

# Verbesserte Vorhersage der Faserausrichtung in der Spritzgießsimulation

Fabian Ferrano, Hochschule Aalen, [fabian.ferrano@hs-aalen.de](mailto:fabian.ferrano@hs-aalen.de)

Patrick Uhl, Hochschule Aalen, [patrick.uhl@hs-aalen.de](mailto:patrick.uhl@hs-aalen.de)

**Zusammenfassung:** Die Spritzgießsimulation ist ein wichtiger Bestandteil in der Produktentwicklung kurzglasfaserverstärkter (kgfv) Kunststoffbauteile, um das mechanische Werkstoffverhalten hinreichend genau beschreiben zu können. Durch den Spritzgießprozess richten sich die Kurzglasfasern primär in Fließrichtung aus, woraus sich ein richtungsabhängiges mechanisches Werkstoffverhalten ergibt. Die Beschreibung der Faserorientierung in der Simulation basiert auf rheologischen Parametern, insbesondere dem Faserinteraktionskoeffizienten  $C_i$ . Dieser Beitrag stellt eine anwendungsbezogene Methode zur Bestimmung des  $C_i$ -Werts vor. Anhand zweier Beispielwerkstoffe, einem PA66-GF30 und einem PBT-GF30, wird das Vorgehen aufgezeigt. Hierzu werden Spritzgießsimulationen durchgeführt und die Faserorientierungen Messergebnissen gegenübergestellt. Zudem findet eine Gegenüberstellung des simulierten und des realen mechanischen Werkstoffverhaltens anhand uniaxialer Zugversuche statt.

**Stichworte:** Spritzgießsimulation, kurzglasfaserverstärkte Kunststoffe, Rheologie, Faserinteraktionskoeffizient, Faserorientierung

## 1 Einleitung und Motivation

Kurzglasfaserverstärkte (Kgfv) Kunststoffe werden vielfältig in technischen Bauteilen vorrangig in mechanisch hochbeanspruchten Bereichen eingesetzt [1]. Ein zuverlässiges Bauteildesign muss unter Berücksichtigung aller relevanten Belastungen in kurzer Entwicklungszeit abgeleitet werden [2]. Diese Anforderungen sind primär mithilfe einer simulationsgestützten Produktentwicklung realisierbar. Die Herstellung der kgfv Kunststoffbauteile findet in der Großserienproduktion im Spritzgießverfahren statt. Der Einsatz einer Prozess-Struktur-gekoppelten Simulation ermöglicht es, die aufgrund des Herstellprozesses entstehenden spezifischen Werkstoffeigenschaften, bereits bei der Auslegung der Bauteile mit zu berücksichtigen (Abbildung 1). Das Werkstoffverhalten wird primär durch die lokale Faserausrichtung im Bauteil beeinflusst, die in der Spritzgießsimulation mit Hilfe eines rheologischen Modells beschrieben werden kann [3].

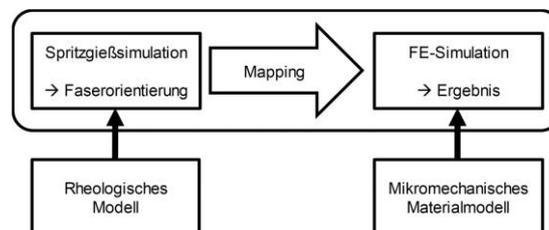


Abbildung 1: Schematisches Vorgehen bei einer Prozess-Struktur-gekoppelten Simulation [3]

Nachfolgend findet ein sogenanntes Mapping statt, bei dem die Faserorientierung auf ein Finite Elemente Methode - Netz (FEM-Netz) übertragen wird. Unter Verwendung eines mikromechanischen Materialmodells, das die lokale Faserorientierung berücksichtigt, wird anschließend eine FEM-Berechnung durchgeführt. Hierbei kommt eine zweistufige

