Validierung eines Ansatzes zur Simulation kurzfaserverstärkter Thermoplaste in frühen Entwurfsphasen

Christian Witzgall, Sandro Wartzack
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Abstract

A simplified approach towards a simplified integrative simulation for short fibre reinforced polymers (SFRP) has been proposed by Gruber and Wartzack. It uses orientation information from injection moulding simulation directly inside a structural or crash simulation. For describing the complex material behavior of SFRP, a layerwise stacking of simple material models is used. Thus, only standard material models which can be computed efficiently have to be used. Within the present paper, the simulative approach is to be verified and validated, i.e. the physical plausibility and the usability for loadcases with elevated strain rates are examined.

Keywords: integrative simulation; material modelling; drop test; validation

1 Einführung

Bauteile aus kurzfaserverstärkten Thermoplasten (KVTP) werden zunehmend im modernen Fahrzeugbau eingesetzt, da sie über hervorragende mechanische Eigenschaften bei gleichzeitig geringer Dichte verfügen. Zudem existiert mit dem Spritzgießen ein Fertigungsverfahren, mit dem große Bauteilstückzahlen wirtschaftlich hergestellt werden können [1]. Die mechani-

schen Eigenschaften der KVTP hängen stark von der Verteilung und Orientierung der Verstärkungsfasern im Bauteil ab, die maßgeblich vom Herstellungsprozess festgelegt werden und das Materialverhalten ist durch Nichtlinearität, Plastizität und Dehnratenabhängigkeit geprägt [2]. Daher stellt eine simulative Vorhersage des strukturellen Verhaltens von Bauteilen aus KVTP eine Herausforderung dar, die nur durch eine Kopplung von Prozess- und Strukturssimulation zufriedenstellend gelöst werden kann – die so genannte integrative Simulation.

Um diese Art der rechnerunterstützten Absicherung der Produkteigenschaften bereits frühzeitig im Produktentwicklungsprozess anwenden zu können, wurde von Gruber und Wartzack der Ansatz *„IS4ED – Integrative Simulation for Early Design Stages“* entwickelt, der eine ausreichend hohe Ergebnisgüte mit einem vertretbar geringen Berechnungsaufwand kombiniert. Er soll in der frühen Entwurfsphase (nach Pahl/Beitz, [3]) eingesetzt werden, wenn erste CAD-Modelle vorliegen [4]. In dieser Phase kann beispielsweise durch eine geschickte Wahl der Angussstellen und eine schmelzflussgerechte Konstruktion noch maßgeblich Einfluss auf die Faserorientierung im Bauteil genommen werden.

2 Der Ansatz IS4ED

Der IS4ED-Ansatz kann in zwei Hauptschritte gegliedert werden: die Ermittlung der Faserorientierung sowie die Definition eines geeigneten Materialmodells.

2.1 Ermittlung und Übertragung der Faserorientierung

Durch eine Spritzgusssimulation erfolgt die Berechnung der Faserorientierung im Bauteil. Dazu wird die Bewegung der kurzen, stabförmigen Fasern in einem viskosen Fluid, hier der Kunststoffschmelze, analysiert [5][6].

Nach Advani und Tucker [7] kann der Orientierungszustand für jeden Netzknoten durch einen Tensor zweiter Ordnung, $\boldsymbol{a}_{ij}$, dargestellt werden. Seine Eigenvektoren $\boldsymbol{e}_i$ stellen die Orientierungsrichtung, seine Eigenwerte λ_i den Orientierungsgrad dar. Daraus ergibt sich die häufig verwendete Visualisierung des dreidimensionalen Orientierungszustandes durch einen Ellipsoid, wie dargestellt in Bild 1.

