

Einfluss und Wechselwirkungen der Materialparameter in Formsimulationen faserverstärkter Thermoplaste

Jasmin Graef^{1,a}

¹Am Ramsberg 96, 58509 Lüdenscheid, Deutschland

^ajasmin.graef@mail.de

Keywords: Faserverstärkte Thermoplaste (FVT), Formsimulation, Materialcharakterisierung, Faserwinkel, Faltenbildung

Abstract. Bauteile aus gewebeverstärkten Thermoplasten (GVT) werden für den Leichtbau im Automobilbereich eingesetzt. Nach Erwärmung oberhalb des Schmelzbereichs lassen sich diese mit Thermoformverfahren zu Bauteilen formen. Die mechanischen Eigenschaften werden durch die nach dem Formprozess im Bauteil vorliegenden Faserwinkel im Verstärkungsgewebe sowie auftretender Falten beeinflusst. Somit liegt ein großes Interesse in der Entwicklung und Verbesserung von Simulationsmethoden zur Vorhersage der Faserwinkel und Faltenbildung. Die eingesetzten FE-Modelle erfordern die Charakterisierung des Materialverhaltens oberhalb der Schmelztemperatur bei verschiedenen Belastungsarten wie Scher-, Zug-, Druck- und Biegebeanspruchung. Aufgrund der Aufheizphasen sind die Materialversuche sehr zeitaufwändig. Im Rahmen von Sensitivitätsanalysen wird der Einfluss der einzelnen Eingabeparameter der Materialkarten sowie deren Wechselwirkungen untersucht. Dies erfolgt zunächst anhand der Simulation der einzelnen Materialversuche und anschließend anhand der Simulation der Bauteilformung eines Demonstrators, um den Einfluss der einzelnen Materialparameter auf die Vorhersagegenauigkeit hinsichtlich Faltenbildung und Faserwinkel bewerten zu können. Das Ziel der Untersuchungen ist die Definition der erforderlichen Materialversuche zur Implementierung in das Simulationsmodell sowie die Erarbeitung von Default-Werten für Materialparameter mit geringem Einfluss auf die Ergebnisse zur Reduktion des Versuchsaufwands.

Einführung

Faserverstärkte Thermoplaste (FVT) sind ein Werkstoffverbund aus Kurz-, Lang-, oder Endlosfasern, die in eine Matrix aus thermoplastischem Kunststoff eingebettet sind. Endlosfasern können dabei in Form von Geweben vorliegen und in mehreren Lagen geschichtet zu plattenförmigen Halbzeugen vorkonsolidiert werden. Diese lassen sich nach der Erwärmung über den Schmelzbereich des Thermoplasts mittels Thermoformverfahren zu Bauteilen verarbeiten, welche für Leichtbauanwendungen im Automobilbereich oder der Luftfahrt eingesetzt werden. Die Formung der Bauteilkontur erfolgt dabei durch eine Verlagerung der Verstärkungsfasern innerhalb der aufgeschmolzenen Thermoplast-Matrix. Die primär auftretenden Mechanismen sind die Gewebescherung, das Zwischenschichtgleiten und die Gewebestreckung [1].

Die Prozessentwicklung wird durch Simulationen mittels Finite-Elemente-Methode (FEM) unterstützt, mit dem Ziel der Vorhersage der Geometrie, insbesondere der Faltenbildung, sowie der Faserorientierung nach dem Formprozess, da diese die richtungsabhängige Festigkeit und Steifigkeit des Bauteils entscheidend beeinflussen.

GVT haben ein stark unterschiedliches Steifigkeitsverhalten bei Zug-, Druck-, Scher- und Biegebelastung. Die Fasern weisen sehr hohe Steifigkeiten in Zugrichtung auf. Die Biegesteifigkeit ist hingegen sehr gering. Im Vergleich zu metallischen Werkstoffen kann die Biegesteifigkeit des Faserverbunds nicht von dem Zug-E-Modul abgeleitet werden. Daher werden die Steifigkeitseigenschaften von GVT in den Simulationsmodellen voneinander entkoppelt modelliert.

In den vorliegenden Untersuchungen wird ein Simulationsmodell in ABAQUS/EXPLICIT verwendet, das auf der Verwendung einer sogenannten Einheitszelle basiert. Diese Einheitszelle besteht aus einem Membranelement zur Abbildung der Steifigkeiten in der Ebene sowie Balkenelementen zur Abbildung der Biegesteifigkeit.