Homogenisierungsmethode zur Vorhersage der lokalen Anisotropie zum Einsatz [4]. Das faserrichtungsabhängige Versagen wird durch das Tsai-Hill Kriterium beschrieben. Ziel ist es, die lokale Deformation und das Versagen im Bauteil bewerten zu können. Für eine genaue Beschreibung der lokalen Beanspruchung muss insbesondere die Faserorientierung in der Simulation hinreichend genau abgebildet werden. Hierbei ist der  $C_i$ -Wert, der die Interaktion zwischen den einzelnen Fasern während des Füllvorgangs mitberücksichtigt, von Bedeutung. Die Fasern hindern einander dabei sich ideal in Strömungsrichtung auszurichten und beeinflussen unter anderem die mechanischen Eigenschaften.

Im aktuellen Beitrag wird zunächst auf die Rheologie von kgfv Kunststoffen eingegangen. Anschließend wird eine anwendungsbezogene Methode zur Ermittlung des  $C_i$ -Werts vorgestellt. Grundlage hierfür ist eine Micro Computertomographie-Messung ( $\mu$ CT-Messung), zur Bestimmung der Faserausrichtung in kgfv Kunststoffbauteilen. Ziel dieser Methodenentwicklung ist es, eine annähernd genaue Vorhersage der lokalen Faserausrichtung mittels Spritzgießsimulation zu erreichen.

## 2 Spritzgießsimulation und Faserorientierung

Die Ausrichtung der Fasern kann mit Hilfe des zweistufigen Orientierungstensors  $a_{ij}$  beschrieben werden, der durch die Multiplikation mit dem dyadischen Produkt des Einheitsvektors  $p$  und der Orientierungsverteilungsfunktion  $\psi$  ermittelt wird [5].

$$a_{ij} = \int p_i p_j \psi dp = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Die Beschreibung der Faserausrichtung basiert auf dem Ansatz von Jeffery [6], der die Bewegung eines ellipsoiden Partikels in einem newtonschen Fluid beschreibt. Darauf aufbauend entwickelten Folgar und Tucker ein Modell zur Vorhersage der Faserorientierung von spritzgegossenen kgfv Kunststoffen. Folgende Größen werden dabei berücksichtigt [7]: Die Form der Fasern wird durch das Aspektverhältnis  $a_r$  berücksichtigt, das sich aus der Faserlänge ( $l$ ) und dem Faserdurchmesser ( $d$ ) ergibt.

$$a_r = \frac{l}{d} \quad (2)$$

Außerdem geht der Volumenanteil  $c_F$  der Fasern in die Simulation mit ein. Zuletzt werden Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Fasern durch den empirisch ermittelten  $C_i$ -Wert berücksichtigt. Die Wechselwirkungen haben einen wesentlichen Einfluss auf die Viskosität der Schmelze beim Füllvorgang [8]. Pflamm-Jonas [9] zeigt durch eine Gegenüberstellung von Schliffbildern mit Simulationsergebnissen, dass sich unter der Verwendung des Ansatzes von Folgar und Tucker [7] die Fasern in der Simulation stärker ausrichten als in der Realität. Foss et al. [10] haben hierfür basierend auf den Annahmen von Wang et al. [11] das sogenannte iARD-Modell entwickelt. Damit ist eine Anpassung der Simulationsergebnisse möglich. Das iARD-Modell [11] findet im Simulationsprogramm Moldex-3D Verwendung und kommt im Rahmen dieses Beitrages zum Einsatz. Dem Modell liegt folgende Gleichung zugrunde:

$$\frac{\partial a_{ij}}{\partial t} = -\frac{1}{2}(w_{ik}a_{kj} - a_{ik}w_{kj}) + \frac{1}{2}\lambda(\dot{\gamma}_{ik}a_{kj} + a_{ik}\dot{\gamma}_{kj} - 2[a_{ijkl} + (1-\kappa)(L_{ijkl} - M_{ijmn}a_{mnkl}])\dot{\gamma}_{kl}) + 2C_i\dot{\gamma}_{kl}(\delta_{ij} - 3a_{ij}) \quad (3)$$

Primär werden die Fasern aufgrund des Deformationsgradienten  $\dot{\gamma}_{ik}$  und des Wirbeltenors  $w_{ik}$  ausgerichtet.  $\lambda$  ist eine Konstante, die von der Form der Partikel (Fasern) abhängt.

