

# VERGLEICH VON SIMULATION UND EXPERIMENTEN ZUR VALIDIERUNG VON DRAPIERSIMULATIONEN FÜR FASERGELEGE

S. Gubernatis<sup>1</sup>, A. Miene<sup>2</sup>, F. Dumont<sup>1</sup>, C. Weimer<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Eurocopter Deutschland GmbH, Willy-Messerschmitt-Straße, 85521 Ottobrunn, Deutschland

<sup>2</sup>Faserinstitut Bremen e.V., Am Biologischen Garten 2, 28359 Bremen, Deutschland

## Zusammenfassung

Der Trend zunehmender Automatisierung in der Herstellung von Leichtbauteilen aus Faserverbundwerkstoffen fördert die Verwendung der Liquid-Composite-Moulding-(LCM)-Technologien und entsprechender Preforms aus trockenen Faseraufbauten, wie z.B. Gelegen. Umformprozesse sind häufig Teil der Prozesskette in der Herstellung von Preforms. Die Simulation von Umformprozessen von trockenen Fasergelegen bietet das Potential, bereits in einem frühen Entwicklungsstadium eine Aussage über den gewählten Herstellungsprozess zu erhalten. Ergebnisse der Simulation können hierbei die Identifikation von fertigungsinduzierten Defekten, die Zuschnittgeometrien der Ausgangsprodukte, das Erscheinungsbild des Umformproduktes, insbesondere dessen Faserorientierungen, sowie geeignete Prozessparameter sein.

Um verlässliche Ergebnisse zu generieren, muss die Simulation mit ihren verwendeten Modellierungsparametern validiert werden.

Der hierzu notwendige Vergleich von Simulation und Experiment geschieht über die Betrachtung der Faserorientierungen auf der Oberfläche der umgeformten Preform. Eine Software ermöglicht die Analyse dieser nach der experimentellen Umformung im Gitternetz der Simulation. Die Abweichung der Faserorientierung zwischen Versuch und Simulation wird für jede Gitternetz-Zelle ausgegeben. Die beschriebene Bewertungsmethodik ermöglicht die Unterscheidung zwischen Messunsicherheit und Ungenauigkeit der Simulation und gibt die Aussagekraft des Vergleichs an. Hierzu werden sowohl die Messungenauigkeiten je Gitternetz-Zelle, der Anteil verlässlicher Versuchswerte sowie die Plausibilität der Abweichungen berücksichtigt.

Der vorliegende Artikel beschreibt die Vergleichssoftware, die Methodik zur Bewertung des Vergleichs sowie erste Ergebnisse eines Vergleichs von Versuch und Simulation für eine generische Hubschrauberspantgeometrie.

Die nächsten Schritte auf diesem Gebiet sind die Anpassung der Simulationsparameter sowie die Beurteilung der Robustheit der Simulation bei einem Übertrag auf andere Bauteilgeometrien.

Eine validierte Drapiersimulation ermöglicht Kosteneinsparungen über verkürzte Entwicklungszyklen mit geringem Prototypenaufwand und eine bessere Abschätzung sowie Minimierung von Fertigungsrisiken. Darüber hinaus können durch eine genaue Vorhersage der Faserorientierungen im Bauteil Gewichtseinsparungen über eine lastgerechte Konstruktion realisiert werden.

## 1. EINLEITUNG

Automatisierung spielt in der Herstellung von Faserverbundbauteilen eine zunehmend große Rolle. Die Verwendung von Preform-Liquid Composite Moulding (LCM)-Technologien in der Fertigung bietet hierzu großes Potential. Der Preforming-Prozess beinhaltet in der Regel Umformprozesse. Das Umformverhalten der Materialien wird von ihrer Struktur beeinflusst. Faserart, Größe der Rovings, Faserorientierung, Bindung der Lagen zueinander, alles kann sich auf das Umformverhalten, und damit auf die Gefahr von Faltenbildung oder anderen Defekten auswirken. Als Ausgangshilfszeug für den Preforming-Prozess kommen häufig Fasergelege zum Einsatz, da diese als Rollenware in verschiedenen Faserorientierungen verfügbar sind (z.B.  $\pm 45^\circ$  und  $0/90^\circ$ ). Der Einsatz von Umformsimulationen soll ermöglichen, frühzeitig diese Fertigungsrisiken zu minimieren. Dies verringert den Versuchsaufwand in der Prototypenphase und vermeidet den Bedarf für aufwendige Korrekturen in der Konstruktion.