Zur Durchführung der Formsimulationen ist es erforderlich, die Materialeigenschaften hinsichtlich Zug-, Druck-, Scher- und Biegesteifigkeit in Abhängigkeit der Temperatur zu bestimmen. Eine Standardisierung der Versuche liegt derzeit nicht vor. In der Literatur werden verschiedene Methoden der Materialcharakterisierung aufgezeigt, die teilweise aus genormten Prüfverfahren der Textilbranche abgeleitet oder übernommen werden. Aufgrund der Aufheizphasen sind die Materialversuche sehr zeitaufwändig.

In den folgenden Untersuchungen wird im Rahmen von Sensitivitätsanalysen der Einfluss der einzelnen Eingabeparameter der Materialkarten sowie deren Wechselwirkungen untersucht. Dies erfolgt zunächst anhand der Simulation der einzelnen Materialversuche und anschließend anhand der Simulation der Bauteilformung eines Demonstrators, um den Einfluss der einzelnen Materialparameter auf die Vorhersagegenauigkeit hinsichtlich Faltenbildung und Faserwinkel bewerten zu können. Das Ziel der Untersuchungen ist die Definition der erforderlichen Materialversuche zur Implementierung in das Simulationsmodell sowie die Erarbeitung von Default-Werten für Materialparameter mit geringem Einfluss auf die Ergebnisse zur Reduktion des Versuchsaufwands.

Im Rahmen von Materialversuchen wird zunächst eine Datenbasis für die Formsimulationen geschaffen. Das Simulationsmodell wird anschließend anhand der Simulation der Materialversuche sowie des Demonstrators validiert, um die darauffolgenden Sensitivitätsanalysen unter Berücksichtigung der realen Bauteilgeometrien bewerten zu können.

FE-Modell

Einheitszelle. Bei einer semi-diskreten Modellbildung erfolgt die Modellierung einer kleinsten, sich wiederholenden Einheit, der sogenannten Einheitszelle, die aus einer Kombination verschiedener Elemente und Materialgesetze besteht. Es gibt verschiedene Ansätze der semi-diskreten Modellbildung, bei der die Biegesteifigkeit von der Scher- und Zugsteifigkeit in der Ebene entkoppelt wird. Dies erfolgt durch Kombination von Membran- und Schalenelementen [2], Membran- und Balkenelementen [3] oder Schalen- und Balkenelementen [4].

Abb. 1 zeigt die in vorangegangenen Studien verwendete Einheitszelle aus Membran- und Balkenelemente in ABAQUS/EXPLICIT. Das Membranelement hat dabei die Materialkarte *Fabric. Dabei handelt es sich um ein phänomenologisches Modell für Membranelemente, das auf Versuchsdaten basiert und die Zug-, Druck-, und Schersteifigkeit von Fasergewebe abbilden kann, welche zwei Faserrichtungen, Kette und Schuss, aufweisen. Die lokalen Faserspannungen werden dabei als Funktion der Winkeländerungen zwischen den Fasern und Normaldehnungen in Faserrichtung definiert. Das mechanische Verhalten bei Zug- und Scherbeanspruchung ist voneinander entkoppelt. [5]

Membranelemente haben keine Biegesteifigkeit. Diese wird in der verwendeten Einheitszelle durch Balkenelemente modelliert. Die Anordnung der Balkenelemente erfolgt nach dem Checkerboard-Netz (Chck). Dabei besteht eine Einheitszelle aus vier Membranelementen und vier Balkenelementen, die diagonal zu den Membranelementen verlaufen [6] (siehe Abb. 1).

Die Verwendung von Balkenelementen zur Abb. der Biegesteifigkeit im Simulationsmodell hat im Vergleich zu Schalenelementen den Vorteil, dass die Anisotropie der Biegesteifigkeit durch die geometrische Anordnung der Balkenelemente gegeben ist und somit ein isotropes Materialmodell eingesetzt werden kann.

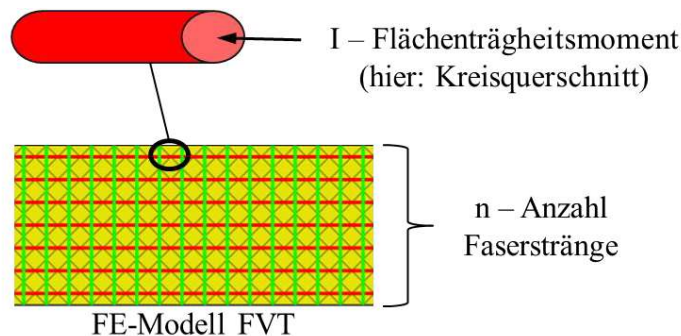


Abb. 1: Checkerboard-Netz mit Membran- und Balkenelementen [7]

Materialcharakterisierung

Versuchsmaterial. Das untersuchte Material besteht aus einem 2/2 Köpergewebe aus Glasfasern mit einem Flächengewicht von $600 \frac{g}{m^2}$, das mit drei Gewebelagen in eine Polyamid 6 Matrix eingebettet ist. Die Herstellerbezeichnung ist: TEPEX®Dynamite 102-RG600(3)/47% von BondLaminates.

