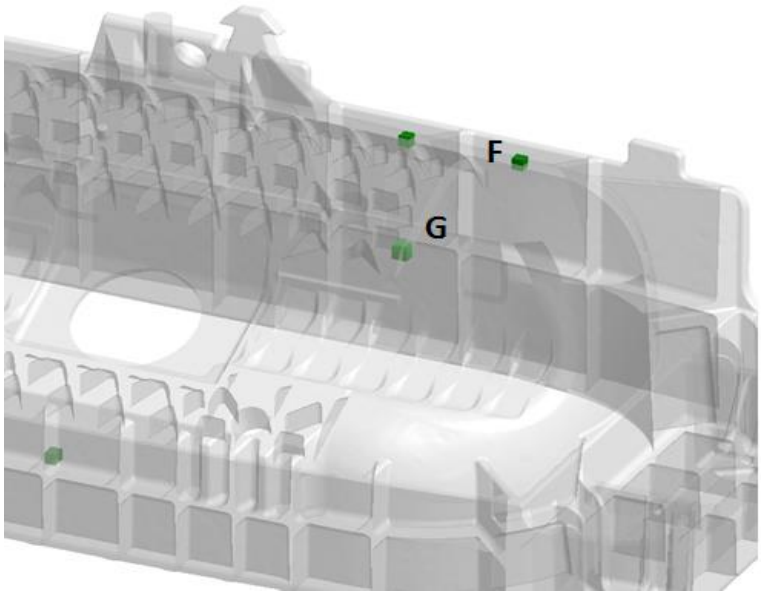
Ref.: Fa. Autoliv: Airbaggehäuse, Fraunhofer ITWM: Prozesssimulation

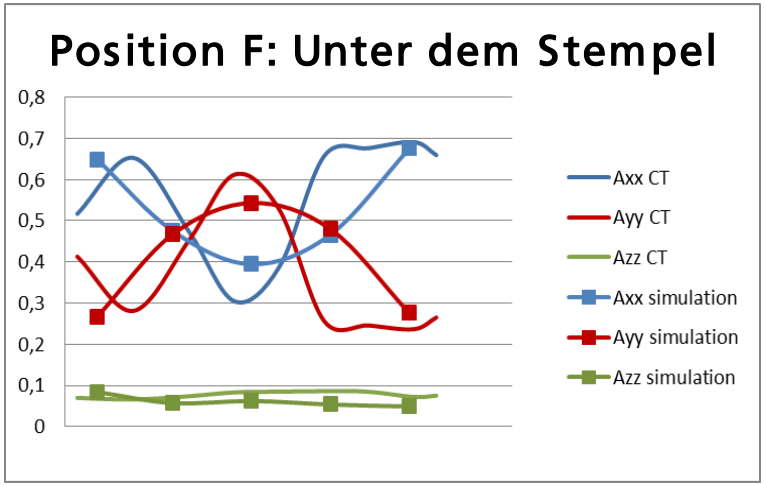
© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

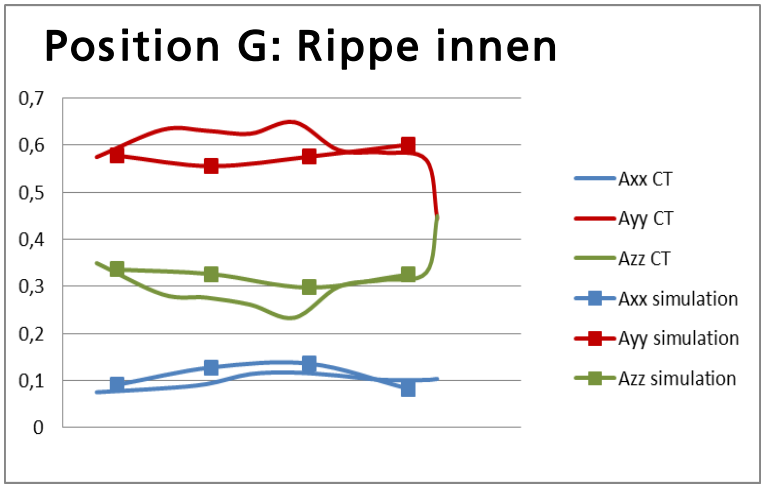
Fraunhofer IWM

Simulation eines Bauteilversuchs

Validierung der Faserorientierung aus Formfüllsimulation







- Prozesssimulation liefert gute Übereinstimmungen mit Faserorientierungen aus Computertomografie

