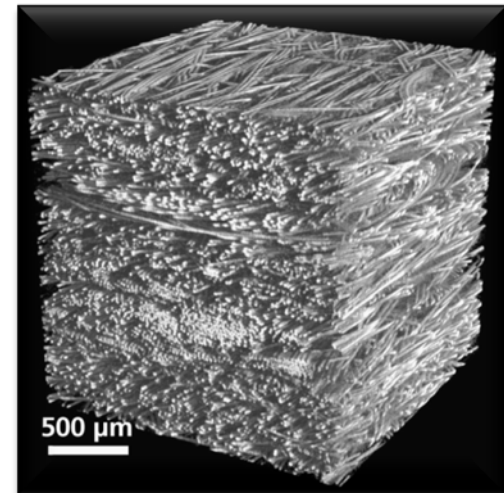


Integrale numerische Bewertung langfaserverstärkter Thermoplaste

Peter Gumbsch, Jörg Hohe

H. Paul, S. Fliegner, G. Falkinger, D.-Z. Sun, M. Luke

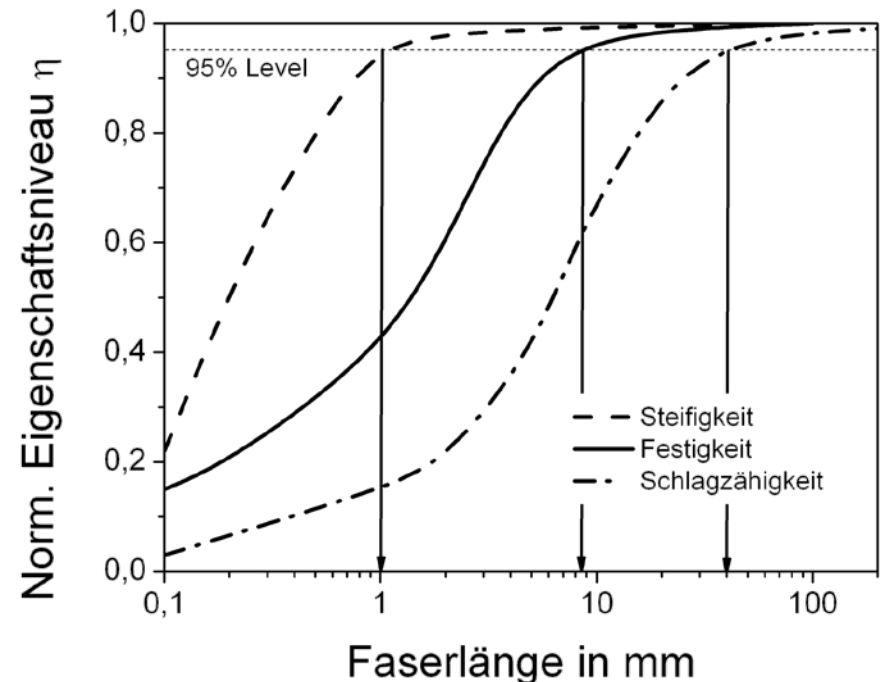
- Übersicht
- Langfaserverstärkte Thermoplaste
- Mikromechanik und Homogenisierung
- Makroskopische Materialmodelle
- Hybride Bauteile
- Bauteilbewertung
- Zusammenfassung und Zukunftsaspekte



Integrale numerische Bewertung von LFT-Werkstoffen

Langfaserverstärkte Thermoplaste

- Wirrfaserverbunde mit thermoplastischer Matrix
 - gegenüber Kurzfaserverbunden größere Faserlänge
 - dadurch deutlich höhere Steifigkeit und Festigkeit
 - aber: mit Verfahren analog zu Standardverfahren der Kunststoffverarbeitung zu verarbeiten
 - dadurch deutlich preisgünstiger als endlosfaserverstärkte Materialien
- großserienfähiger Leichtbau



Schijve, W.; *Plastic Additives & Compounding* (2000), 14–21.
Schemme, M.; *Kunststoffe* (2003), 106–109.

Integrale numerische Bewertung von LFT-Werkstoffen

Langfaserverstärkte Thermoplaste

■ Konstitutivmaterialien

■ Fasern

- Glas- und Kohlefasern
- Naturfasern (Hanf, Flachs, etc.)
- synthetische Polymerfasern (Aramid, Polyester, etc.)
- typische Länge: > 5 mm, ..., 25 mm

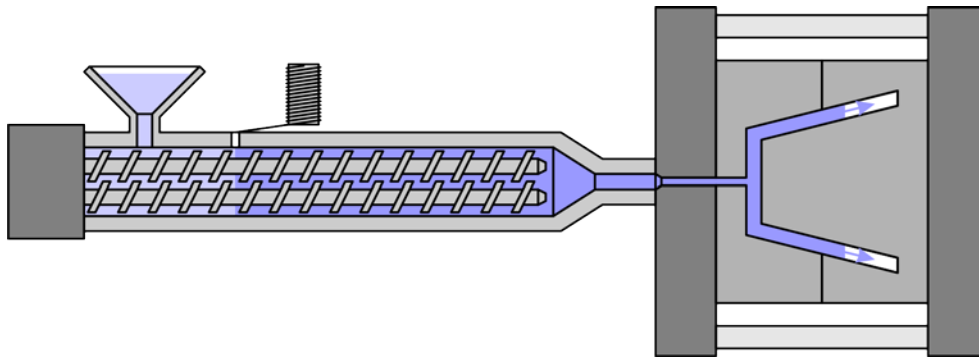
■ Matrix

- Polypropylen (PP), Polyethylen (PE)
- Polyamid (PA), Polyethylenterephthalat (PET)
- Polycarbonate (PC)
- verschiedene Blends
- je nach Verarbeitungsprozess auch weitere Polymere

Integrale numerische Bewertung von LFT-Werkstoffen

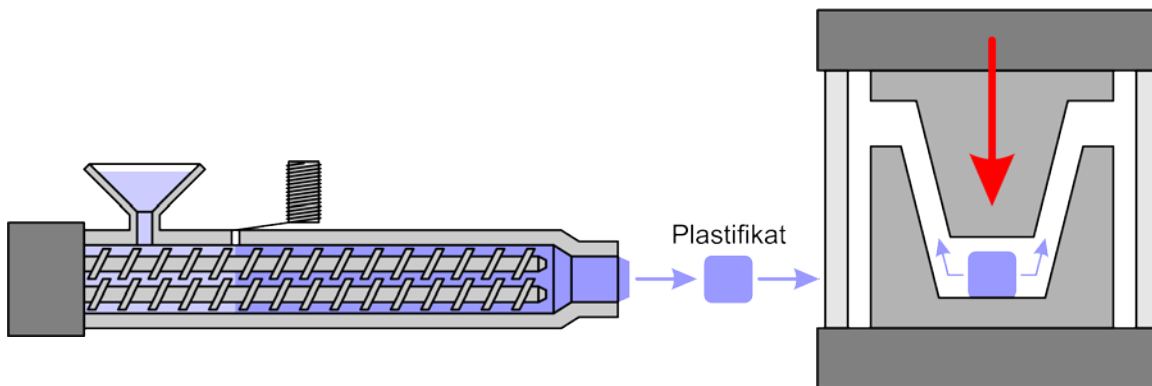
Langfaserverstärkte Thermoplaste – Verarbeitung

■ Verarbeitung im Spritzgießverfahren



Krauss-Maffei-Spritzgießcompounder
FhG-Pilotanlagenzentrum PAZ Schkopau

■ Direktverarbeitung im Fließpressverfahren



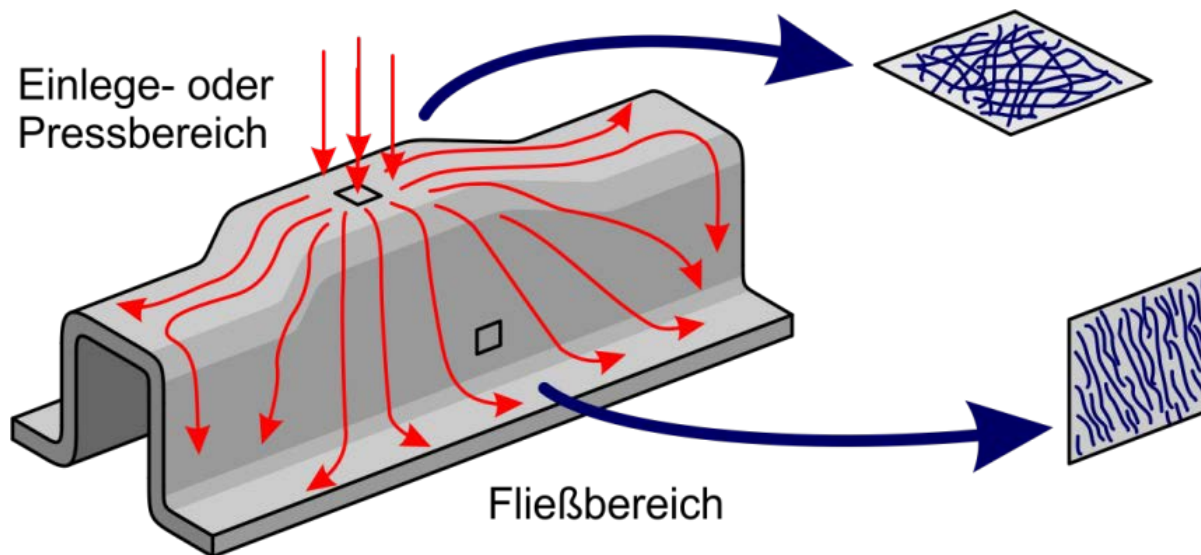
© Fraunhofer ICT

Integrale numerische Bewertung von LFT-Werkstoffen

Prozesseigenschaften

■ Spezifisches Problem bei der Bewertung von LFT-Bauteilen

- Material entsteht erst im Formgebungsprozess
- lokal stark variierende Eigenschaften
- Prozess und Bauteileigenschaften nicht entkoppelt zu bewerten