Zusätzliche Aufwandsersparnis ermöglicht die Berechnung der Zuschnittgeometrien, die ohne Simulation häufig in einem iterativen Prozess experimentell ermittelt werden müssen.

Als weiteres Ergebnis kann die Umformsimulation Versuchsparameter ausgeben. Während der Umformung wirkende Kräfte können zur Auslegung der Werkzeuge genutzt werden, die Simulationsvorgaben zur Prozessauslegung.

Die Nutzung von Umformsimulationen kann somit zu kürzeren Entwicklungsphasen und verringerten Entwicklungskosten und –risiken führen.

Um aus der Umformsimulation verlässliche Aussagen zu erhalten, ist deren Validierung erforderlich. Für den Vergleich von Versuch und Simulation ist eine Validierungsgröße notwendig, welche das Umformverhalten charakterisiert und sowohl aus der Simulation ausgelesen, als auch an der experimentell umgeformten Preform gemessen werden kann. Als Validierungsgröße eignet sich beispielsweise die Faserorientierung [1].

## 2. VALIDIERUNGSMESSUNGEN

Eine wichtige Voraussetzung für die Validierung der Simulation ist die Verfügbarkeit von Messdaten experimenteller Umformungen. Die Versuchsbedingungen müssen reproduzierbar sein und in der Simulation modelliert werden können. An der umgeformten Preform muss anschließend die Validierungsgröße gemessen werden können. Der bei Eurocopter Deutschland aufgebaute Versuchsstand zum Umformen und Messen ermöglicht dies [1].

### 2.1. Versuchsstand Umformen

Der Versuchsstand zum Umformen ist so konzipiert, dass ein manuelles Hantieren der sensiblen Faserzuschnitte vermieden wird und reproduzierbare Prozessparameter erreicht werden. Die Zuschnitte werden im Single-Diaphragma-Prozess mit einer Drapiermembran umgeformt, welche in einen portalgeführten Rahmen gespannt ist. In die Drapiermembran ist ein Saugsystem integriert, welches die Aufnahme und den Transport von Zuschnitten ermöglicht. Die Zuschnitte werden so automatisiert auf dem Formkern, in einer definierten Position abgelegt und im selben Schritt umgeformt, indem unter der Membran Unterdruck angelegt wird. Nach dem Umformschritt wird per Infrarotstrahler ein dünnes Vlies thermoplastischen Bindermaterials, das vor dem Versuch auf den Formkern aufgebracht wird, aufgeschmolzen, um die Preform in der umgeformten Geometrie zu fixieren. Nach dem Erstarren des Binders kann der Formkern mit Preform entnommen werden und im Messstand positioniert werden. Da keine Entformung notwendig ist, bleibt das Umformergebnis auch bei dünnen Preforms mit nur geringer Eigenstabilität erhalten.