$\kappa$  ist ein empirischer Wert, der die Ausrichtung der Fasern in Fließrichtung abmindert [12]. Die Tensoren  $L_{ijkl}$  und  $M_{ijmn}$  lassen sich aus dem Faserorientierungstensor  $a_{ij}$  entwickeln. Der  $C_i$ -Wert kann mit Hilfe des Ansatzes von Phan-Thien et al. [5] bestimmt werden. Dabei wird der Koeffizient mittels des effektiven Faseraspektverhältnisses  $a_r$  und dem Faservolumenanteil  $c_f$  berechnet.

$$a_r = 1,14 \cdot \left(\frac{l}{d}\right)^{0,844}, \quad \text{für } 20 \leq \frac{l}{d} < 400 \quad (4)$$

$$C_i = 0,03 \cdot [1 - e^{(-0,0224 \cdot c_f \cdot a_r)}] \quad (5)$$

Je größer der  $C_i$ -Wert ist, desto geringer ist die Faserorientierung in Fließrichtung der Schmelze beim Spritzgießen.

### 3 Spritzgießsimulation

Die Spritzgießsimulation wird am Beispiel der in Abbildung 2 dargestellten Prüfplatte aus PBT-GF30 und aus PA66-GF30 durchgeführt. Die Prüfplatte mit einer Größe von 90 mm x 90 mm x 2 mm wird mit einem Filmanguss angespritzt, der zu einer parallel ausbreitenden Fließfront und somit zu einer homogenen Faserausrichtung führt.

Im Folgenden wird  $C_i$  nach Phan-Thien et al. [5] ermittelt, dieser Wert bei einer Spritzgießsimulation berücksichtigt und die Faserorientierung einer  $\mu$ CT-Messung an der in Abbildung 2 hervorgehobenen Prüfposition gegenübergestellt. Der dargestellte Zugprüfstab wird hierzu aus einer spritzgegossenen Prüfplatte herausgefräst. Die Prüfplatten sind in der Füllsimulation mit zwölf Elementen über die Dicke vernetzt, um die Faserverteilung über Dicke der Prüfplatte hinreichend genau abbilden zu können [14]. Der empirische Parameter  $\kappa$  ist für die untersuchten Werkstoffe im Spritzgießsimulationsprogramm hinterlegt und muss für diese Untersuchung nicht explizit bestimmt werden.

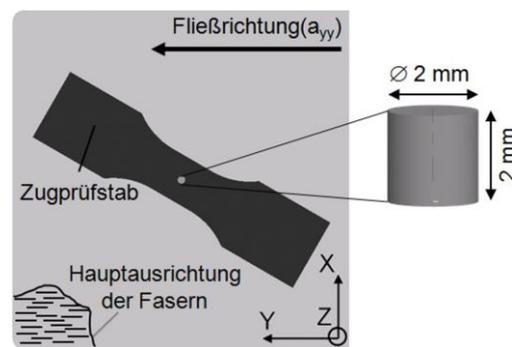


Abbildung 2: Faserorientierung eines zylindrischen Bereichs, bestimmt mittels  $\mu$ CT [13].

#### 3.1 Gegenüberstellung von Simulations- und Versuchsergebnissen für PBT GF30 und PA66 GF30

Der Faserinteraktionskoeffizient wird nach Phan-Thien et al. [5] gemäß Gleichung 2 und 3 mit einem Faserdurchmesser von 12  $\mu$ m und einer Länge von 252  $\mu$ m für PBT GF30 berechnet. Daraus ergibt sich ein Wert von  $C_i = 0,0137$ . Die damit simulierte Faserorientierung ist dem Messergebnis in Abbildung 3 gegenübergestellt. Mit Hilfe der grafischen Darstellung des Orientierungstensors  $a_{ij}$  lässt sich zudem die charakteristische Faserausrichtung über die Dicke der Prüfplatte darstellen (vgl. Abbildung 2).