Ref.: Fraunhofer ITWM

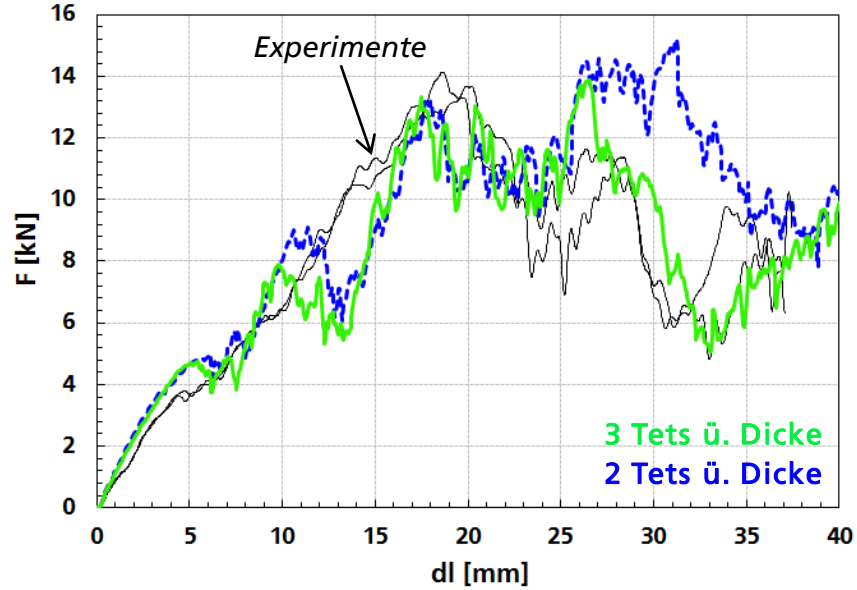
© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