### 2.2. Messapparatur

Die Vermessung der Faserorientierung von gekrümmten Faserpreforms wurde in einer Zusammenarbeit von Eurocopter Deutschland GmbH und dem Faserinstitut Bremen (FIBRE) entwickelt. Der Schritt von ebenen zu gekrümmten Preforms wurde im Forschungsprojekt FACT/Vitech erreicht. Ein wichtiger Schritt für die korrekte Analyse der Faserorientierung ist dabei die Entzerrung der aufgenommenen Grauwertbilder (Siehe Kapitel 3.1). Die Messapparatur nimmt daher nicht ausschließlich die Grauwertbilder der Oberfläche auf, sondern zusätzlich die Topographie der Preform. Die Grauwertbilder werden von einer Kamera aufgenommen, die mit einem Beleuchtungsdom ausgestattet ist, der eine diffuse Beleuchtung der Messbilder ermöglicht. Die Topographie der Preform wird durch Lasertriangulation gemessen. Die Messeinheiten sind in einem Funktionskopf starr verbunden, der mit einem Roboter geführt wird. Die Roboterführung ermöglicht die exakte Positionierung über der Preform, so dass die Teilbilder in der Analyse zusammengefügt werden können. Der Formkern mit der Preform wird auf einer Rotationsachse fixiert, so dass alle Preformoberflächen nacheinander in definierten Positionen vermessen werden können. Der Aufbau der Messapparatur ist in BILD 1 dargestellt.

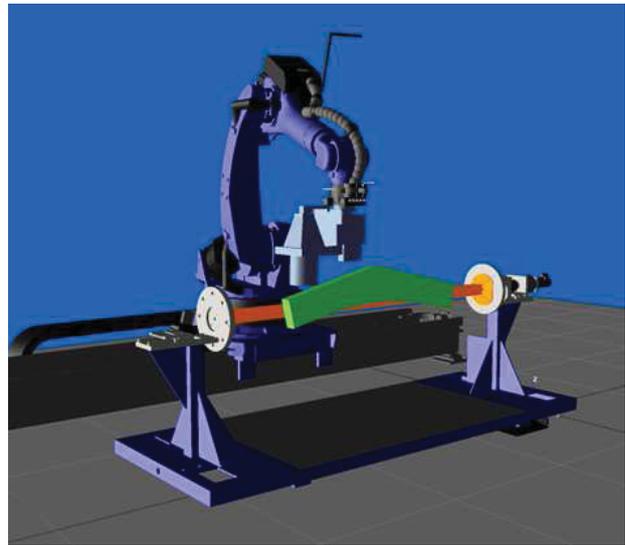


BILD 1: Aufbau Messstand

### 2.3. Analyse der Messergebnisse in EuroPAS

Die Software EuroPAS ist das Ergebnis einer mehrjährigen Zusammenarbeit zwischen Eurocopter und dem Faserinstitut Bremen. Die Grundlagen wurden im Forschungsvorhaben ProCFK/PROSA [2] untersucht. Die Software wurde im Rahmen des Projektes LoKoST/Probec [3] entwickelt und wird im aktuell laufenden Projektes FACT/Vitech kontinuierlich erweitert und verbessert. Sie ermöglicht die bildanalytische Auswertung von Preformoberflächen. Die Analysefunktionen umfassen die Messung der Faserorientierung für Gelege und Gewebe sowie die Erkennung von Gaps und Fremdkörpern, insbes. Fuzzballs. Sie erfolgt anhand von Grauwertbildern die unter diffuser Beleuchtung aufgenommen werden. Die Bildverarbeitungsalgorithmen wurden unter Verwendung der Intel® Open Source Computer Vision Library implementiert [4].

## 3. VERGLEICH VON MESSUNG UND SIMULATION

Der Vergleich von Messung und Simulation besteht aus mehreren Schritten. Als Basis für den Vergleich müssen die simulierten und die im selben Gitter gemessenen Faserorientierungen in jeder Gitterzelle verglichen werden. Anschließend an diesen Vergleich müssen diese Abweichungen in verschiedenen Bereichen zusammengeführt werden, damit aus den sich ergebenden Abweichungsbildern eine Aussage für die Simulation gewonnen wird.

### 3.1. Vergleich der Faserorientierung in EuroPAS

Voraussetzung für einen Vergleich der Faserwinkel aus der Drapiersimulation mit den bildanalytisch gemessenen Faserorientierungen ist die Verwendung eines gemeinsamen Koordinatensystems seitens des Messsystems und der Simulationssoftware.