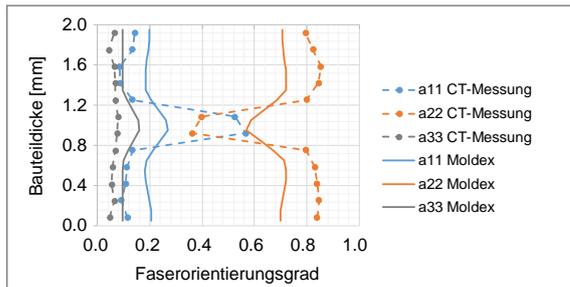


Abbildung 3: Vergleich: gemessene und simulierte Faserorientierung gemäß [5].

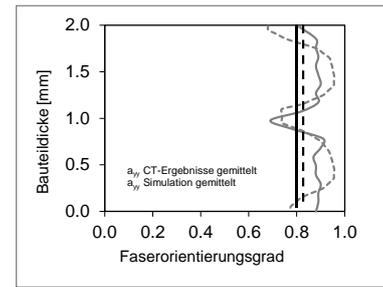


Abbildung 4: Gemittelte Faserorientierung über die Plattendicke.

Im Rahmen dieses Beitrags findet das arithmetische Mittel der Faserorientierung über die Bauteildicke, zur Bewertung der Simulationsergebnisse Verwendung. Die gemittelte Faserorientierung liegt folgender Gleichung zugrunde:

$$\bar{a}_{ii} = \frac{1}{D} \cdot \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot d_j \quad (6)$$

Die mittleren Faserorientierungen sind in Abbildung 4 schematisch dargestellt. Ferner wird die Hypothese überprüft, ob ein möglichst geringer Abstand zwischen der mittleren Faserorientierungen jenen  $C_i$ -Wert liefert, der die bestmögliche simulierte Faserorientierung ergibt. Daraus soll eine hinreichend genaue Beschreibung des lokalen Werkstoffverhaltens für die FEM-Berechnung resultieren. Bei dem Vorgehen nach Phan-Thien et al. [5] ist zum einen zu erkennen, dass die Simulationsergebnisse deutlich von den Messergebnissen abweichen. Die mittlere Faserorientierung in Y-Richtung, in die die meisten Fasern ausgerichtet sind, wird um 7,1% unterschätzt. In X- und Z-Richtung wird die Faserorientierung hingegen überschätzt (siehe Abbildung 3). Zum anderen ist die Ermittlung des  $C_i$ -Werts in der Praxis schwer anwendbar, da insbesondere die Parameter aus Gl. 3 und Gl. 4 keinen Werkstoffbezug haben und kein Vorgehen empfohlen wird, wie diese anzupassen sind.

Der  $C_i$ -Wert für PA66-GF30 wird ebenfalls zuerst gemäß Gl. 3 und Gl. 4 für Fasern mit einem Durchmesser von  $12 \mu\text{m}$  und einer Länge von  $252 \mu\text{m}$  berechnet. Der berechnete Wert entspricht dabei  $C_i = 0,0126$ . Die simulierte und die gemessene Faserorientierung sind in Abb. 7 dargestellt.

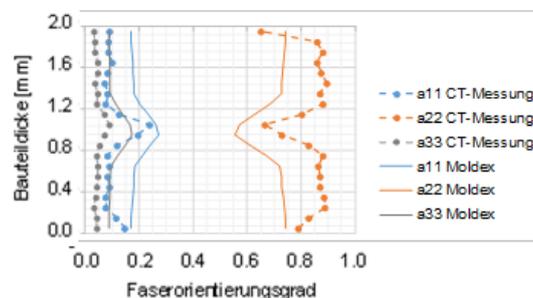


Abbildung 5: Gemessene und simulierte Faserorientierung gemäß Phan-Thien et al. [5].