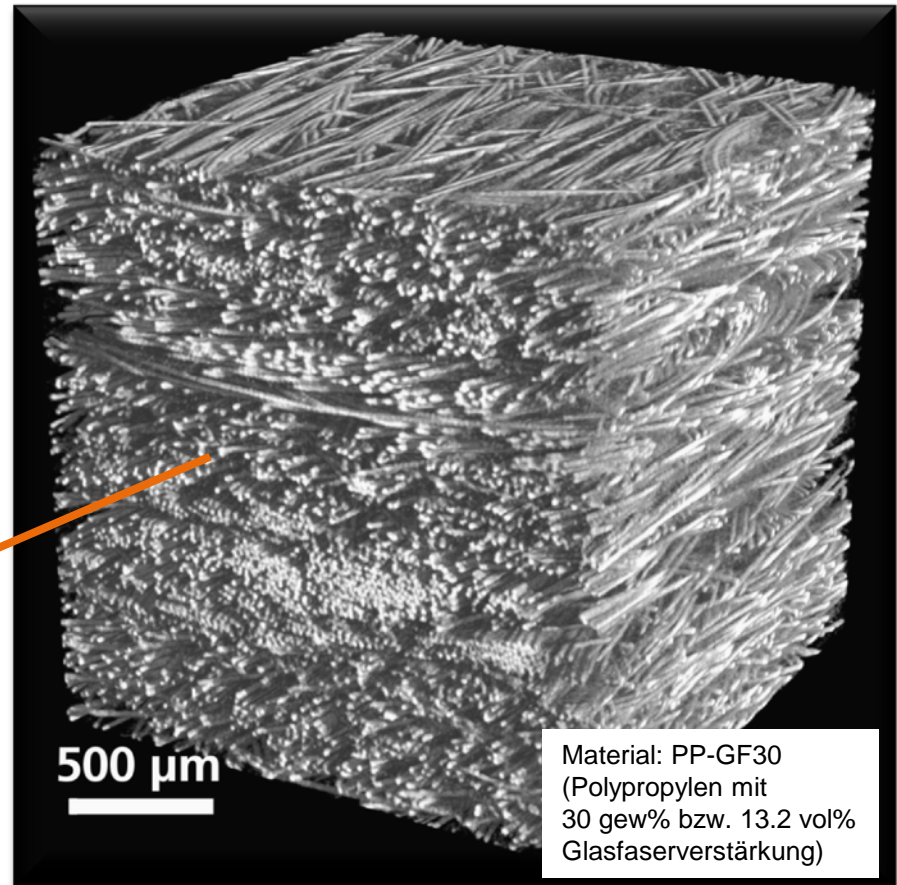
Integrale numerische Bewertung von LFT-Werkstoffen

Prozess und Eigenschaften

■ Beispiel: Fließbereich

→ Ausrichtung der Fasern in die Fließrichtung

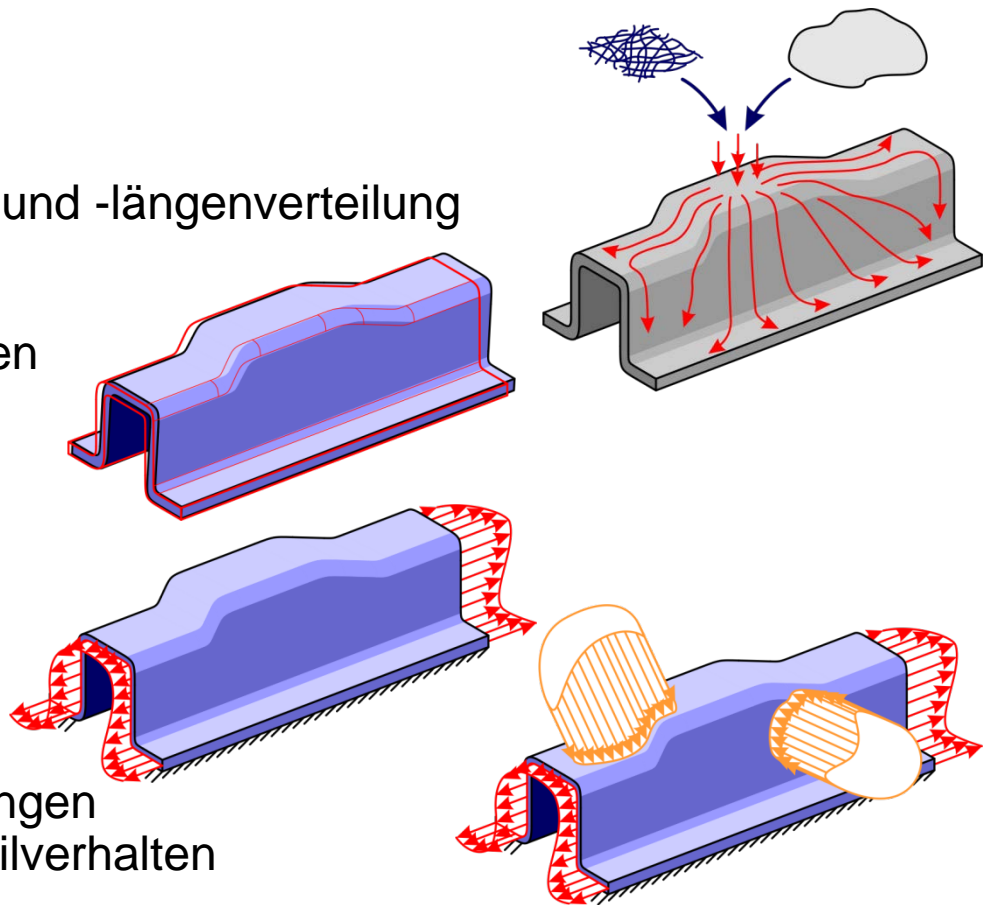
→ prozessbedingte, lokal variierende Materialeigenschaften



Integrale numerische Bewertung von LFT-Werkstoffen

Prozesskette bei der Bewertung von LFT-Bauteilen

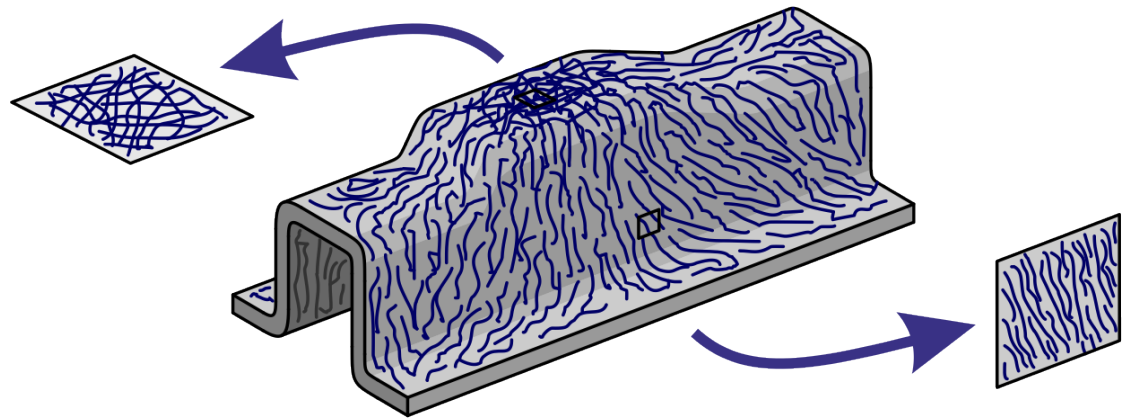
- Rohmaterial
- Formfüllung
 - Faserorientierungs- und -längenverteilung
 - Faservolumenanteil
- Abkühlen und Aushärten
 - Verzug
 - Eigenspannungen
- Belastung
 - Betriebslasten
 - Unfalllasten
- Bewertung von Streuungen im Material- und Bauteilverhalten



Integrale numerische Bewertung von LFT-Werkstoffen

Übersicht

- Langfaserverstärkte Thermoplaste
- **Mikromechanik und Homogenisierung**
 - mechanisches Verhalten des Verbundwerkstoffs auf Mikroebene
- Makroskopische Materialmodelle
- Hybride Bauteile
- Bauteilbewertung