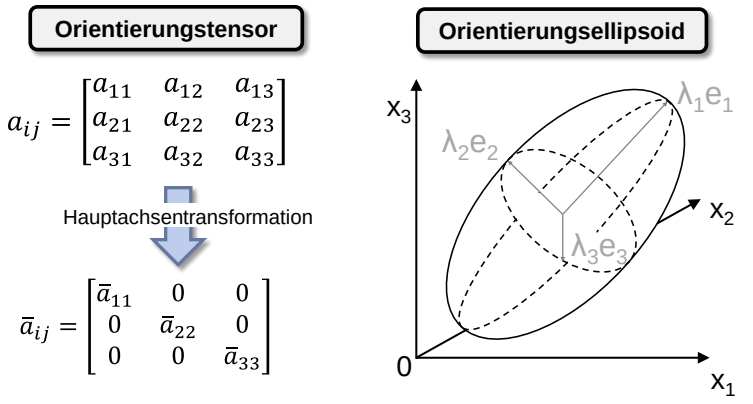

Bild 1: Darstellung der Faserorientierung als Ellipsoid nach [4]

Um den ermittelten dreidimensionalen Orientierungszustand für die Struktursimulation mit zweidimensionaler Schalenvernetzung nutzbar zu machen werden die Orientierungsellipsoiden zunächst tensoriell gemittelt und anschließend in die Schalenebene projiziert, sodass sich daraus eine Orientierungsellipse ergibt, die allein durch den Orientierungswinkel und die Länge ihrer Hauptachse beschreibbar ist. [4]

2.2 Materialbeschreibung durch Superposition von Materialmodellen

Das komplexe Materialverhalten von KVTP wird nach Schöpfer [8] durch Überlagerung zweier Materialmodelle abgebildet. Zum Einsatz kommen ein transversal-isotropes und ein isotropes, elastisch-plastisches Materialmodell mit dehnratenskalierter Fließspannung, die den Integrationspunkten eines Schalenelements jeweils abwechselnd übergeben werden. Das Schema dieser schichtweisen Überlagerung ist dargestellt in Bild 2. Der so erzeugte Schichtaufbau in der Simulation repräsentiert nicht die verschiedenen Fließschichten der spritzgegossenen Thermoplaste. Stattdessen soll auf diese Weise das makroskopische Materialverhalten abgebildet werden.

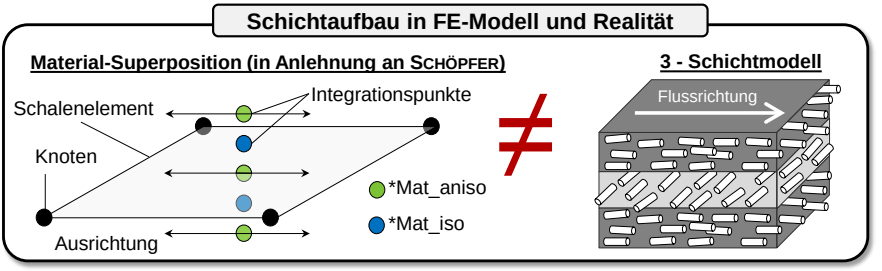

Bild 2: Schichtung von anisotropen und isotropen Materialmodellen nach [4]

Während die Dehnungen an allen Integrationspunkten eines Schalenelements gleich sind weichen die Spannungen in Folge der unterschiedlichen Materialmodelle voneinander ab. Durch eine gewichtete Mittelung der Einzelspannungen mit der zugewiesenen Dicke der Integrationspunkte kann eine tatsächliche Spannung errechnet werden:

$$\overline{\sigma}_{xx} = \sum_{i=1}^{i=n} \sigma_{xx,i} \cdot \frac{t_i}{t_{total}}$$

Dabei sind $\overline{\sigma}_{xx}$ die gemittelte Spannung, $\sigma_{xx,i}$ die Spannung der i-ten Schicht und t_i bzw. t_{total} die Dicken der i-ten Schicht bzw. die Gesamtdicke.