Die Simulation weicht deutlich von den Messergebnissen ab. Die mittlere Faserorientierung in Y-Richtung wird in der Simulation unterschätzt. Die Faserorientierung in X- und Z-Richtung wird hingegen in der Simulation überschätzt. Folglich ist das Ergebnis nicht

hinreichend genau, um eine präzise Prozess-Struktur-gekoppelte FEM-Berechnung durchzuführen.

### 3.2 Bestimmung des Faserinteraktionskoeffizienten $C_i$

Die signifikante Abweichung zwischen simulierter und realer Faserausrichtung ist Motivation zur Entwicklung einer verbesserten, anwendungsbezogenen Methode zur Berechnung des  $C_i$ -Werts. Die geht einher mit wenigen Iterationen bei Spritzgießsimulationen. Im ersten Schritt werden Werte für  $C_i$  im Bereich zwischen 0,001 und 0,1 gemäß Zheng et al. [5] gewählt. Die Differenz der simulierten mittleren Faserorientierungen zu den Messergebnissen sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Differenz zwischen simulierter und gemessener Faserorientierung in Y-Richtung, unter der Verwendung des Ansatzes nach Phan-Thien et al. [5].

| $C_i$                                  | 0,01    | 0,07   | 0,005  | 0,001  |
|--|---------|--------|--------|--------|
| $\bar{a}_{22}(Sim) - \bar{a}_{22}(CT)$ | -0,0274 | 0,0007 | 0,0217 | 0,0748 |

Eine graphische Darstellung der Ergebnisse soll den Zusammenhang zwischen Faserinteraktionskoeffizient und gemittelter Faserorientierungsdifferenz plausibilisieren (siehe Abbildung 5).

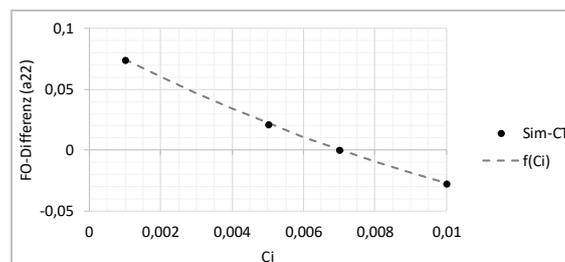


Abbildung 6: Anpassungsfunktion des Faserinteraktionskoeffizienten.

Der  $C_i$ -Wert kann mittels einer geeigneten Funktion dahingehend angepasst werden, dass die simulierten und gemessenen Faserausrichtungen im Mittel übereinstimmen (siehe Nulldurchgang der Funktion). Zur Beschreibung des Zusammenhangs der Parameter aus Tabelle 1, hat sich eine Anpassungsfunktion, aufbauend auf der Exponentialfunktion nach Zheng et al. [5] nach Gl. 5, als geeignet erwiesen.

$$f(C_i) = (a \cdot e^{b \cdot C_i})^{-1} + c \cdot C_i^2 - d \cdot C_i. \quad (7)$$

Die Parameter a bis d werden mit Hilfe der Methode der kleinsten Fehler-Quadrate ermittelt.

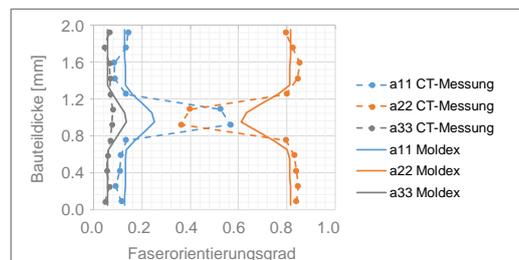


Abbildung 7: Verbesserte Beschreibung der Faserorientierung mit rekonstruiertem  $C_i$ -Wert (PBT-GF30).