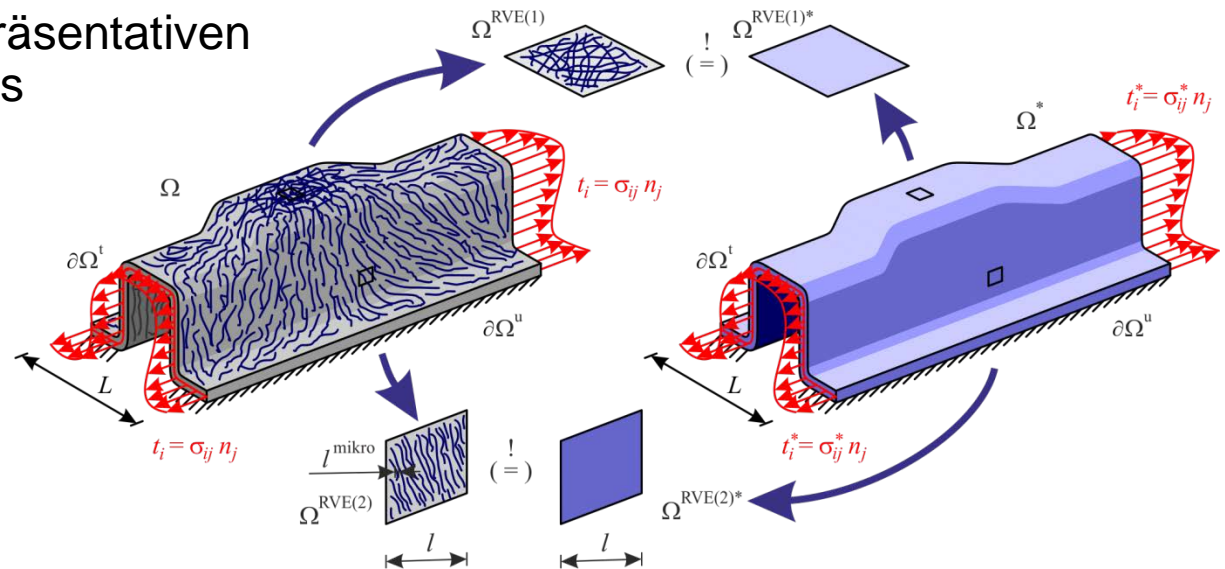


Integrale numerische Bewertung von LFT-Werkstoffen

Homogenisierung – Allgemeines

■ Ermittlung makroskopischer Eigenschaften durch Mikrostruktursimulation

■ Konzept des repräsentativen Volumenelements (RVE)



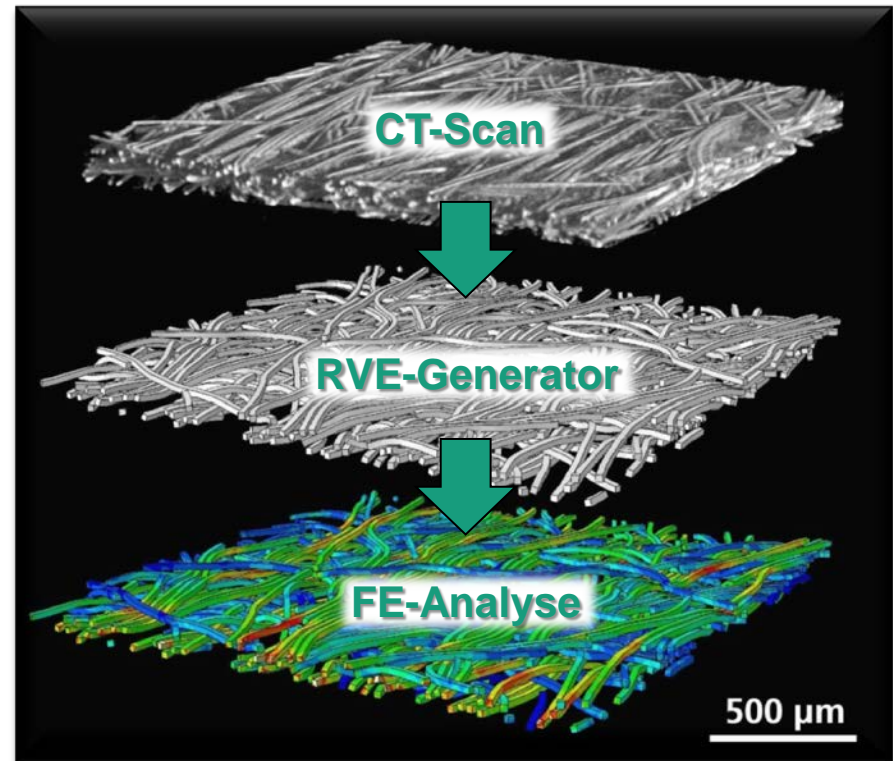
■ Äquivalenz makroskopischer und mikroskopischer Feldgrößen

$$\begin{aligned}\bar{\varepsilon}_{ij} &= \frac{1}{V^{\text{RVE}}} \int_{\Omega^{\text{RVE}}} \varepsilon_{ij} \, dV = \frac{1}{V^{\text{RVE}}} \int_{\Omega^{\text{RVE}*}} \varepsilon_{ij}^* \, dV = \bar{\varepsilon}_{ij}^* \\ \bar{\sigma}_{ij} &= \frac{1}{V^{\text{RVE}}} \int_{\Omega^{\text{RVE}}} \sigma_{ij} \, dV = \frac{1}{V^{\text{RVE}}} \int_{\Omega^{\text{RVE}*}} \sigma_{ij}^* \, dV = \bar{\sigma}_{ij}^*\end{aligned}$$

Integrale numerische Bewertung von LFT-Werkstoffen

Homogenisierung – RVE-Generierung

- Generierung repräsentativer Volumenelemente für LFT aus CT-Aufnahmen
 - Extraktion der Mikrostruktureigenschaften aus CT-Aufnahmen
 - Statistische Beschreibung
 - RVE-Generierung auf Basis der statistischen Eigenschaften der Mikrostruktur
 - Prüfen der Äquivalenz der statistischen Deskriptoren von Mikrostruktur und Modell
 - Finite-Elemente-Analyse des repräsentativen Volumenelements