Die Scherspannung-Scherwinkel-Kurven (siehe Abb. 2) sind anhand des Bias-Extension-Tests (BET) ermittelt worden. Der BET ist ein Zugversuch einer rechteckförmigen Probe unter 45° zur Faserrichtung, wobei der Mechanismus der Gewebescherung hervorgerufen wird. Dabei handelt es sich um eine Änderung des Winkels zwischen zweier sich kreuzender Faserbündel im Gewebe, der anfangs 90° beträgt. Beim BET kann die Winkeländerung während des Versuchs nicht anhand der Längenänderung der Probe ermittelt werden, da der Mechanismus des Faserschlupfs, einem Abgleiten der Faserbündel aufeinander, überlagert wird. Somit wird die Winkeländerung zwischen den Faserbündeln optisch anhand eines Matlab-Programms, das in [9] näher beschrieben wird, bestimmt.

Die verwendeten Proben der Scherspannung-Scherwinkel-Kurven, die in Abb. 2 dargestellt werden, weisen ein Längen-Breiten-Verhältnis von 3 auf, eine Prüftemperatur von 260°C sowie eine Prüfgeschwindigkeit von 200 mm/min . Die Proben unterscheiden sich in der Richtung des Zuschnitts, wodurch die Drehrichtung der Gewebescherung beeinflusst wird. Bei einem positiven Scherwinkel (pos) vergrößert sich der Winkel zwischen zwei Faserbündeln und bei einem negativen Scherwinkel (neg) verkleinert sich der Winkel zwischen zwei Faserbündeln. Ein positiver Scherwinkel resultiert aus einer geringeren Scherspannung und der erreichbare maximale Scherwinkel ist größer (siehe Abb. 2). Dieses Verhalten wird im vorliegenden Simulationsmodell berücksichtigt.

Die Biegesteifigkeit ist anhand des Cantilever-Bending-Tests ermittelt worden. Dabei wird eine rechteckförmige Probe mit konstanter Geschwindigkeit über eine schiefe Ebene von $41,5^\circ$ geschoben, bis die Probe auf dieser auftrifft. Die Biegesteifigkeit der Probe wird dabei anhand der Überhanglänge, die identisch mit dem Verfahrensweg ist, und der Längengewichtskraft der Probe bestimmt [10].

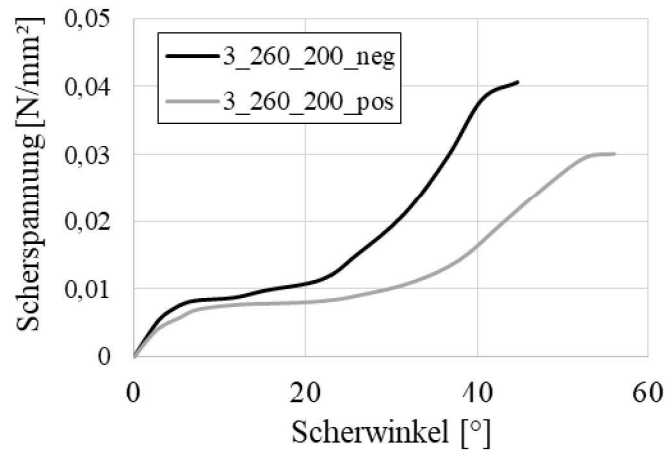


Abb. 2: Scherspannung-Scherwinkel-Kurven Bias-Extension-Test

Zur Validierung der Biegesteifigkeit im Simulationsmodell, verwenden [11] und [12] einen weiteren Versuch, der eine Durchbiegung der Probe hervorruft. Eine ebenfalls rechteckförmige Probe wird an zwei Seiten fest eingespannt und zusammengeschoben. Dabei entsteht eine Wölbung der Probe, deren Höhe und Position von der Versuchstemperatur abhängt. In der vorliegenden Studie wird dieser Versuch als „Vertikaltest Druck“ bezeichnet. Er wird dazu herangezogen, den Parameter der Biegesteifigkeit im Simulationsmodell nach der Validierung anhand des Cantilever-Bending-Tests zu überprüfen und zudem eine mögliche Wechselwirkung der Parameter Druck- und Biegesteifigkeit zu identifizieren. Dies erfolgt anhand eines Vergleichs der Höhe und Position der entstehenden Wölbung an der Probe. Ein unmittelbarer Parameter wird dem Materialversuch „Vertikaltest Druck“ nicht entnommen.