Diese Art der Materialbeschreibung erlaubt es, mit Hilfe von recheneffizienten, einfachen Materialmodellen, dennoch ein komplexes Materialverhalten abzubilden. In [9] konnten damit auch thermische Effekte wie Aufweichen erfasst werden, indem in weitere Schichten temperaturabhängige Materialmodelle eingebettet wurden.

3 Kalibrierung der Materialmodelle

Die für die Materialbeschreibung erforderlichen Kennwerte werden durch hochdynamische Zerreißversuche und statische Biegeversuche ermittelt [4]. Aus den daraus gewonnenen Spannungs-Dehnungs-Dehnraten-Kurven werden den Materialmodellen ihre Eingangsgrößen übergeben. Dies geschieht durch Parameteroptimierung mit iterativer Anpassung der virtuellen Versuche. Die zu optimierenden Kennwerte ergeben sich aus den verschiedenen Materialmodellen: für die Schichten mit anisotropem Material sind die Elastizitätsmoduln parallel und orthogonal zur Faserorientierung sowie der Schubmodul zu bestimmen, für die isotropen Schichten, die auch die Plastizität abbilden

sollen ein isotroper Elastizitätsmodul sowie Fließspannung und Fließkurve. Zudem müssen die Schichtdicken der anisotropen und isotropen Schichten ermittelt werden. [2]

Im hochdynamischen Versuch können keine konstanten Dehnraten erreicht werden, Spannungs-Dehnungs-Kurven mit konstanter Dehnrate sind jedoch für die Skalierung der dehnratenabhängigen Werkstoffverfestigung zwingend erforderlich [10], [11]. Bild 3 zeigt den Vorgang zur Gewinnung dehnratenkonstanter Spannungs-Dehnungs-Kurven. Der Übersichtlichkeit halber sind in diesem Beispiel nur zwei Versuchskurven verwendet worden: eine für einen quasistatischen Versuch mit tatsächlich annähernd konstanter Dehnrate und eine für einen hochdynamischen Versuch, bei dem die Dehnrate über die Dehnung ansteigt. Über die einzelnen Versuchskurven – im Praxisfall mehr als im Bild dargestellt – wird eine Antwortfläche gelegt, die den Zusammenhang zwischen Spannung, Dehnung und Dehnrate kontinuierlich modelliert. Durch Schneiden der Antwortfläche können dehnratenkonstante Kurven erzeugt werden, die als Grundlage für die Simulation herangezogen werden können. [9]

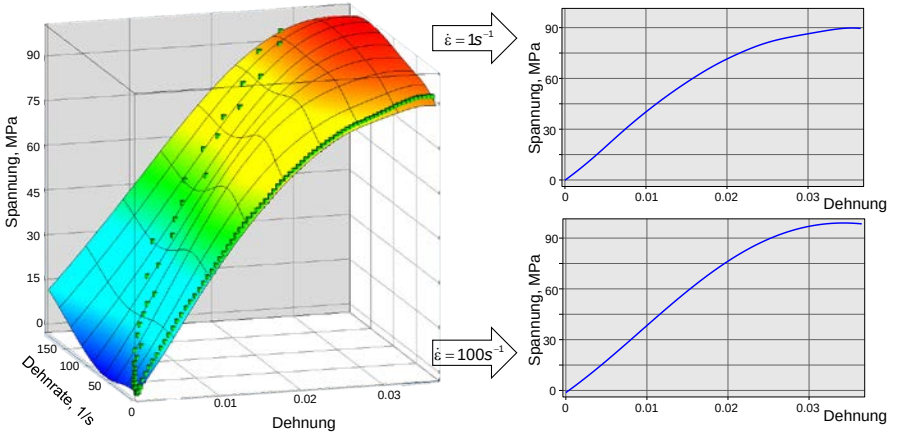

Bild 3: Ableiten dehnratenkonstanter Spannungs-Dehnungs-Kurven

Die Information über maximal ertragbare Spannungen und Dehnungen des Werkstoffs entstammen den Zerreißversuchen und werden in die anisotropen Versagenskriterien der Materialbeschreibung übernommen. Die Biegeversuche werden nach [4] nicht bis zum Versagen des Materials getrieben

und daher kann daraus keine Information über die Festigkeitskennwerte gewonnen werden.