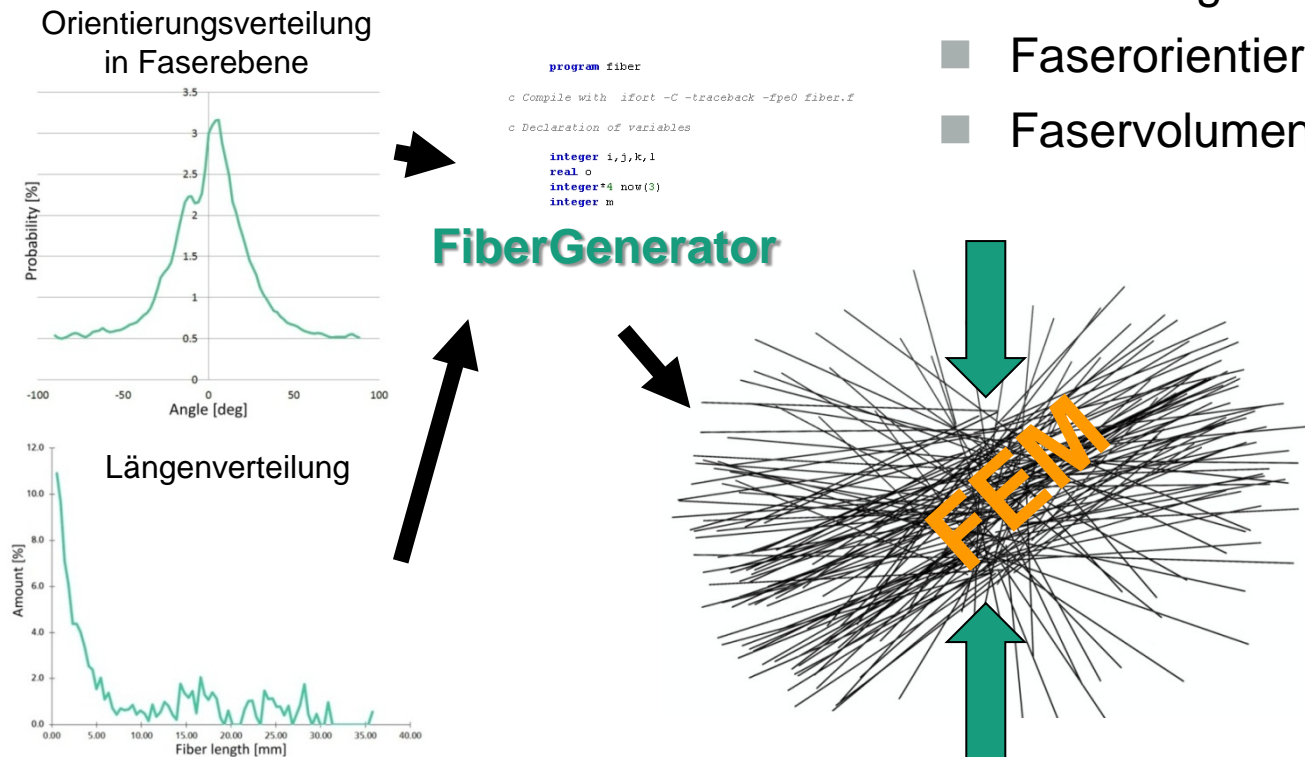


Integrale numerische Bewertung von LFT-Werkstoffen

Homogenisierung – RVE-Generierung

- automatisierte Generierung der Mikrostruktur unter Berücksichtigung von

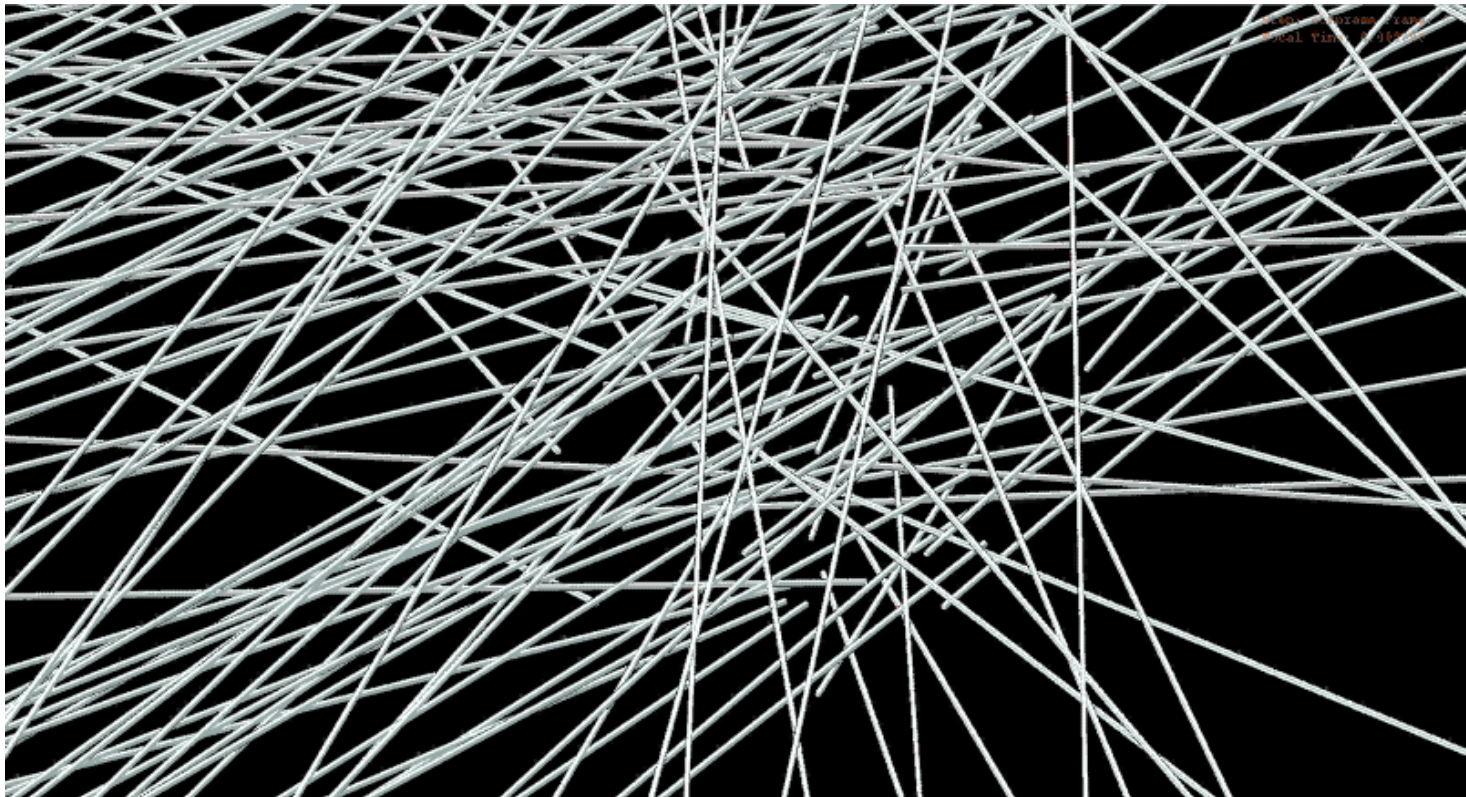
- Faserlänge
- Faserorientierung
- Faservolumenanteil



Integrale numerische Bewertung von LFT-Werkstoffen

Homogenisierung – RVE-Generierung

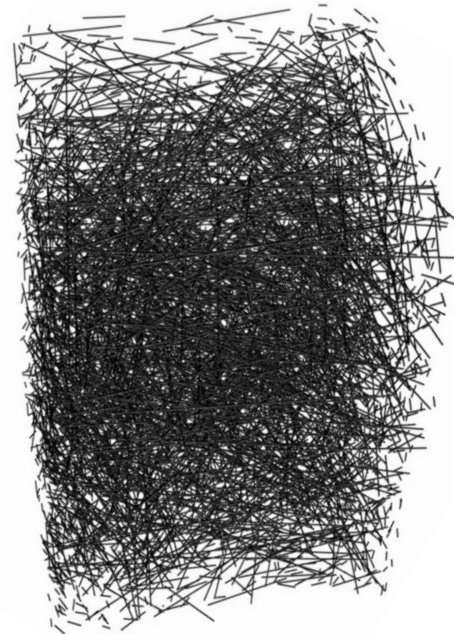
- automatisierte Generierung der RVE-Mikrostruktur



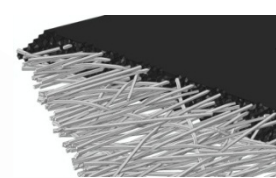
Integrale numerische Bewertung von LFT-Werkstoffen

Homogenisierung – RVE-Generierung

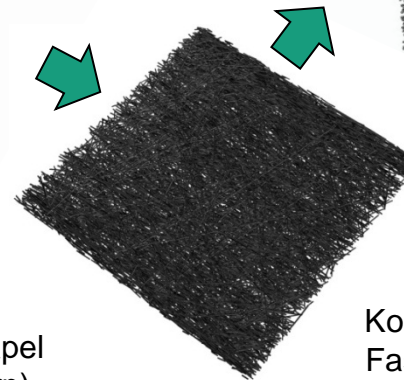
- automatisierte Generierung der RVE-Mikrostruktur



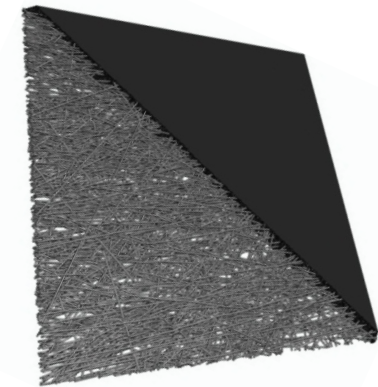
Unkomprimierter Faserstapel
(5x5x15mm³, 5000 Fasern)



Detail



Komprimierte
Faserstruktur
(ca. 13 Vol.-%)



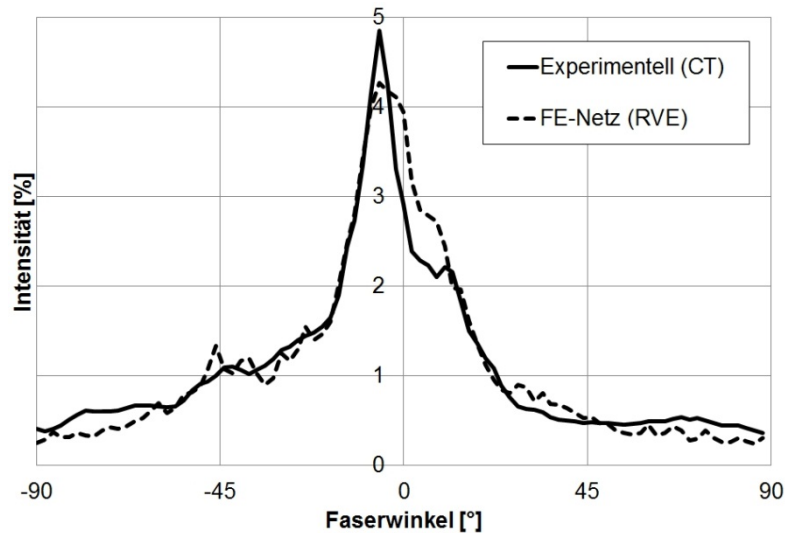
Erstellen eines
Finite-Elemente-Modells
der Mikrostruktur
Auffüllen der Zwischenräume
mit Matrixelementen zum RVE
(5x5x0.2 mm³, 10 Mio. Elem.)

- Berechnung des RVE-Verhaltens mit Methode der Finiten Elemente
 - homogene Spannungs- / lineare Verschiebungsrandbedingungen

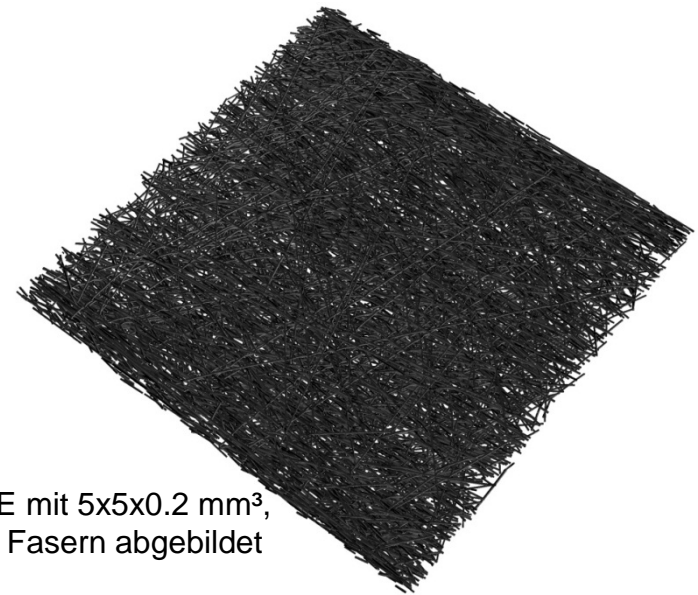
Integrale numerische Bewertung von LFT-Werkstoffen