Es ergeben sich folgende Koeffizienten:

$$f_{PBT\ GF30}(C_i) = (11,144 \cdot e^{0,0156 \cdot C_i})^{-1} + 363,319 \cdot C_i^2 - 15,330 \cdot C_i. \quad (8)$$

Die Nullstelle der Anpassungsfunktion liegt bei  $C_i \approx 0,007$ . Die mit diesem Wert simulierte Faserorientierung sowie die gemessene Orientierung sind in Abbildung 6 dargestellt. Die Faserorientierung in der Mittelschicht wird in Y-Richtung (22-Richtung) weiterhin leicht überschätzt. Jedoch weicht die simulierte mittlere Faserorientierung in Y-Richtung lediglich um 0,1% vom Messergebnis ab. Im Vergleich mit dem Ansatzes nach Zheng et al. [5] kann die Faserorientierung besser beschrieben werden.

Der Faserinteraktionskoeffizient wird für den Werkstoff PA66-GF30 analog zu Kapitel 3.2 ermittelt. Die Differenzen zwischen simulierten und gemessenen Faserausrichtungen sind in der nachfolgenden Tabelle für vier unterschiedliche  $C_i$ -Werte aufgeführt.

Tabelle 2: Abweichung: simulierte und gemessene Faserorientierung (PA66-GF30).

| $C_i$                                  | 0,001   | 0,002   | 0,005   | 0,01   |
|--|---------|---------|---------|--------|
| $\bar{a}_{22}(Sim) - \bar{a}_{22}(CT)$ | -0,0151 | -0,0281 | -0,0681 | -1,117 |

Der Zusammenhang aus Tabelle 2 zwischen den Faserorientierungen und dem Faserinteraktionskoeffizienten kann gemäß Gl. 7 beschrieben werden mit:

$$f_{PA66\ GF30}(C_i) = (194587 \cdot e^{6000 \cdot C_i})^{-1} + 26352,250 \cdot C_i^2 - 14,289 \cdot C_i \quad (9)$$

Der Kurvenverlauf der Anpassungsfunktion ist in Abbildung 8 dargestellt. Der Nulldurchgang der Funktion liegt nahe am Ursprung.

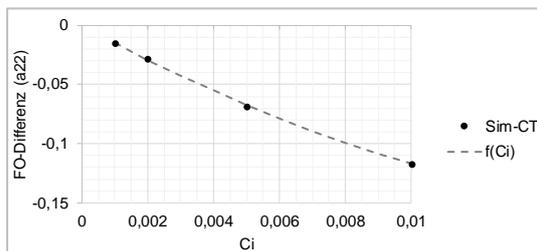


Abbildung 8: Funktionsverlauf des Faserinteraktionskoeffizienten  $C_i$  (PA66-GF30).

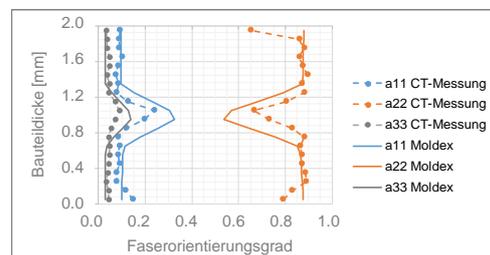


Abbildung 9: Verbesserte Beschreibung der lokalen Faserorientierung.

Da der  $C_i$ -Wert nicht kleiner als 0,001 sein sollte, um eine stabile Simulation zu gewährleisten [5], wird dieser Wert verwendet. Die simulierte Faserorientierung ist der gemessenen Faserorientierung in Abbildung 9 gegenübergestellt. Im Vergleich zum bisherigen Vorgehen wird eine deutliche Verbesserung erreicht. Die simulierte Faserorientierung in Y-Richtung (22-Richtung) weicht lediglich um 0,51% im Mittel vom Messergebnis ab.