4 Physikalische Verifizierung der Materialbeschreibung

In [12] wird Verifizierung definiert als „Bestätigung durch Bereitstellung eines objektiven Nachweises, dass festgelegte Anforderungen erfüllt worden sind“. Dazu wird die Einhaltung des Energieerhaltungssatzes als grundlegende Anforderung überprüft. Dies geschieht zunächst mit einem einfachen Modell eines Zugstabes, der gedehnt wird und mit einem ersten Modell eines Impaktorversuchs.

Im Fall des elastisch gedehnten Zugstabs muss das Hooke’sche Gesetz erfüllt werden, d.h. die Steigerung der inneren Energie proportional zum Quadrat der Verschiebung sein. Dieses Verhalten kann in der Simulation beobachtet werden und ist in Bild 4 dargestellt. Damit zeigt sich, dass durch die Schichtung der Materialmodelle kein Fehler entsteht.

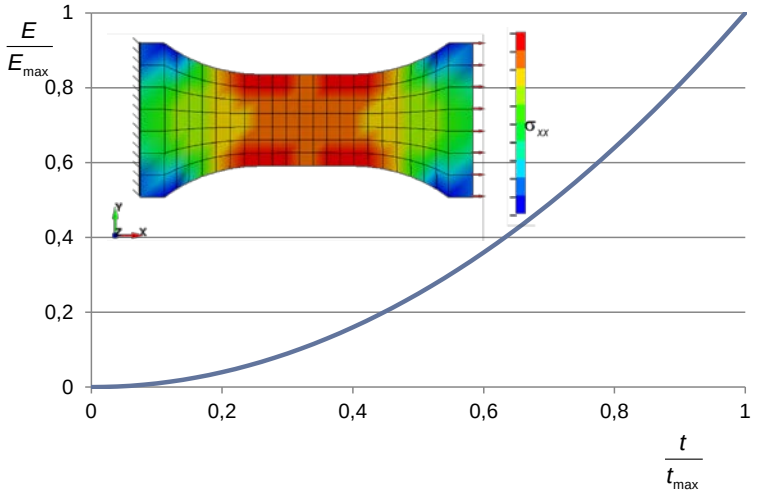

Bild 4: Verlauf der inneren Energie bei elastischer Vorspannung

In einem nächsten Schritt wird eine Simulation eines Fallturmversuches, wie er auch im folgenden Kapitel durchgeführt wird, herangezogen, um damit die Verifizierung der Materialbeschreibung auch bei großen Deformationen zu erbringen. Zu Beginn des betrachteten Zeitraums verfügt der bewegte Impaktor über kinetische Energie, die beim Aufprall in Deformation, also innere

Energie umgewandelt wird. Die Gesamtenergie im System muss stets konstant bleiben.

Bild 5 zeigt den zeitlichen Verlauf von kinetischer, innerer und Gesamtenergie ohne Verwendung eines Versagenskriteriums. Die kinetische Energie zeigt bis t= 0,3 ms einen konstanten Verlauf gleich der Gesamtenergie. Ab dann wird sie bis zum Stillstand des Impaktors bei t= 3,2 ms direkt in innere Energie umgewandelt; Verluste durch Reibung oder Luftwiderstand bleiben in der Simulation unberücksichtigt. Nach ca. 2 ms tritt ein Abknicken beider Energiekurven auf, danach nimmt die Umwandlungsrate der Energie ab. Dies kennzeichnet den Bereich der plastischen Deformation, für den eine geringere Steifigkeit charakteristisch ist. In der vorliegenden Simulation wird der Impaktor nach ca. 3,3 ms wieder zurückgefedert. Die Gesamtenergie ist über die gesamte Betrachtungsdauer konstant. Damit kann das Ergebnis der Simulation als physikalisch gültig betrachtet werden.