Homogenisierung – FEM-Analyse

■ Elastische Eigenschaften (PP GF30)



Gemessene Faserorientierungsverteilung vs. FE-Netz



RVE mit 5x5x0.2 mm³,
nur Fasern abgebildet

Exp. / Sim.	V_f [%]	E_{0° [MPa]	E_{90° [MPa]
Experimentell	13.2	7834	3251
RVE 5x5x0.2 mm ³	13.0	8098	2917

E-Modul Matrix aus Messung an
Substanzzugproben (1400 MPa)

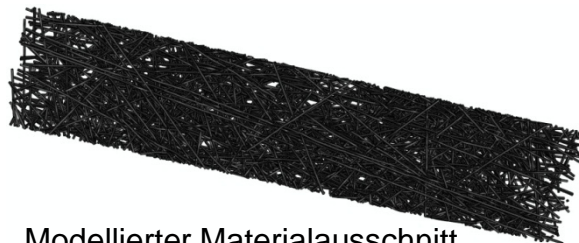
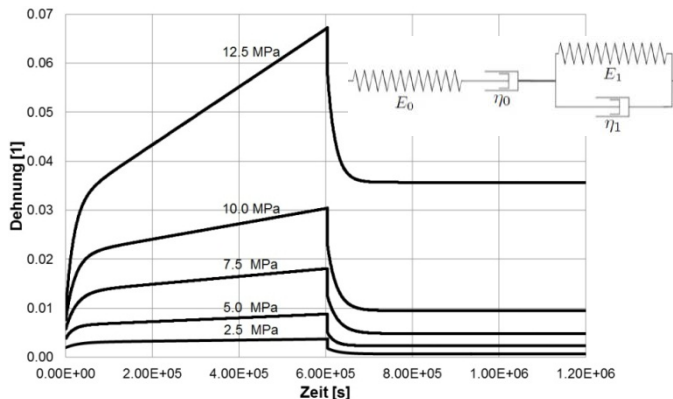
E-Modul Fasern aus Literatur
(72 000 MPa)

Integrale numerische Bewertung von LFT-Werkstoffen

Homogenisierung – FEM-Analyse

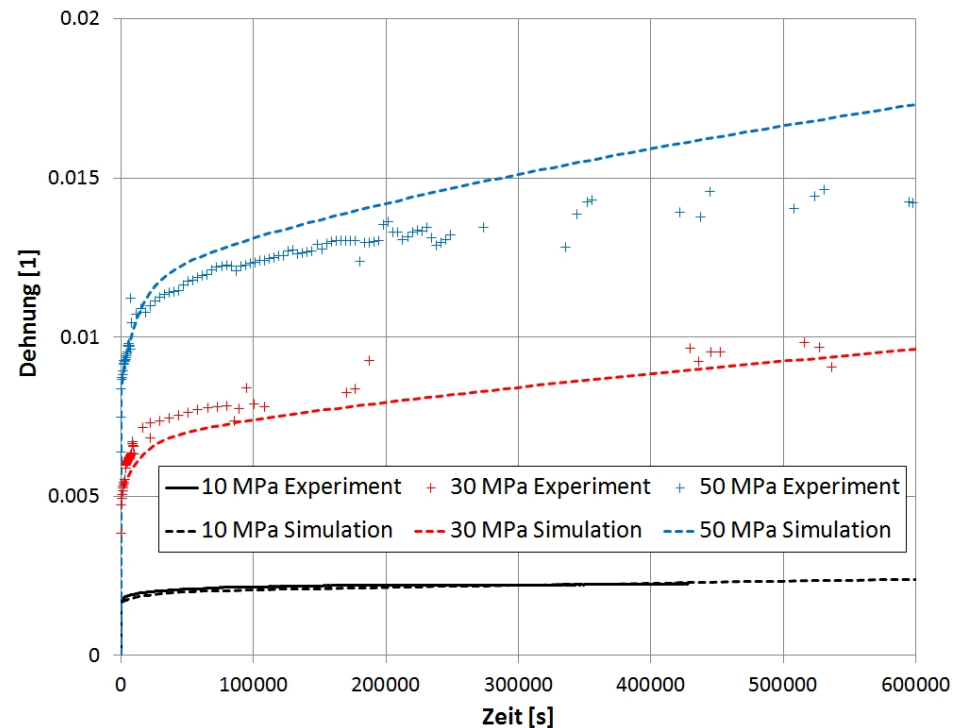
■ Kriecheigenschaften (PP GF30)

Nichtlineares Kriechmodell
(modifiziertes Burgers-Modell) zur
Beschreibung des Matrixverhaltens



Modellierter Materialausschnitt
5x1x0.2 mm³ - nur Fasern dargestellt

Kriechen bei konstanter Spannung in Experiment und Mikrostruktursimulation

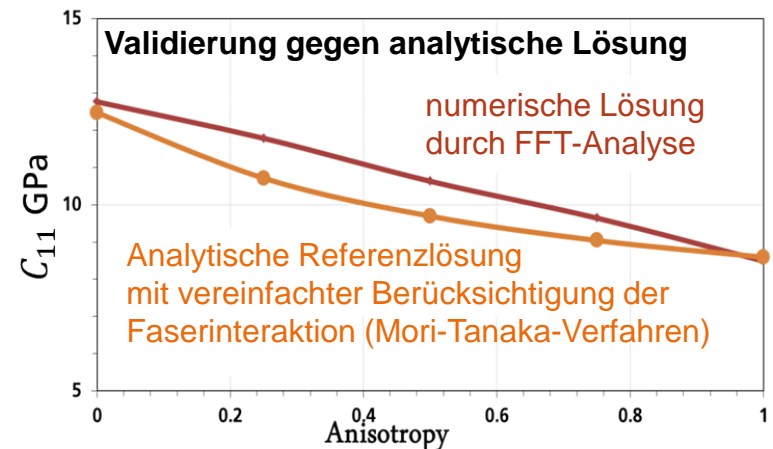


Integrale numerische Bewertung von LFT-Werkstoffen

Homogenisierung – FFT-Analyse

- Alternative: Berechnung des Verhaltens des repräsentativen Volumenelements auf der Basis der schnellen Fourier-Transformation

- Voxel-basierte Methode, kein Netz
- periodische Randbedingungen
- schnelle Berechnung elastischer effektiver Eigenschaften
- Zukunft: Erweiterung auf Plastizität und Versagen



numerische Ressourcen für FFT-Analyse im Vergleich zu FEM-Analyse des RVE

	Speicher	CPU-Zeit
FEM (64x64x64 Elemente)	1800 MB	~ 583 s
FFT (64x64x64 Voxel)	60 MB	~ 30 s



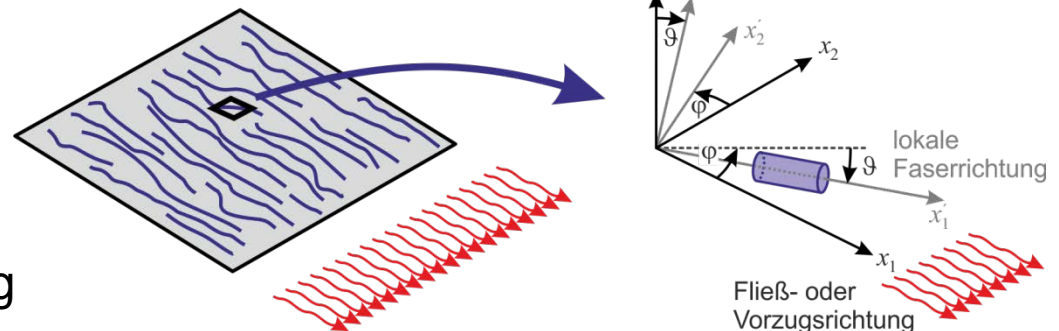
Integrale numerische Bewertung von LFT-Werkstoffen

Probabilistische Bewertungsansätze

- lokale Mikrostruktur kann nicht exakt vorhergesagt werden
 - lokale Variationen von Faserorientierung, -dichte und -länge
 - dadurch Streuung des makroskopischen Materialverhaltens
- probabilistische Modellierung
 - analytische Betrachtung des Einfaserproblems (Mischungsregel)
 - Ensemble-Mittelwert zur Analyse des Mehrfaserproblems

$$\bar{C}_{ijkl} = \text{Erw}(C_{ijkl}) = \int_{\vartheta=-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_{\varphi=-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} C_{ijkl}(\varphi, \vartheta) f(\varphi, \vartheta) \sin \vartheta d\varphi d\vartheta$$

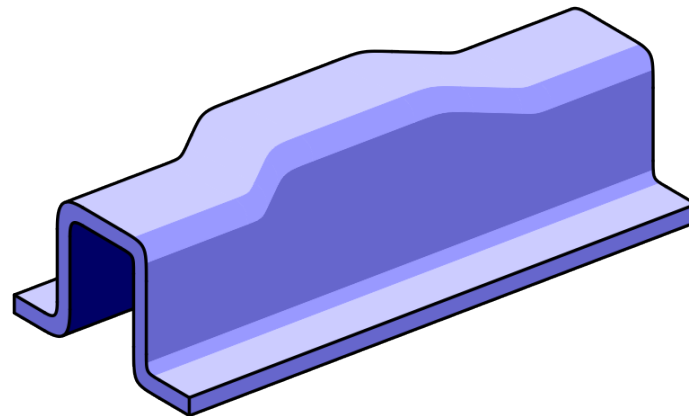
- Standardabweichungen der Faserverteilungen als Zufallsvariablen
- Stochastische Auswertung