Die Drucksteifigkeit, die als Startwert für die Simulationen verwendet wird, wird mit 20 % der Zugsteifigkeit angenommen und basiert auf den Ergebnissen der in [13] veröffentlichten Studie zur Ermittlung des Steifigkeitsverhaltens eines Leinwandgewebes anhand eines Mesoskalen-Modells.

Der Zug-E-Modul ist anhand eines trockenen Gewebes nach DIN EN ISO 527-1/-4 ermittelt worden. Der ermittelte Wert wird in dieser Studie auch für die Zugsteifigkeit des Faserverbunds verwendet unter der Annahme, dass bei aufgeschmolzener Thermoplast-Matrix die Zugkräfte ausschließlich von den Fasern übertragen werden können.

Die Reibkoeffizienten zwischen den einzelnen Gewebelagen (ply-ply) sowie zwischen dem FVT und Werkzeug (tool-ply) sind im Rahmen von Streifenauszugversuchen unter Druck und Temperatur ermittelt worden.

Tab. 1 fasst die verwendeten Startwerte für die Sensitivitätsanalyse des FE-Modells zusammen. Die Scherspannung-Scherwinkel-Kurven sind Abb. 2 zu entnehmen. Zunächst erfolgt die Simulation der einzelnen Materialversuche, um zu prüfen, ob die Kennwerte aus den Materialversuchen das Materialverhalten abbilden können. Es ist kein weiterer Validierungsschritt erforderlich.

Tab. 1: Startwerte Sensitivitätsanalyse FE-Modell

Faserorientierung	Kettrichtung	Schussrichtung
Zugsteifigkeit [MPa]	14.400	12.000
Drucksteifigkeit [MPa]	2.500	2.500
Biegesteifigkeit [N*mm ²]	17,2	17,2
Reibkoeffizient [-]	tool-ply	0,12
	ply-ply	0,22

Sensitivitätsanalyse

Faced-Centered-Composite Design. Die Versuchspläne für die Sensitivitätsanalysen des FE-Modells werden nach dem Faced-Centered-Composite Design (FCCD) in Analogie zu [8] erstellt. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt in dieser Studie mit der Statistiksoftware Minitab. Beim FCCD können die Haupteffekte und Wechselwirkungen von drei Parametern auf einen oder mehrere Ergebniswerte ermittelt werden. Abb. 3 verdeutlicht die Versuchsplanung. Der Startwert der Parameter wird als „0“ definiert und liegt im Zentrum des gezeigten Würfels und bildet die Basis der Berechnung. Zur Ermittlung des Einflusses der jeweiligen Parameter wird ihr Wert verdoppelt („+1“) oder halbiert („-1“). Die Haupteffekte werden anhand der blau markierten Parameterkombinationen abgefragt und die Wechselwirkungen anhand der rot markierten Parameterkombinationen.

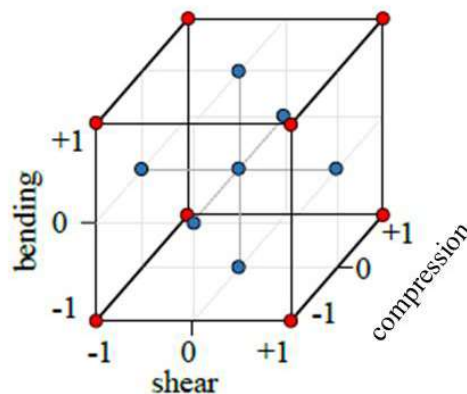


Abb. 3: Faced-Centered-Composite Design in Anlehnung an [8]

Materialversuche. Die Sensitivitätsanalysen anhand des FCCD's sind anhand der Simulation des Bias-Extension-Tests, des Cantilever-Bending-Tests und des Vertikaltests Druck durchgeführt worden. Beim verwendeten Materialmodell *Fabric von ABAQUS/EXPLICIT sind die Zug- und Schersteifigkeit voneinander entkoppelt. Im Rahmen der Sensitivitätsanalysen konnte zudem nachgewiesen werden, dass die Biegesteifigkeit ebenso keinen Einfluss auf das Scherverhalten ausübt und die angestrebte Entkopplung des Steifigkeitsverhaltens in der Ebene und der Biegesteifigkeit vorliegt. Die Simulationsergebnisse des Bias-Extension-Tests werden ausschließlich von den Eingangsdaten der Scherspannung-Scherwinkel-Kurven beeinflusst.