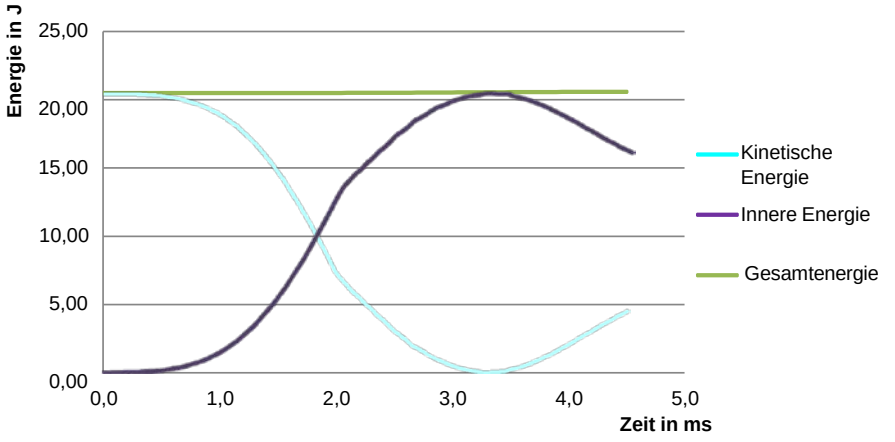

Bild 5: Verlauf von kinetischer, innerer und Gesamtenergie

Im Vergleich zu anderen, bereits etablierten Materialgesetzen, bei denen keine Superposition vorgenommen wird, ergeben sich keine Auffälligkeiten oder Abweichungen. Daher kann die Materialbeschreibung als verifiziert betrachtet werden.

Die beschriebene Simulation wurde ohne Einsatz eines Versagenskriteriums durchgeführt. Das Versagen, das heißt die Löschung von Elementen, beispielsweise nach Überschreitung eines definierten Spannungswertes, führt dazu, dass mit dem Element auch die in ihm gespeicherte Energie vernichtet

und somit aus dem System abgeführt wird. In diesem Fall verringert sich die Gesamtenergie um den entsprechenden Wert.

5 Validierung der Materialbeschreibung durch Fallturmversuche

Validierung bezeichnet die „Bestätigung durch Bereitstellung eines objektiven Nachweises, dass die Anforderungen für einen spezifischen beabsichtigten Gebrauch oder eine spezifische beabsichtigte Anwendung erfüllt worden sind“ [12]. Zur Validierung des Simulationsansatzes werden Fallturmversuche durchgeführt, deren Ergebnisse mit denen der entsprechenden Simulationen abgeglichen werden. Durchgeführt werden Versuche mit Fallhöhen von 200 mm, wobei die Position und die Geschwindigkeit des Impaktors optisch mittels Hochgeschwindigkeitskameras bestimmt werden. Der verwendete Fallturm ist dargestellt in Bild 6.