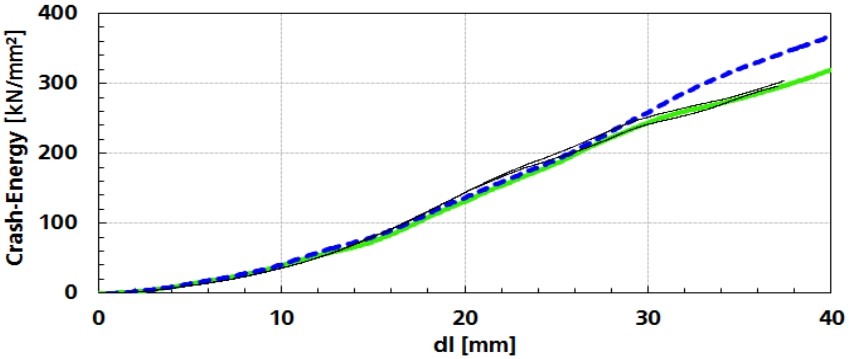
Fraunhofer IWM

Simulation eines Bauteilversuchs

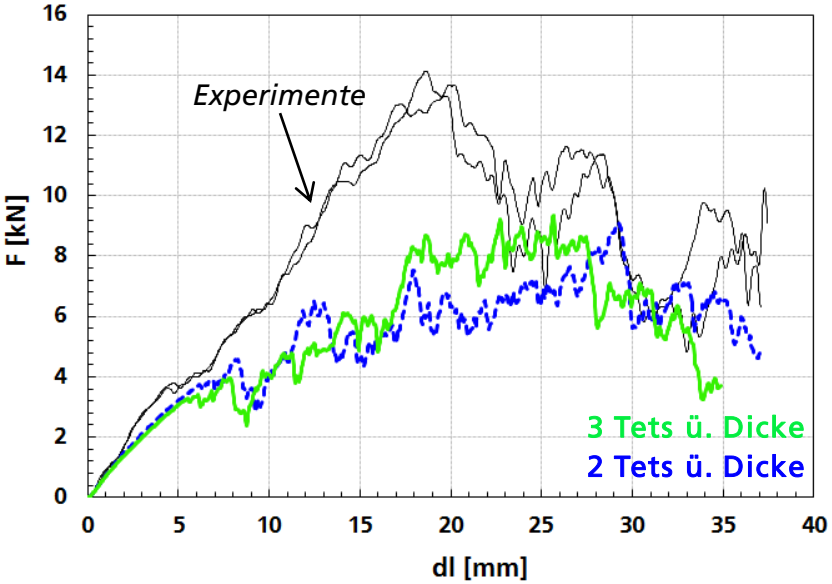
Validierung der Materialmodelle

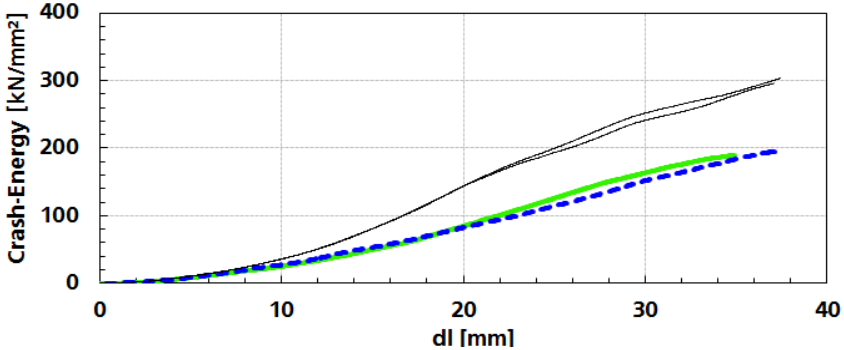
UMAT (anisotrop)





MAT_024+GISSMO
(integraler Mittelwert)