Abb. 4 zeigt das Haupteffektdiagramm der Überhanglänge beim Cantilever-Bending-Test. Die Biegesteifigkeit zeigt den größten Einfluss auf die Überhanglänge der Probe im Simulationsmodell. Die Drucksteifigkeit weist ebenfalls einen Einfluss auf, der aber nur 1/6 des Einflussfaktors der Biegesteifigkeit beträgt. Ebenso zeigt die Schersteifigkeit einen geringen Einfluss. Da die Probe im Cantilever-Bending-Test nicht geführt wird, sondern sich oberhalb der schiefen Ebene frei bewegen kann und lediglich durch die Schwerkraft belastet wird, kann eine Verformung der Probe vorliegen, die eine Gewebescherung hervorrufen kann und somit eine Auswirkung der Schersteifigkeit auf das Ergebnis zulässt.

Gl. 1 beschreibt nach [7] den Einfluss der einzelnen Parameter auf die Überhanglänge, wobei der Wert der Parameter entsprechend Abb. 3 zwischen -1 und +1 variieren kann. Es liegen geringe Wechselwirkungen zwischen der Biege- und Drucksteifigkeit (Bending*Compression) sowie der Biege- und Schersteifigkeit (Bending*Shear) vor.

$$\begin{aligned} \text{Überhanglänge} = & 84,02 + 18,87 \text{ Bending} + 1,19 \text{ Shear} + 3,65 \text{ Compression} \\ & + 1,49 \text{ Bending*Shear} + 1,96 \text{ Bending*Compression} + 0,01 \text{ Shear*Compression} \end{aligned} \quad (1)$$

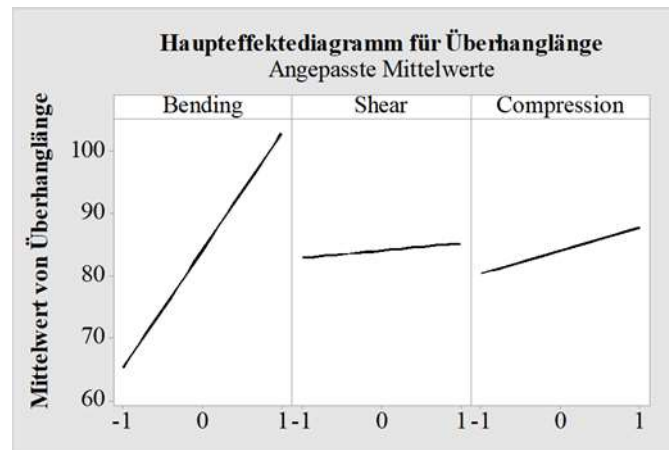


Abb. 4: Haupteffektdiagramm für die Überhanglänge (in [mm]) im Cantilever-Bending-Test [7]

Die Ergebnisse des Vertikaltests Druck werden anhand der Gl. 2 beschrieben. Die Biegesteifigkeit weist einen merklichen Haupteffekt auf und hat zudem eine deutliche Wechselwirkung mit der Drucksteifigkeit auf die Position der Wölbung. Deren Höhe wird von den Parametern nur geringfügig beeinflusst. Der größere Einfluss auf die Position der Wölbung als auf deren Höhe wird im nächsten Abschnitt anhand der Simulation der Faltenbildung des Demonstrators ebenfalls ersichtlich. Da der Einfluss der Drucksteifigkeit im Cantilever-Bending-Test und im Vertikaltest Druck im Vergleich zur Biegesteifigkeit wesentlich geringer ist, wird der für die Drucksteifigkeit gewählte Wert von 20 % der Zugsteifigkeit auch in den Formsimulationen weiterverwendet.

$$\text{Position} = 61,680 + 5,76 \text{ Bending} + 0,28 \text{ Shear} + 1,1 \text{ Compression} + 0,41 \text{ Bending} * \text{Shear} + 5,03 \text{ Bending} * \text{Compression} + 1,9 \text{ Shear} * \text{Compression} \quad (2)$$

Demonstrator. Der Demonstrator hat eine doppelte Napf-Geometrie (Double Dome), die von der Ford Motor Company für ein Benchmark von Prozesssimulationen veröffentlicht worden ist [14]. In dieser Studie wird kein Niederhalter verwendet, um bewusst Faltenbildung im Außenbereich des Bauteils zu erzeugen, um die Vorhersagegenauigkeit des FE-Modells hinsichtlich der Faltenbildung quantitativ bewerten zu können.

Abb. 5 zeigt die Simulationsergebnisse unter Verwendung der Startwerte entsprechend der Tab. 1. Der Einfluss der Parameter Reibwerte (ply-ply und tool-ply) und Zugsteifigkeit werden ebenfalls hinsichtlich ihrer Haupteffekte betrachtet.