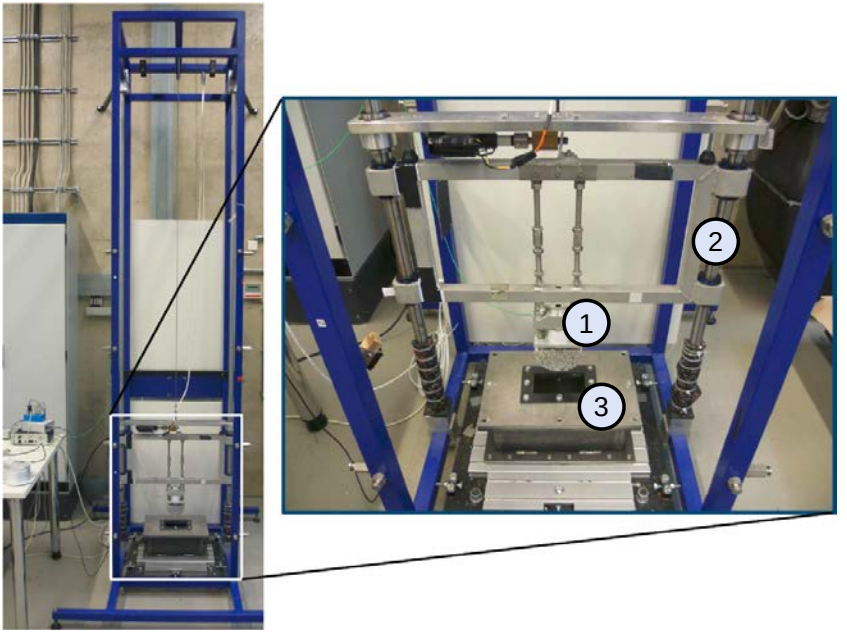

Bild 6: Versuchsaufbau der Fallturmversuche; (1): Impaktor, (2): Vertikalführung, (3): Einspannung

Aus der festgelegten Fallhöhe und der Masse des Aufbaus ergibt sich eine theoretische Aufprallgeschwindigkeit von 1780 mm/s. Reibungsbedingt liegt die tatsächlich erreichte Geschwindigkeit im Mittel aus fünf Wiederholungen

bei ca. 1650 mm/s. Die dabei erreichten Dehnraten können nach [8] abgeschätzt werden wie folgt:

$$\dot{\varepsilon} \approx \frac{6 \cdot v_0 \cdot d}{l_b^2} \approx 5 \frac{1}{\mathrm{s}}$$

Dabei sind l_b die kurze freie Biegelänge, hier 70 mm, d die zu 2,52 mm gemittelte Plattendicke aus je drei Messungen pro Platte und v_0 die Aufprallgeschwindigkeit.

Für die Simulation werden lediglich die zu durchschlagende Platte und der Impaktor modelliert, der mit einer zusätzlichen Masse beaufschlagt wird um den weiteren bewegten Teilen des Versuchsaufbaus Rechnung zu tragen. Dem Impaktor wird als initiale Geschwindigkeit in negativer Z-Richtung die mittlere gemessene Aufprallgeschwindigkeit der Versuche übergeben, Verschiebungen in andere Koordinatenrichtungen werden wie im Experiment gesperrt. Die Platte ist zentrisch unter dem Impaktor platziert und wird an ihren Randknoten fest eingespannt. Der Aufbau ist dargestellt in Bild 7.