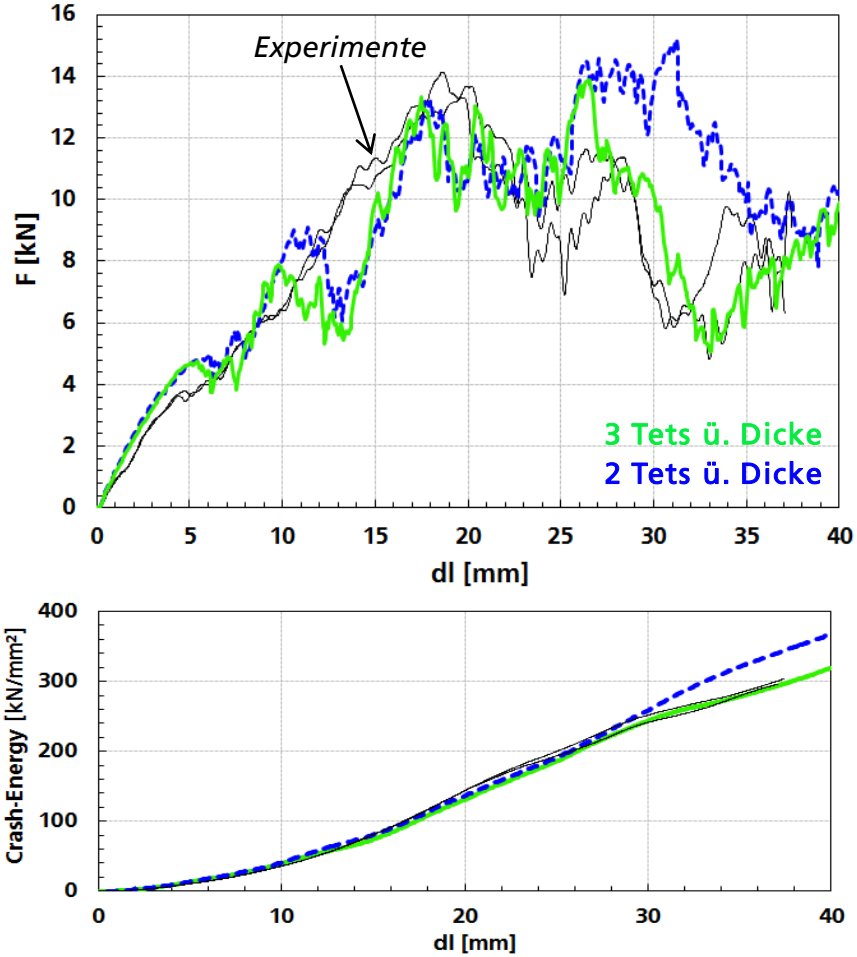


© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

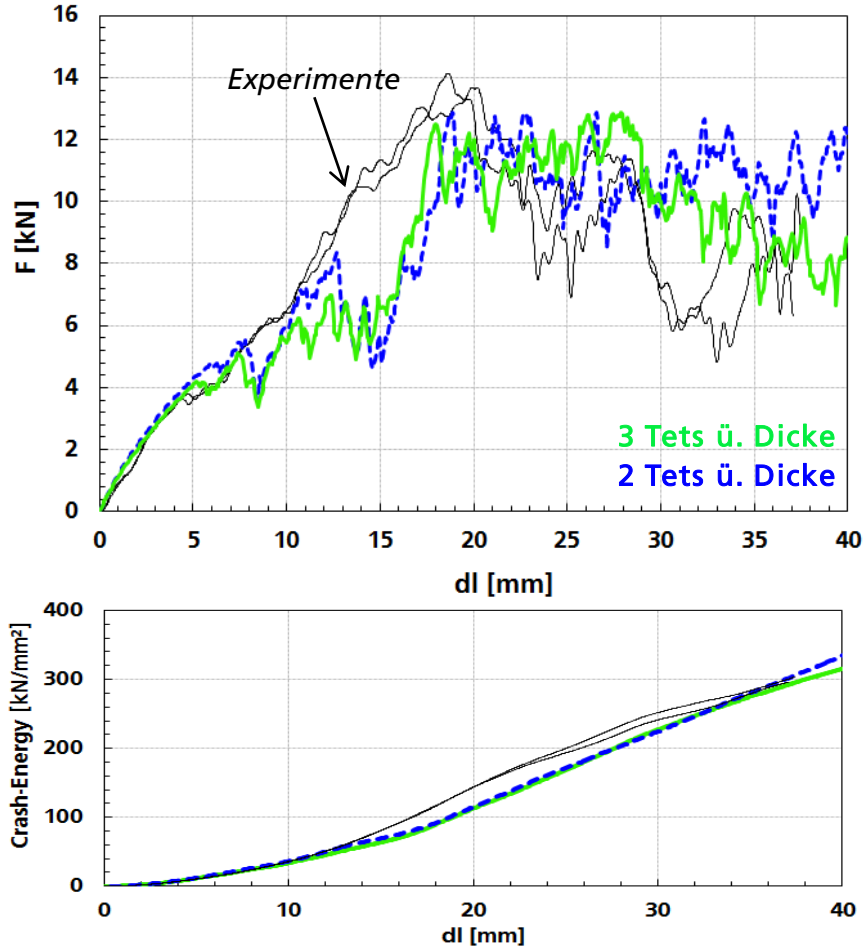
Fraunhofer IWM

Simulation eines Bauteilversuchs
Validierung der Materialmodelle

UMAT (anisotrop)



MAT_024+GISSMO
(arithmetischer Mittelwert)



© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

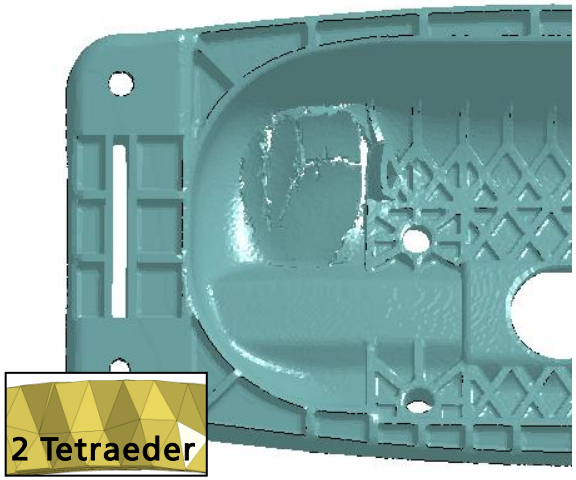
Fraunhofer IWM

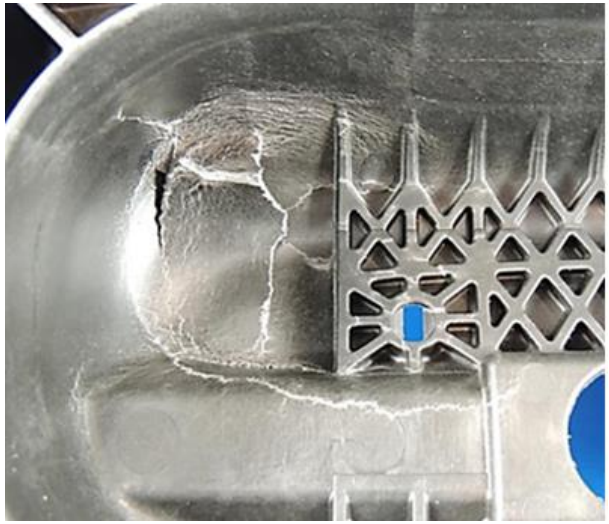
Simulation eines Bauteilversuchs

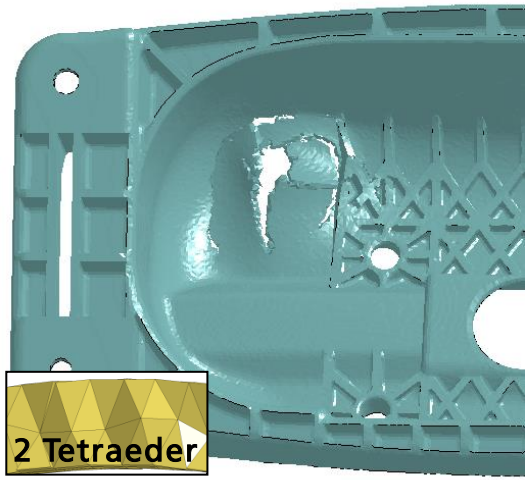
Validierung der Materialmodelle

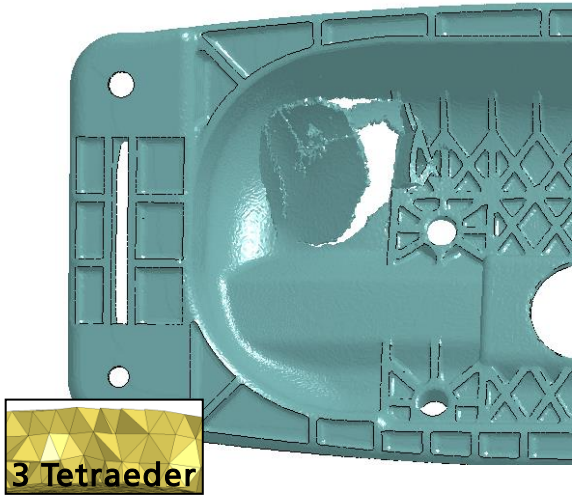
UMAT

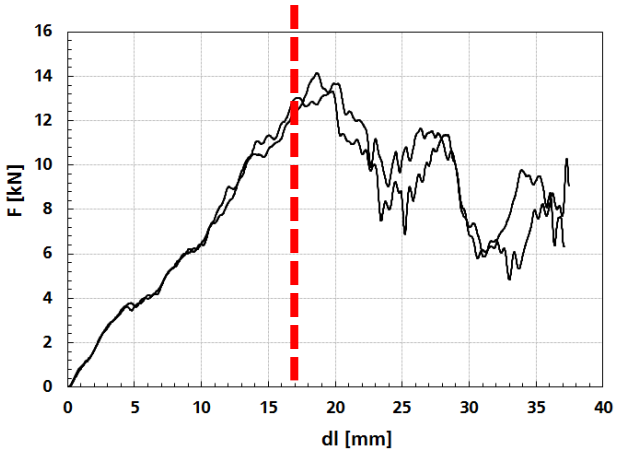
MAT_024+GISSMO
(arithmetischer Mittelwert)

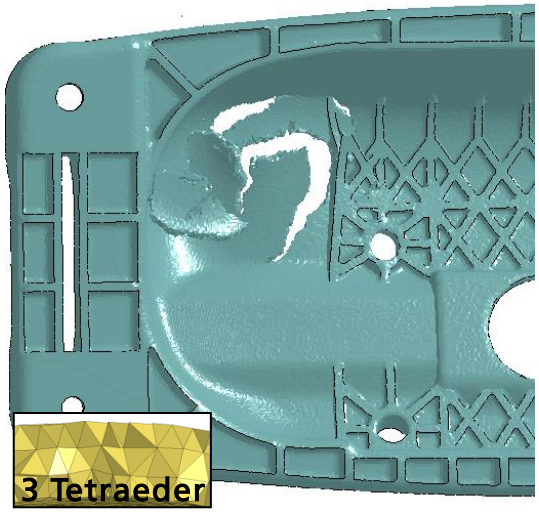












© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

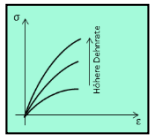
Fraunhofer IWM

Zusammenfassung

- Entwickeltes Materialmodell (UMAT)
  - Anisotroper Steifigkeitstensor (analyt. Homogenisierung)
  - Plastizität und Viskoelastizität in Abhängigkeit der Faserorientierung
  - Schädigung abhängig von Mehrachsigkeit (isotrop)

<u>Anisotropes USER-Modell</u>

+ Bessere Probensimulation wegen Anisotropie
+ Berücksichtigt visko-elastischer Effekte



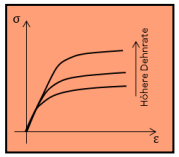
- Rechnet langsamer (optimierung möglich)
- Zeigt spröderes Versagens-verhalten

<u>Isotropes Modell (MAT024+GISSMO)</u>

+ Einfache Handhabung, geringer Aufwand, rechnet schnell
+ Rein qualitativ gutes Versagensverhalten
- Mittelung isotroper Größen (Lastfallabhängig)

$$\bar{E} = \frac{1}{90°}\int_{0°}^{90°} E(\theta)d\theta$$

- Dehnratenabhängigkeit im Zugversuch schlecht approximiert



© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

Fraunhofer IWM

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben IGF-Nr. 17334 N der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e. V. (FAT), Behrenstraße 35, 10117 Berlin wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

FAT | Forschungsvereinigung Automobiltechnik

© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

Fraunhofer IWM