Die Sensitivitätsanalysen erfolgen unter Vergleich der Ergebnisse der Scherwinkel (siehe Abb. 5, links), des Abstands der Falten im Außenbereich des Bauteils sowie der Höhe der Falten (siehe Abb. 5, rechts). Die Vermessung dieser Werte anhand der hergestellten Demonstratoren wird in [9] beschrieben.

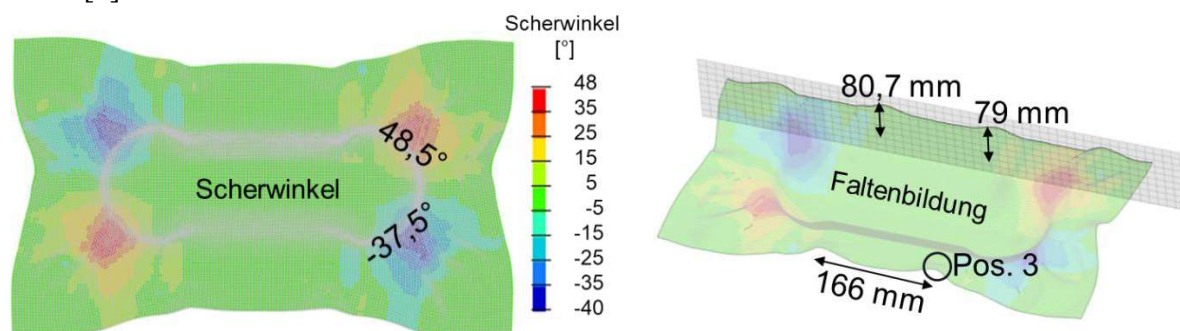


Abb. 5: Simulationsergebnis Demonstrator Double Dome: Scherwinkel (links) und Faltenbildung (rechts)

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse vorgestellt und diskutiert. Das Wechselwirkungsdiagramm für den Einfluss der Eingangsparameter Scher-, Biege- und Drucksteifigkeit auf den Abstand der Falten im Außenbereich des Double Dome Bauteils (siehe Abb. 6) zeigt merkbare Wechselwirkungen zwischen der Biege- und Schersteifigkeit sowie der Biege- und Drucksteifigkeit. Das Haupteffektdiagramm (siehe Abb. 7, links) verdeutlicht, dass der Abstand der Falten vorrangig durch die Biegesteifigkeit bestimmt wird und zweitrangig durch die Scher- und Drucksteifigkeit. Die Höhe der Falten wird hingegen vorrangig durch die Schersteifigkeit bestimmt und zweitrangig durch die Biege- und Drucksteifigkeit (siehe Abb.7, rechts). In Abb. 7 sind die Ergebnisse der Falte in Position 3 dargestellt, deren Position in Abb. 5 gekennzeichnet ist.

Die Wechselwirkungen der Parameter hinsichtlich der Höhe der Falten sind vernachlässigbar gering.

Eine Erhöhung der Biegesteifigkeit führt zu einem größeren Abstand der Falten zueinander und eine Erhöhung der Schersteifigkeit führt zu größeren Falten im Außenbereich des Bauteils.

[15] erläutern anhand ihrer Untersuchungen, dass die Anzahl und Größe der Falten von der Biegesteifigkeit und der Wechselwirkung zwischen der Biegesteifigkeit und der Schersteifigkeit beeinflusst werden. Dieses Verhalten kann in dieser Studie anhand der Sensitivitätsanalyse hinsichtlich des Abstands der Falten zueinander bestätigt werden. Hinsichtlich der Größe der Falten liegen, wie zuvor beschreiben, nur geringfügige Wechselwirkungen vor und der maßgebende Parameter ist die Schersteifigkeit. Ist die Schersteifigkeit hoch, sind größere Kräfte erforderlich, damit der Mechanismus der Gewebescherung stattfinden kann. Ebene Druckspannungen bilden sich aus, die nach [16] zu Faltenbildung führen.