#### 4 Struktursimulation

Quasistatische Zugversuche mit unterschiedlicher Faserausrichtung werden FEM-Berechnungen gegenübergestellt, um herauszufinden, in welchem Maß der Faserinteraktionskoeffizient  $C_i$  das mechanische Verhalten beeinflusst. Die FEM-Berechnungen unterscheiden sich insofern voneinander, als dass Spritzgießsimulationen mit unterschiedlichen  $C_i$ -Werten eingesetzt werden, analog zu den Gegenüberstellungen in Kapitel 3.1,

3.2 und 3.3. Die Zugprüfstäbe haben eine Faserorientierung von  $0^\circ$ ,  $30^\circ$  und  $90^\circ$  zur Belastungsrichtung. Die Geometrie der Zugproben ist in [15] beschrieben. Der Vorteil gegenüber einer Probe nach DIN EN ISO 527 1A [16] liegt darin, dass bei diesem Probekörper die Dehnung optisch gemessen werden kann, da der Messbereich des Probekörpers breiter und kürzer ist [17]. In Abbildung 10 sind die Spannungs-Dehnungskurven der Zugversuche in  $0^\circ$ -,  $30^\circ$ - und  $90^\circ$ -Faserorientierung den Simulationsergebnissen für PBT-GF30 gegenübergestellt. Die Zugversuchsergebnisse entsprechen den Mittelwerten von jeweils 15 Versuche.

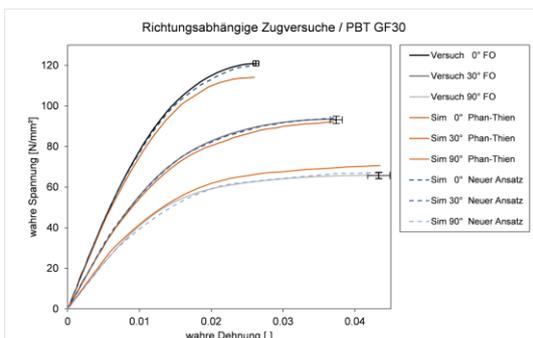


Abbildung 10: Gegenüberstellung Zugversuche (PBT-GF30)

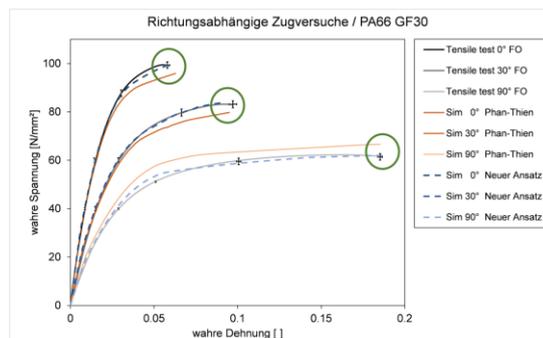


Abbildung 11: Gegenüberstellung Zugversuche (PA66-GF30)

Der Spannungs-Dehnungsverlauf des Zugversuchs kann mit der in diesem Beitrag vorgestellten Anpassung gut vorhergesagt werden. Speziell bei einer  $0^\circ$ - und  $90^\circ$ -ausgerichteten Zugprobe ist eine Verbesserung zu erkennen. Im Gegensatz dazu ist zwischen den Simulationsergebnissen, bei denen der  $C_i$  Wert nach Phan-Thien et al. [5] ermittelt wird, eine größere Abweichung zu erkennen. Auch für den Werkstoff PA66-GF30 kann mit den vorgestellten Methoden eine hinreichend genaue Vorhersage des Deformationsverhaltens sowie des Versagens beschrieben werden (siehe Abbildung 11). Die Simulationsergebnisse unter Verwendung der hier vorgestellten Methode zur Anpassung des  $C_i$ -Werts bilden das Werkstoffverhalten gut ab. Auch für diesen Werkstoff ist eine Verbesserung im Vergleich zur bisherigen Berechnung zu sehen. Dies ist insbesondere kurz vor Versagen der Zugprüfstäbe erkennbar (siehe grün markierter Bereich).