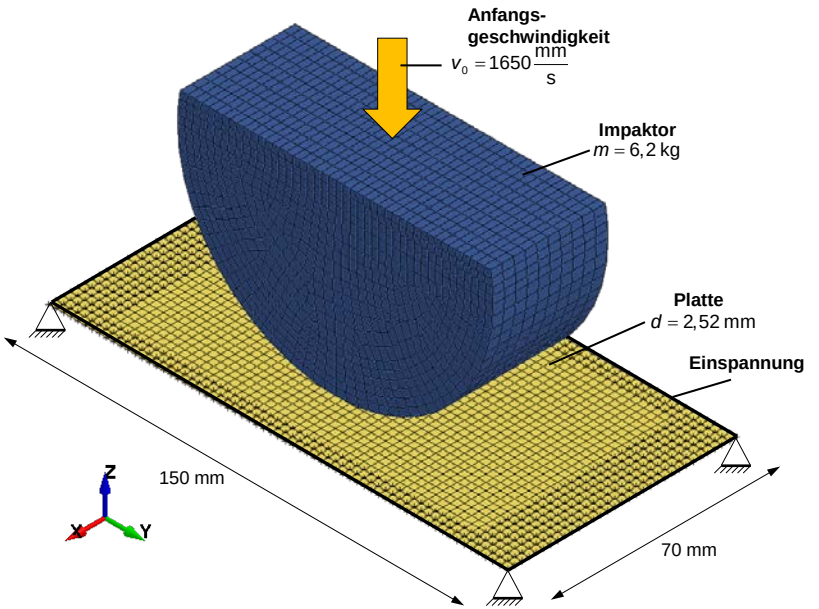

Bild 7: Aufbau der Impaktorsimulation

Verglichen werden sowohl die Position wie auch die Geschwindigkeit in negativer Z-Richtung. Die gemessenen Werte sind über die fünf durchgeführten Versuche gemittelt. Der Verlauf der Kurven ist dargestellt in Bild 8. Es zeigt sich, dass die Simulation ein insgesamt steiferes Verhalten der Platte beschreibt als die Messdaten. Dies ist an der betragsmäßig geringeren Eindringtiefe und der geringeren Geschwindigkeit ablesbar. Die Abweichung der Eindringtiefe liegt im Endzustand bei rund 6%.

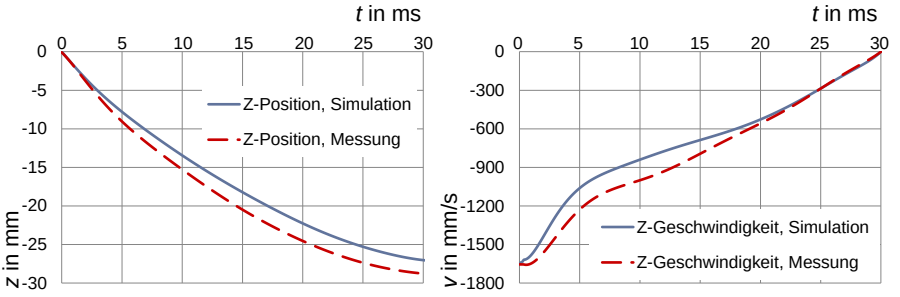

Bild 8: zeitlicher Verlauf von Position und Geschwindigkeit des Impaktors

Für diese Beobachtung können verschiedene Gründe verantwortlich sein: während in der Simulation eine makellose, homogene Platte mit über ihrer Dicke konstanten Faserorientierung angenommen wurde, ist die reale Platte gekennzeichnet von möglichen Fehlstellen wie Poren oder ungleichmäßig langen und möglicherweise durch vorangegangene Beanspruchungen nach außen nicht erkennbar gebrochenen Verstärkungsfasern. An derartigen Fehlstellen bei gleichzeitig hoher Beanspruchung beginnt im Experiment die Rissausbreitung. Zudem können bereits durch die Spritzgusssimulation abweichungsbehaftete Informationen über die Faserorientierung erhalten worden sein.

Eine Fehlerquelle kann ebenfalls aus der Kalibrierung der geschichteten Materialmodelle stammen: dort werden die Versagenskriterien lediglich aus Zugversuchen gewonnen. Die durchgeführten Biegeversuche dienen allein zur Optimierung der Elastizitätsmoduln, ob aus ihnen ein möglicherweise früher eintretendes Versagen – und damit geringere ertragbare Spannungen und Dehnungen – ableitbar wäre sollte in weiteren Arbeiten geprüft werden.

6 Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wird ein vereinfachtes Verfahren zur integrativen Simulation kurzfaserverstärkter Thermoplaste vorgestellt. Darin kommt eine Materialbeschreibung zum Einsatz, die das komplexe Werkstoffverhalten der KVTP durch Superposition einfacher Materialmodelle auf den verschiedenen Integrationspunkten abbildet.

Nach Kontrolle der physikalischen Plausibilität anhand Energiebetrachtungen kann zunächst festgestellt werden, dass sich auch bei Schichtung der Materialmodelle eine korrekte Energiebilanz ergibt. Sowohl bei rein elastischen wie auch bei plastischen Deformationen entsprechen die errechneten Ergebnisse den Erwartungen aus der Physik.