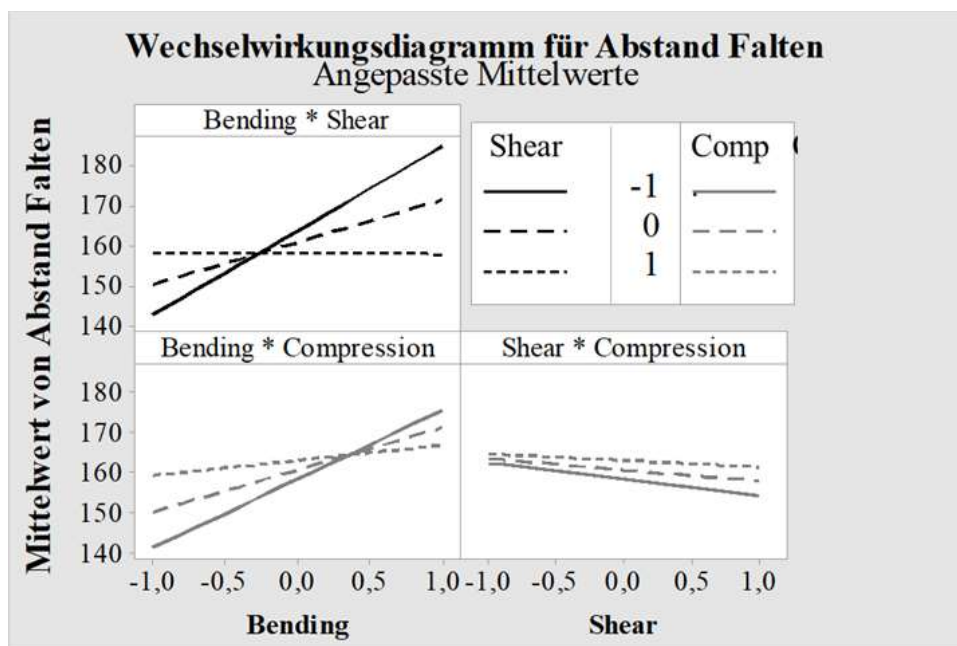


Abb. 6: Wechselwirkungsdiagramm für Abstand (in [mm]) Falten Double Dome [7]

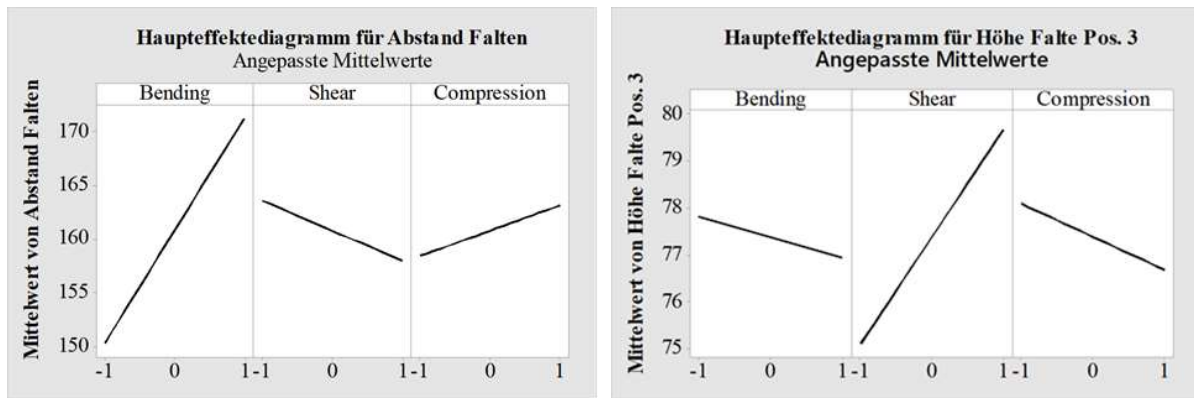


Abb. 7: Haupteffektdiagramme für Abstand (in [mm]) (links) und Höhe (in [mm]) (rechts) Falten Double Dome [7]

Die separat betrachteten Parameter der Reibwerte zwischen den einzelnen Gewebelagen (ply-ply) und zwischen dem Faserverbund und dem Werkzeug (tool-ply) weisen im betrachteten Wertebereich keinen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse auf.

Der Einfluss der Zugsteifigkeit hat hingegen einen entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse der Faltenbildung hinsichtlich Höhe und Abstand sowie auf die Scherwinkel. Der Einfluss auf die Scherwinkel liegt in der gleichen Größenordnung der Schersteifigkeit. Nimmt die Zugsteifigkeit zu, verringern sich die Scherwinkel und der Abstand der Falten sowie deren Höhe nehmen zu.

Der Ausbildung ebener Druckspannungen wird im Formprozess durch eine Vorspannung der Fasern entgegengewirkt. Mit steigender Zugfestigkeit der Fasern, müssen die angelegten Spannungen ebenfalls zunehmen, um eine Faltenbildung zu verringern.

Zusammenfassung

In der vorliegenden Studie erfolgt die Untersuchung der erforderlichen Materialversuche zur Formsimulation faserverstärkter Thermoplaste. Der Formprozess erfolgt oberhalb der Schmelztemperatur des Thermoplasts und somit werden auch die Materialversuche bei diesen Temperaturen durchgeführt, wodurch diese sehr zeitintensiv sind. Im Rahmen von Sensitivitätsanalysen anhand von Versuchsplänen nach dem Faeced-Centered-Composite Design wird der Einfluss der Eingangsparameter Scher-, Druck-, und Biegesteifigkeit hinsichtlich ihrer Haupteffekte und Wechselwirkungen auf die Ergebnisse der Materialversuche sowie der Formsimulation eines Demonstrators untersucht. Zudem erfolgt eine separate Betrachtung des Einflusses der Reibwerte und der Zugsteifigkeit.