## 5 Fazit und Ausblick

Im aktuellen Beitrag wird eine anwendungsorientierte Methode vorgestellt, um den Faserinteraktionskoeffizient zu bestimmen. Im Vergleich zu dem nach Phan-Thien et al. [5] berechneten Faserinteraktionskoeffizienten  $C_i$  kann eine Verbesserung der Ergebnisse aufgezeigt werden. Die über die Dicke gemittelte simulierte Faserorientierung stimmt für zwei untersuchte kgfv Kunststoffe sehr gut mit den gemessenen Orientierungen überein. Darüber hinaus ist die einfache Anpassung des  $C_i$ -Werts ist mit der vorgestellten Methode gegeben. Außerdem resultiert die genauere Vorhersage der lokalen Faserausrichtung in der Füllsimulation zu einer verbesserten Beschreibung des mechanischen Werkstoffverhaltens in der Struktursimulation der beiden untersuchten Werkstoffe, sowohl hinsichtlich dem Deformationsverhalten als auch in Bezug auf das Versagen.

**Literatur**

- [1] Wolfgang Korte: Technische Kunststoff Bauteile besser dimensionieren. Faserorientierung in der Simulation, Hanser Verlag, Zeitschrift Kunststoffe, 11 (2003), S. 70–73
- [2] Lindemann: Methodische Entwicklung technischer Produkte. Springer Verlag 2006
- [3] Stommel, M., Stojeck, M. u. Korte, W.: FEM zur Berechnung von Kunststoff- und Elastomerbauteilen. Karl Hanser Verlag 2008
- [4] O.Pierard, C.Friebel, I.Doghri: Mean Field Homogenisation of Multi Phase Thermo Elastic Composites. Composites Science and Technology 64 (2004) 10, S. 1587–1603
- [5] Zheng, R., Tanner, R. I. u. Fan, X.-J.: Injection Molding Integration of Theory and Modeling Methods. Springer-Verlag 2011
- [6] Jeffery, G. B.: The Motion of Ellipsoidal Particles Immersed in a Viscous Fluid. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 102 (1922) 715, S. 161–179
- [7] Folgar, F. u. Tucker, C. L.: Orientation Behavior of Fibers in Concentrated Suspensions. Journal of Reinforced Plastics and Composites 3 (1984), S. 98–119
- [8] Markov, A. V.: Rheologisches Verhalten hochgefüllter Kunststoffe. Einfluss der Füllstoffes. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 39 (2008) 3, S. 227–233
- [9] Pflamm, J.: Auslegung und Dimensionierung von kurzfaserverstärkten Spritzgussbauteilen. Material- und Geowissenschaften, Technischen Universität Darmstadt PhD Thesis 2001
- [10] Foss, P., Huan-Chang, T., Snawerdt, J., Yuan-Jung, C., Wen-Hsien, Y. u. Chia-Hsiang, H.: Prediction of Fiber Orientation Distribution in Injection Molded Parts Using Moldex3D Simulation. POLYMER COMPOSITES 35 (2014) 4, S. 672–680
- [11] Wang, J., O’Gara, J. F. u. Tucker, C. L.: An objective model for slow orientation kinetics in concentrated fiber suspensions: Theory and rheological evidence. Journal of Rheology 52 (2008) 5, S. 1179
- [12] US 8571828 B2
- [13] Ferrano, F., Stommel, M. u. Lipka, A.: Der Einfluss von Prozessparametern auf das mechanische Verhalten kurzfaserverstärkter Kunststoffbauteile in Lenksystemen. Journal of Plastics Technology (2015), S. 271–304
- [14] Kaiser, J. M.: Beitrag zur Berechnung kurzfaserverstärkter Kunststoffe - Deformation und Versagen, Lehrstuhl für Polymerwerkstoffe, Universität des Saarlandes PhD Thesis 2013
- [15] Becker, F.: Entwicklung einer Beschreibungsmethodik für das mechanische Verhalten unverstärkter Thermoplaste bei hohen Deformationsgeschwindigkeiten, Zentrum für Ingenieurwissenschaften, Martin-Luther-University Halle Wittenberg PhD Thesis 2009
- [16] DIN EN ISO 527-2
- [17] Ferrano, F.: Auslegung und Berechnung von kurzglasfaserverstärkten Kunststoffbauteilen in Lenksystemen, Lehrstuhl für Kunststofftechnologie, Technische Universität Dortmund PhD Thesis 2017