Durch den Vergleich experimenteller und virtueller Fallturmversuche sollte die Validität des Ansatzes im speziellen für die Anwendung auf Lastfälle mit erhöhten Dehnraten überprüft werden. Dabei ergibt sich, dass zwar ein qualitativ grundsätzlich korrektes Ergebnis erzielt wird, das jedoch gegenüber der Realität zu steif ausfällt. Diese Erkenntnis muss dem Berechner bei der Interpretation der Deformation im Simulationsergebnis bewusst sein, um keiner Fehleinschätzung aufzuliegen.

Eine Verbesserung des Materialversagens kann gegebenenfalls mit Durchführung der Biegeversuche in der Kalibrierung bis zum Versagen erreicht werden, die möglicherweise geringere Festigkeitswerte ergeben. Deren Einsatz in den Versagenskriterien des Materialmodells kann ein früheres Brechen der Platte in der Simulation bedingen und damit dem realen Verschiebungsverlauf des Impaktors näher kommen. In zukünftigen Arbeiten muss deshalb die Festigkeit des Materials in Biegeversuchen kontrolliert werden. Weiterhin kann eine gesonderte Untersuchung des Verhaltens unter Druckbeanspruchung Aufschluss darüber geben, ob die verwendete Annahme überhaupt haltbar ist, dass der Werkstoff sich unter Zug wie Druck identisch verhält.

Literatur

[1] Krivachy, R.: Charakterisierung und Modellierung kurzfaserverstärkter thermoplastischer Kunststoffe zur numerischen Simulation von Crashvorgängen. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, 2007.

[2] Gruber, G.; Liebst, F.; Wartzack, S.: Komplexitätsreduzierte integrative Struktursimulation kurzfaserverstärkter Kunststoffbauteile mit LS-Dyna. ANSYS Conference & 32th CADFEM Users‘ Meeting 2014.

[3] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. 8. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2013.

[4] Gruber, G.: “Ein Beitrag zur rechnerunterstützten Auslegung crashrelevanter kurzfaserverstärkter Kunststoffbauteile in der frühen Entwurfsphase“, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, 2014.

[5] Jeffery, G. B.: The Motion of Ellipsoidal Particles Immersed in a Viscous Fluid. Royal Society of London - Mathematical and Physical Sciences 102 (1922) 715, S. 161–179.

[6] Folgar, F.; Tucker, C. L.: Orientation Behavior of Fibers in Concentrated Suspensions. Journal of Reinforced Plastics and Composites 3 (1984) 2, S. 98–119.

[7] Advani, S.G.; Tucker C.L.: The use of tensors to describe and predict fiber orientation in short fiber composites. Journal of Rheology, 31(8), 1987, pp. 751-784.

[8] Schöpfer, J.: Spritzgussbauteile aus kurzfaserverstärkten Kunststoffen. Methoden der Charakterisierung und Modellierung zur nichtlinearen Simulation von statischen und crashrelevanten Lastfällen. Dissertation, TU Kaiserslautern, 2011.

[9] Witzgall, C.; Wartzack, S.: Simplified integrative simulation of short fibre reinforced polymers under varying thermal conditions. 10th European LS-DYNA Conference, Würzburg, 2015.

[10] Dehn, A.: Experimentelle Untersuchung und numerische Simulation des Crashverhaltens gewebeverstärkter Thermoplaste unter Temperatureinfluss. Dissertation, TU Kaiserslautern, 2001.

[11] Witkowski, K. et al.: “New Features in D-SPEX with Application”. In: Tagungsband zum 6. LS-DYNA Anwenderforum, Frankenthal, 2007.

[12] DIN EN ISO 9000:2014: Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe. Normenausschuss Qualitätsmanagement, Statistik und Zertifizierungsgrundlagen im DIN, 2014.