Integrale numerische Bewertung von LFT-Werkstoffen

Übersicht

- Langfaserverstärkte Thermoplaste
- Mikromechanik und Homogenisierung
- **Makroskopische Materialmodelle**
 - Überführung der mikromechanischen Analyseergebnisse in makroskopische Materialmodelle
- Hybride Bauteile
- Bauteilbewertung



Integrale numerische Bewertung von LFT-Werkstoffen

Makroskopisches Materialmodell – Formulierung

Fließbedingung

$$\Phi = \sigma_e + \underbrace{\alpha \sigma_{kk}}_{\text{Zug/Druck-Asymmetrie des Matrixmaterials}} \leq \sigma_F(\varepsilon_p)$$

Zug/Druck-Asymmetrie des Matrixmaterials

$$\begin{aligned} \sigma_e^2 = c_1 & \left[\sigma_{11} (\sigma_{11} - \sigma_{22} - \sigma_{33}) + \sigma_{22} \sigma_{33} - \sigma_{23}^2 \right] \\ & + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + 4\sigma_{23}^2 + c_2 \left[\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2 \right] \end{aligned}$$

isotrope
Verfestigung

$$\sigma_F(\varepsilon_p) = \sigma_0 + h \varepsilon_p^n$$

Fließregel

$$\mathbf{D}^p = \dot{\lambda} \frac{\partial \sigma_e}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \quad \text{Nicht-assoziiertes Fließen}$$

Materialparameter

$$c_1, c_2, \alpha, \sigma_0, h, n$$

Einfluss der
Faserorientierung

σ_{11} liegt parallel zur Hauptfaserrichtung

Versagenskriterien

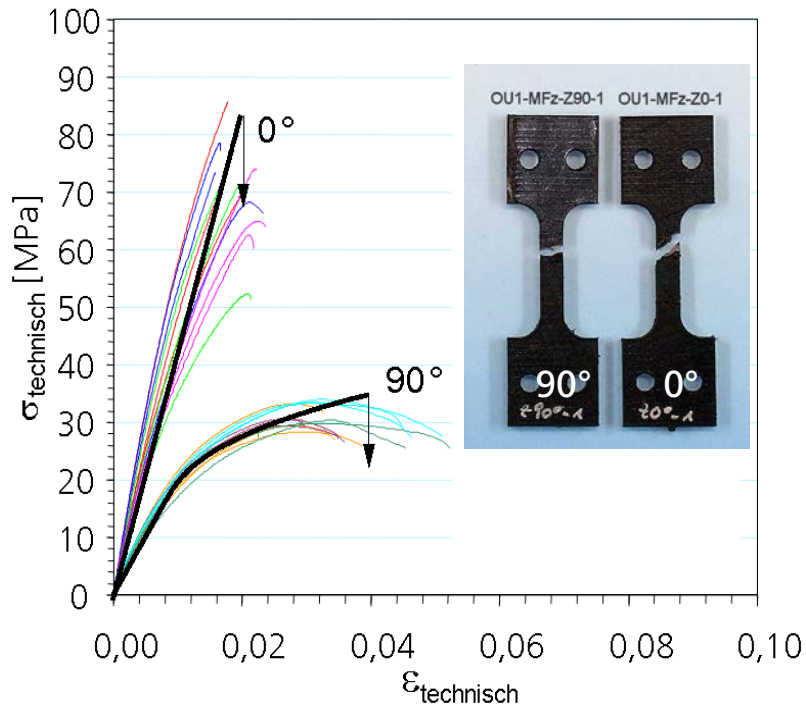
Bruchdehnungen in Abhängigkeit von der Faserorientierung (hier noch experimentell bestimmt)

Integrale numerische Bewertung von LFT-Werkstoffen

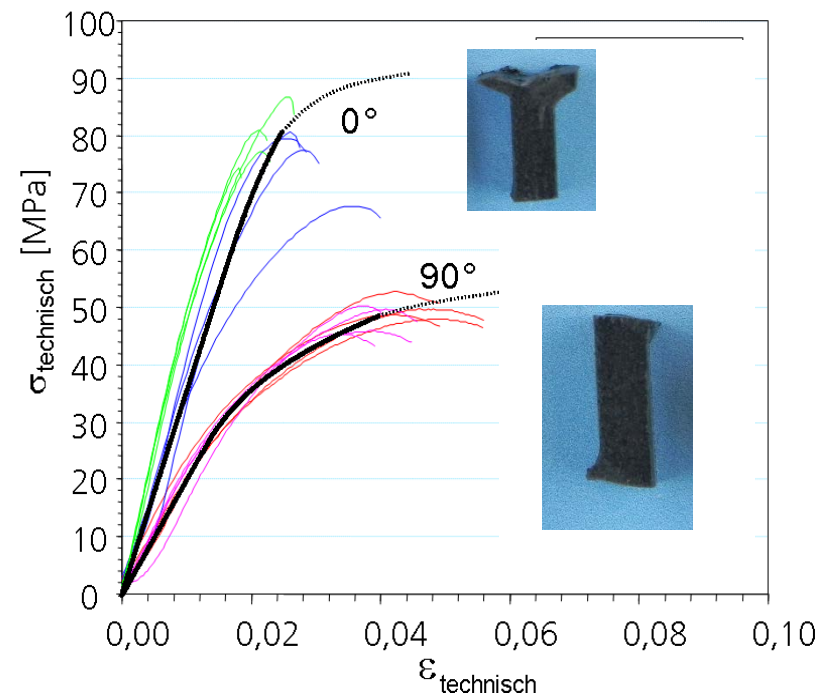
Makroskopisches Materialmodell – Datenanpassung

- Bestimmung der Materialparameter an einfachen einaxialen Versuchen
 - Zug-Druck-Unterschiede bei zwei Faserorientierungen

einachsiger Zug



einachsiger Druck

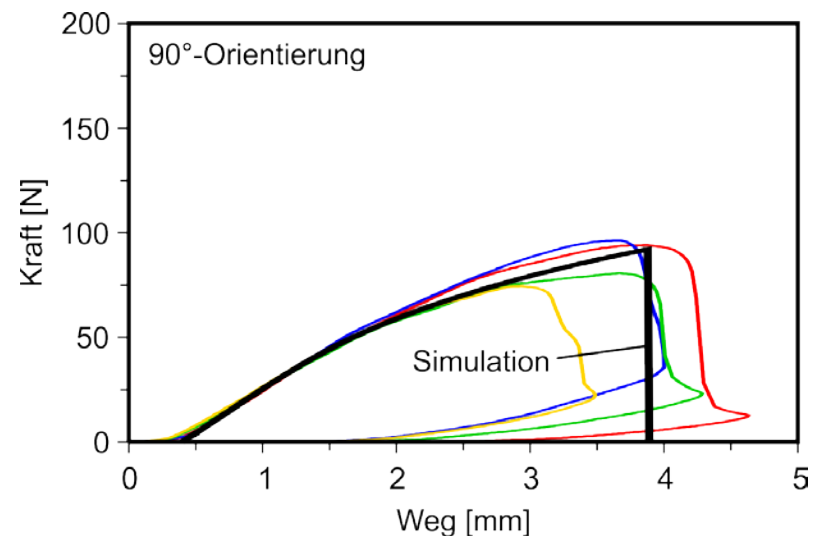
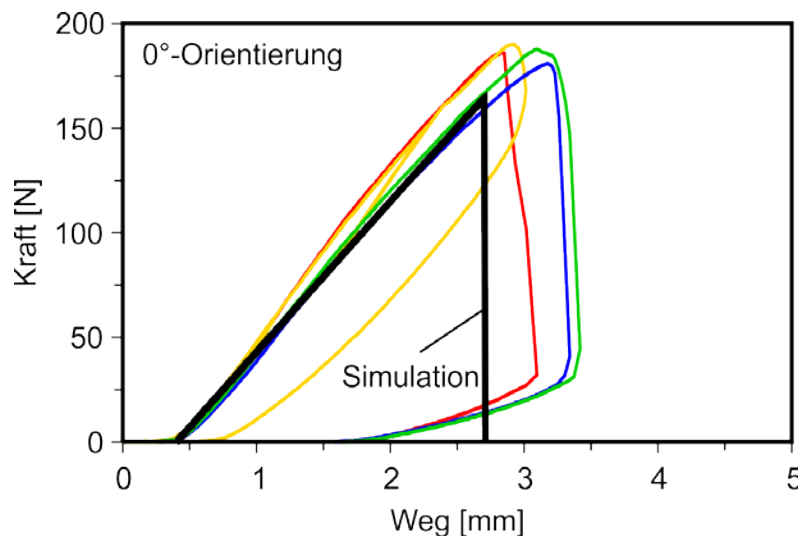
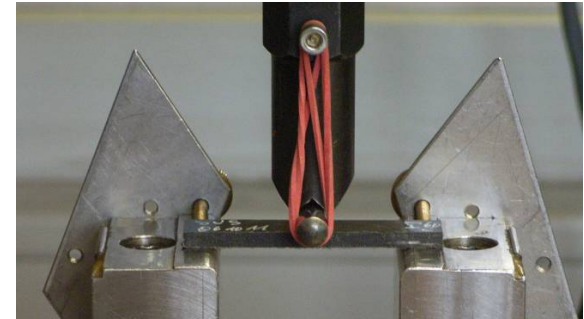