Die Zug-, Scher- und Biegesteifigkeit haben einen merklichen Einfluss auf die Simulationsergebnisse und müssen im Rahmen der beschriebenen Materialversuche einachsiger Zugversuch, Cantilever-Bending-Test und Bias-Extension-Test für das jeweils vorliegende Material oberhalb der Schmelztemperatur des Thermoplasts bestimmt werden. Die Parameter können im verwendeten Materialmodell direkt eingegeben werden und erfordern keinen weiteren Validierungsschritt.

Die Reibwerte und die Drucksteifigkeit können mit Erfahrungswerten aus der Literatur belegt werden, wodurch der Versuchsaufwand reduziert werden kann.

Literaturverzeichnis

- [1] U. P. Breuer, „Beitrag zur Umformung gewebeverstärkter Thermoplaste“, Dissertation, Universität Kiaserslautern, Fachbereich für Maschinenbau und Verfahrenstechnik, 1997.
- [2] M. Nishi, T. Hirashima, “Forming simulation of textile composites using LS-DYNA. 10th European LS-DYNA Conference, Würzburg, Germany, 2015.
- [3] D. Jauffrès, J. A. Sherwood, C. D. Morris, J. Chen, “Discrete mesoscopic modeling for the simulation of woven-fabric reinforcement forming”, International Journal of Material Forming 3, Suppl.2, pp. 1205-1216, 2010.
- [4] D. Schommer, M. Duhovic, J. Hausmann, “Modeling non-isothermal thermoforming of fabric-reinforced thermoplastic composites”, 10th European LS-DYNA Conference, Würzburg, Germany, 2015.
- [5] © Dassault Systèmes, Abaqus Analysis User’s Manual, 2012.
- [6] R. M. J. S. Sidhu, R. C. Averill, M. Riaz, F. Pourboghrat, “Finite element analysis of textile composite preform stamping”, Composite Structures 52 (3-4), pp.483-497, 2001.
- [7] J. Graef, “Entwicklung einer Methode zur Formsimulation faserverstärkter Thermoplaste”, Dissertation (unveröffentlicht), Universität Siegen, 2023.
- [8] D. Dörr, T. Joppich, F. Schirmaier, T. Mosthaf, L. Kärger, F. Henning, “Sensitivity of material properties on wrinkling behavior and fiber reorientation of thermoplastic UD-Tape laminates during forming analyzed by Finite Element forming simulation. ECCM 17 – 17th European Conference on Composite Materials, Munich, Germany, 2016.
- [9] J. Graef, B. Weiß, B. Engel, “Measurement of fiber wrinkles and shear angles of Double Dome forming part, 24th International Conference on Material Forming (ESAFORM 2021), Liege, Belgium, 2021.
- [10] DIN 53362:2003-10: Bestimmung der Biegesteifigkeit – Verfahren nach Cantilever.
- [11] D. Soteropoulos, K. Fetfatsidis, J. A. Sherwood, J. Langworthy, “Digital method of analyzing the bending stiffness of non-crimp fabrics”, 14th International Conference on Material Forming (ESAFORM 2014), Belfast, United Kingdom, 2011.
- [12] L. Dangora, J. Sherwood, C. Mitchell, “Application of a Discrete Mesoscopic Finite Element Approach to Investigate the Bending and Folging of Fiber-Reinforced Composite Materials during the Manufacturing Process, Key Engineering Material (611-612), pp. 324-331, 2014.
- [13] M. Nishi, T. Kaburagi, M. Kurose, T. Hirashima, T. Kurasiki, “Forming Simulation of Thermoplastic Pre-Impregnated Textile Composite”, International Journal of Chemical, Nuclear, Metallurgical and Materials Engineering 8(8), 2014.
- [14] Forming Benchmark. Forming of a Double Dome. <http://www.wovencomposites.org/>, 2005.
- [15] O. Döbrich, T. Gereke, O. Diestel, S. Krzywinski, C. Cherif, “Decoupling the bending behavior and the membrane properties of finite shell elements for a correct description of the mechanical behavior of textiles with a laminate formulation”, Journal of Industrial Textiles 44 (1), pp. 70-84, 2014.
- [16] J. Mitscherling, “Theoretische Modellbildung zum Umformen thermoplastischer Gewebeprepreps”, Dissertation, RWTH Aachen, Institut für Kunststoffverarbeitung, 1991.