Integrale numerische Bewertung von LFT-Werkstoffen

Makroskopisches Materialmodell – Validierung

- Vergleich der experimentellen und numerischen Ergebnisse für Versuch mit mehraxialer Belastung

- Biegeversuch



→ gute Übereinstimmung ohne weitere Anpassung von Modellparametern

Integrale numerische Bewertung von LFT-Werkstoffen

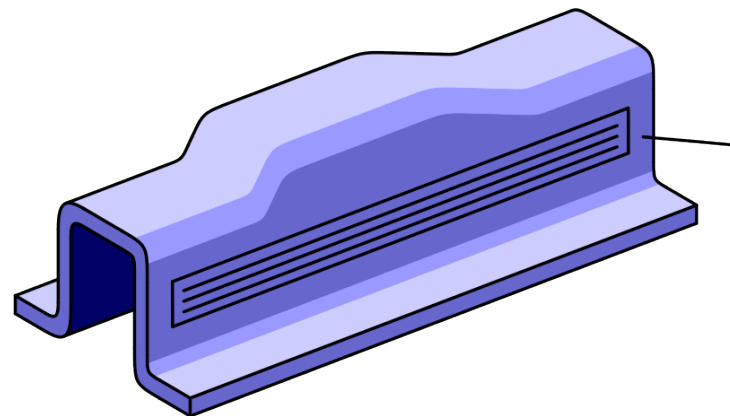
Übersicht

- Langfaserverstärkte Thermoplaste
- Mikromechanik und Homogenisierung
- Makroskopische Materialmodelle

■ Hybride Bauteile

- lokale Verstärkungen

■ Bauteilbewertung

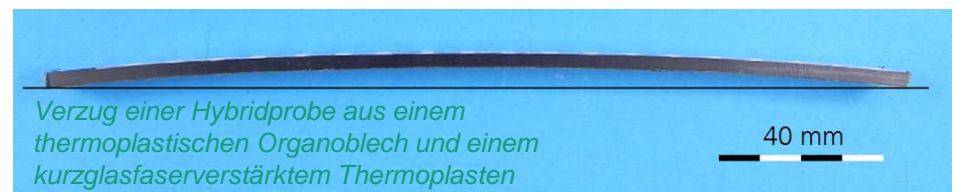
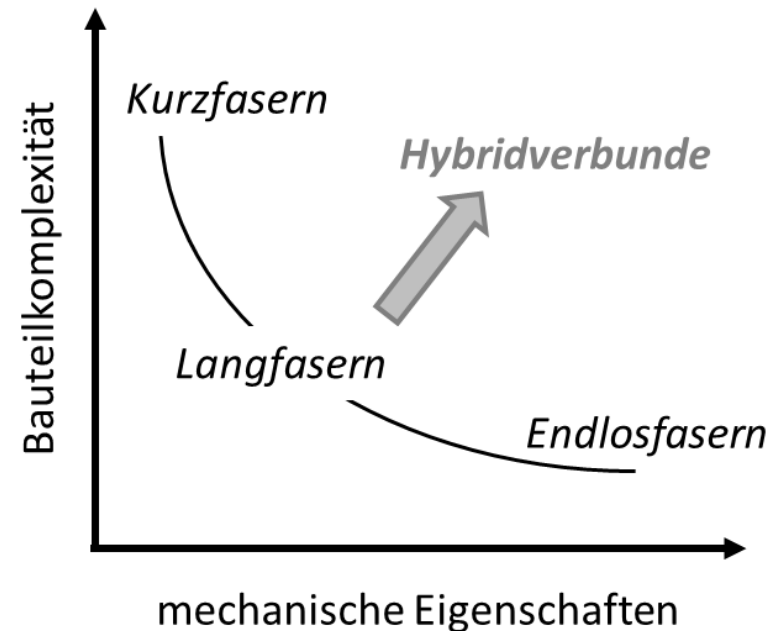


lokale Verstärkung z.B.
durch unidirektional
endlosfaserverstärkten
Einleger

Integrale numerische Bewertung von LFT-Werkstoffen

Hybride Bauteile

- Langfaserverstärkte Kunststoff-Metall-Hybride (ähnlich klassischen Kunststoff-Metall-Hybriden)
 - Höhere Kraftaufnahme des LFT durch längere Fasern
 - höhere Anforderungen an Verbindung
- Funktionalisierung über „Organoblech“ oder endlosfaserverstärkte thermoplastische Tapes
 - Notwendigkeit integraler Bewertung
 - Prozesseinfluss als Grundlage für die Strukturbewertung
 - Faserorientierung, ...
 - **Verzug / Eigenspannungen**
- Homogenisierung nicht möglich



Integrale numerische Bewertung von LFT-Werkstoffen

Hybride Bauteile

- Tool zur Bewertung des Verformungs- und Versagensverhaltens abhängig vom gewählten Verbindungsmechanismus

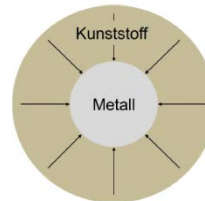
- **Formschluss:**

- durchflossene Durchbrüche



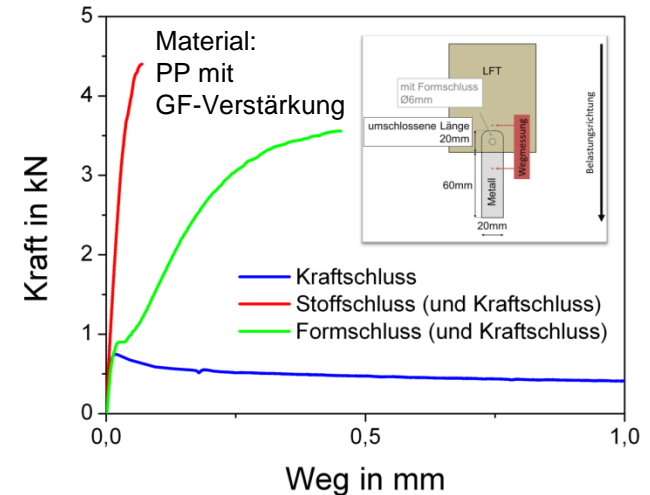
- **Kraftschluss:**

- Schwindung und negative thermische Dehnung

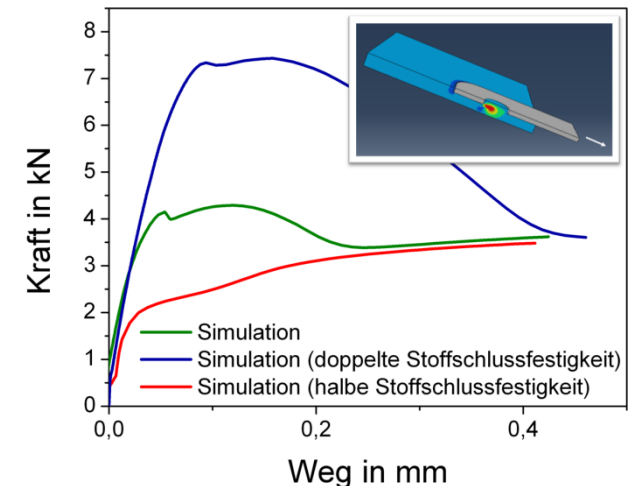


- **Stoffschluss:**

- Adhäsive Eigenschaften der Kunststoffmatrix



Experiment



Simulation

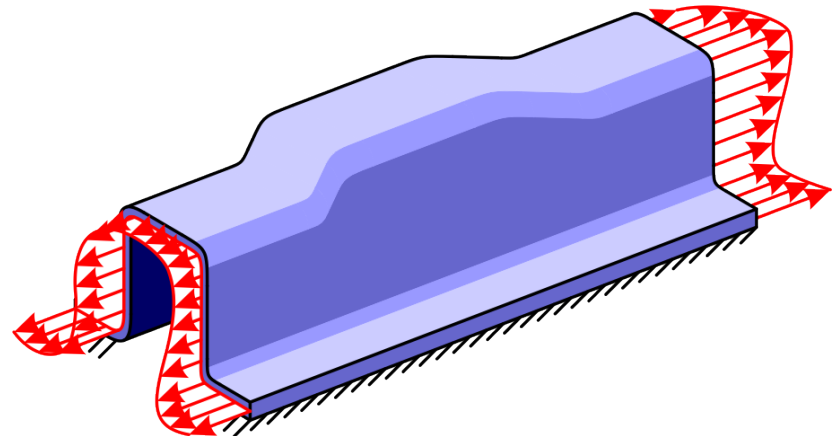
Integrale numerische Bewertung von LFT-Werkstoffen

Übersicht

- Langfaserverstärkte Thermoplaste
- Mikromechanik und Homogenisierung
- Makroskopische Materialmodelle
- Hybride Bauteile

■ Bauteilbewertung

- Berechnung des Verformungs- und Versagensverhaltens von LFT-Bauteilen

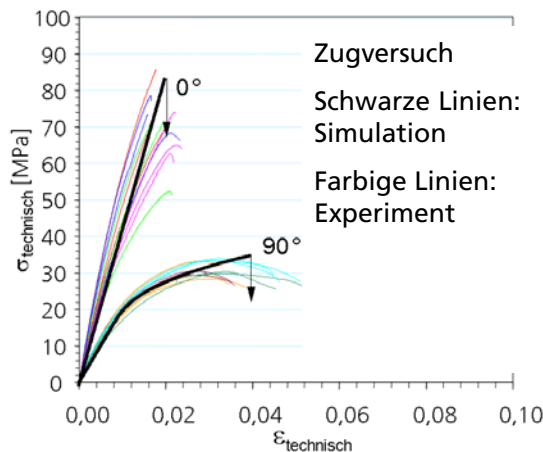
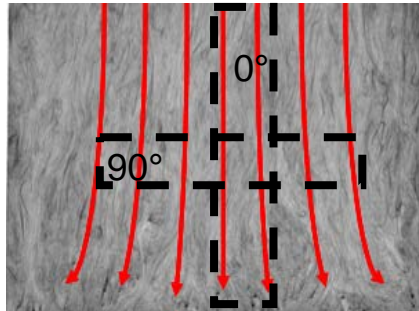


Integrale numerische Bewertung von LFT-Werkstoffen

Bauteilbewertung – Vorgehensweise

■ Crashsimulation mit Faserorientierung aus Formfüllsimulation

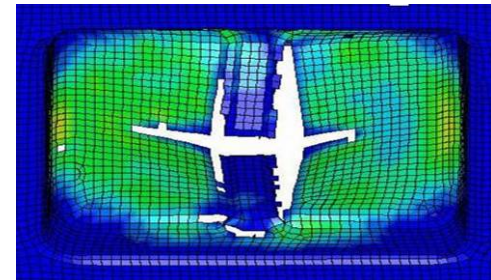
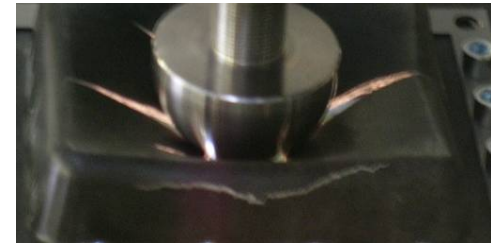
Charakterisierung



Modellierung

- Formfüllsimulation (Faserorientierung, hier durch ITWM als Partner)
- Werkstoffmodell (Anisotropie bzgl. Verformung und Versagen)
- ggf. Dehnrateneffekt
- Crashsimulation mit Faserorientierung aus Prozesssimulation

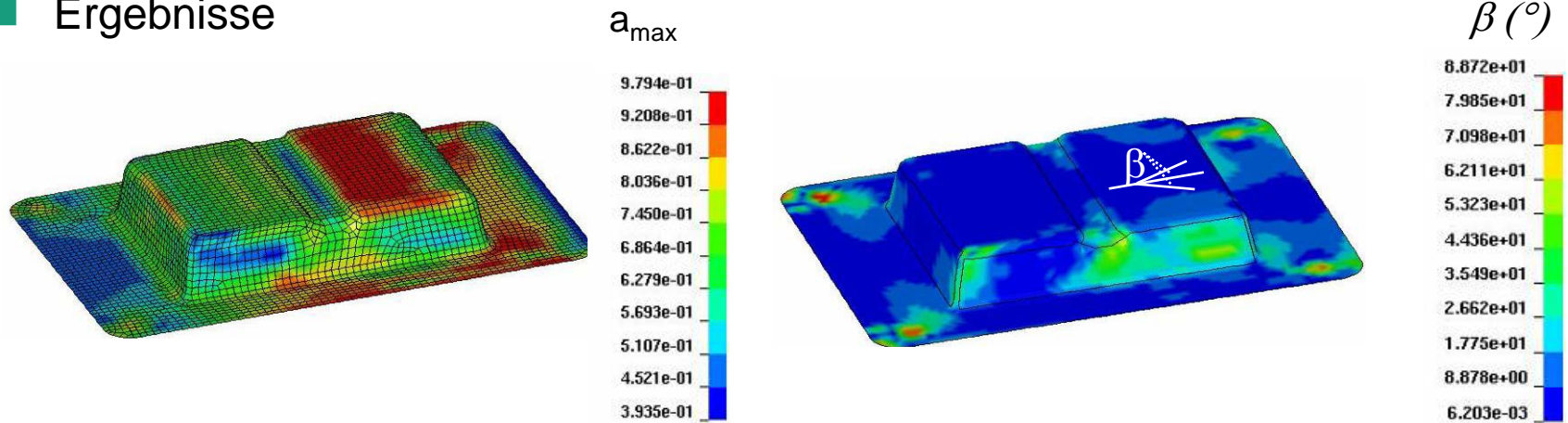
Bauteilbewertung



Integrale numerische Bewertung von LFT-Werkstoffen

Bauteilbewertung – Ergebnisse

■ Ergebnisse



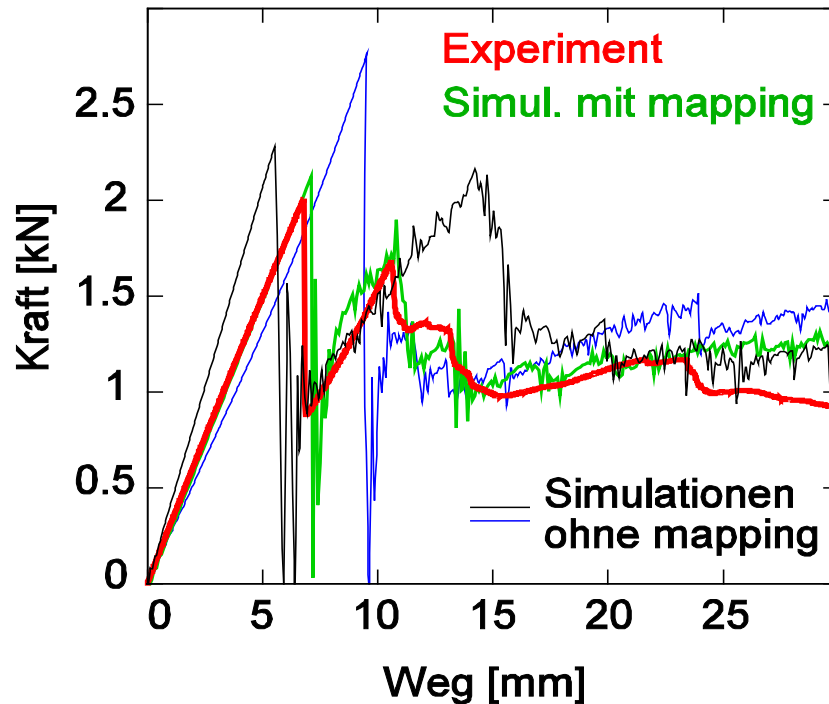
- Faserorientierungstensor $\mathbf{a}(\mathbf{x}) = \sum_i a_i \vec{e}_i \otimes \vec{e}_i$ aus Formfüllsimulation (ITWM)

mit Hauptwerten a_i ($= 1/3$ für isotrope Verteilung)
und \vec{e}_1 Hauptfaserrichtung.

- Winkel β zwischen Hauptfaserrichtung und globaler x-Richtung

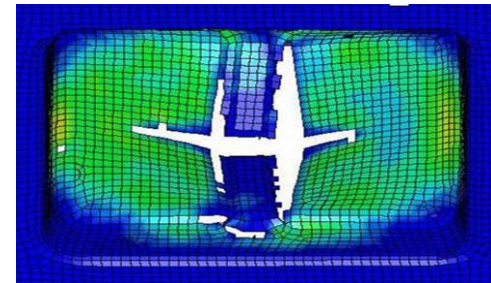
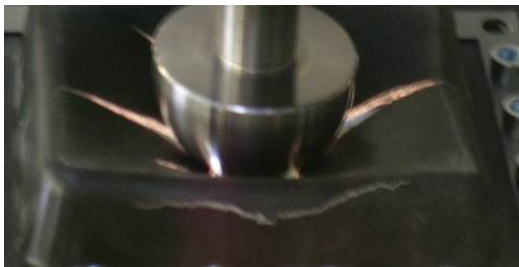
Integrale numerische Bewertung von LFT-Werkstoffen

Bauteilbewertung – Ergebnisse



→ gute Beschreibung des Globalverhaltens bei Berücksichtigung der Faserorientierungsverteilung

→ bei Annahme extremer Faserorientierungen (maximale bzw. minimale Anfangssteifigkeit der Struktur) unzureichende Beschreibung



Integrale numerische Bewertung von LFT-Werkstoffen

Zusammenfassung und Zukunftsaspekte

- Materialeigenschaften faserverstärkter Kunststoffe bei Verarbeitung in Press- und Fließprozessen stark prozessabhängig
- Material entsteht erst im Formgebungsprozess
- Bauteilbewertung nur auf Basis der lokalen Mikrostruktur möglich
- Prozesskettensimulation bisher nur in Ansätzen realisiert
 - offene Fragen insbesondere auf Seite der Prozesssimulation
 - Material als Fluid mit deformierbaren Festkörpern
 - Interaktion der Langfasern während des Fließvorgangs
 - offene Punkte bei der Bauteilbewertung
 - adäquate Materialmodelle mit Berücksichtigung der Verschlingung
 - materielle Unschärfen durch Variationen der Mikrostruktur
 - Verknüpfung zu effizienter Prozesskettensimulation