Die Ergebnisse der Drapiersimulationssoftware können über eine Importschnittstelle geladen werden. Benötigt werden die simulierten Faserwinkel sowie zu jedem Winkel der Bereich der Oberfläche, auf den sich der

Winkel bezieht. Dieser Bereich ist gegeben durch eine „Shell“, die aus vier 3D Koordinaten besteht. Alle „Shells“ einer Oberfläche bilden ein Gitternetz, welches zur Rasterung der Bilddaten während der Faserorientierungsmessung genutzt wird.

### 3.1.1. Aufbereitung der 3D-Messdaten der Bilder

Wegen der begrenzten Breite der Laserlinie erfolgt die Messung der Höhenprofile der Oberfläche in mehreren parallelen Bahnen. Die EuroPAS Software bietet die Möglichkeit, die einzelnen Bahnen zu einer Oberflächentopografie des Messobjekts zusammenzufügen. Optional können Messaussetzer interpoliert oder die Messwerte geglättet werden [3]. Die vom Messsystem bereitgestellten Positionsangaben zu den Bild- und 3D Messdaten werden verwendet, um diese pixelidentisch zu überlagern.

Bevor die Messung der Faserorientierung durchgeführt werden kann, müssen die Einzelbilder geeignet aufbereitet werden, so dass aus den Einzelbildern eine Ansicht der Oberfläche wird.

Die Kamera des Messkopfes verwendet ein entozentrisches Objektiv, welches die betrachtete Oberfläche durch Zentralprojektion auf die Bildebene abbildet. Das führt dazu, dass gekrümmte Flächen perspektivisch abgebildet werden, d.h. weiter entfernte Bereiche erscheinen kleiner, es kommt zu einer Veränderung des Abbildungsmaßstabs. Dieser Effekt ließe sich durch die Verwendung eines telezentrischen Objektivs vermeiden, was wegen der Größe der zu erfassenden Fläche verworfen wurde. Stattdessen können die Bilder innerhalb der EuroPAS Software unter Verwendung pixelidentischer Entfernungsmessdaten von der Zentralprojektion in eine Parallelprojektion umgewandelt werden, so dass sich ein konstanter Abbildungsmaßstab ergibt. Die so vorbereiteten Bilder können unter Berücksichtigung der Kamerapositionen zu einem Gesamtbild der Oberfläche zusammengefügt werden. Kleine Ungenauigkeiten bei der Positionierung der Kamera werden dabei mit Hilfe eines Stitching Algorithmus ausgeglichen.

### 3.1.2. Messung der Faserorientierung und Vergleich mit der Simulation

Um einen simulierten Faserwinkel zu verifizieren, wird eine lokale Messung der Faserorientierung im Bereich der zugehörigen Shell durchgeführt. Dazu wird die Shell auf die korrespondierenden Bilddaten projiziert. So ergibt sich zu jedem simulierten Winkel eine durch vier Eckpunkte gegebene Region im Bild. Die Bildpunkte innerhalb der Region werden zur Messung der Faserorientierung herangezogen. So wird ein direkter Vergleich der bildanalytisch gemessenen Faserorientierung mit dem simulierten Faserwinkel möglich. Das zugrunde liegende Verfahren zur Messung der Faserorientierung basiert auf der Häufigkeitsverteilung der Kantenrichtungen [5]. Neben der gemessenen Faserorientierung liefert die Software zwei Gütekriterien bezüglich der Bildqualität, die es ermöglichen unzuverlässige Messungen zu filtern. Die gemessenen und die simulierten Winkel sowie das Gitternetz werden zur Visualisierung in das Bild eingebildet. Die simulierten Winkel werden blau

dargestellt. Die gemessenen Winkel werden je nach Grad der Übereinstimmung mit dem simulierten Winkel grün, gelb oder rot dargestellt. Zu jedem Winkelpaar wird die absolute Winkeldifferenz und falls gewünscht eine Bewertung der Abweichung als gering, mittel oder stark ausgegeben. Ein Beispiel für einen solchen Vergleich ist in BILD 2 dargestellt. Es zeigt einen Ausschnitt des Bereichs 4 (Gurt Außenradius) der Validierungsform.

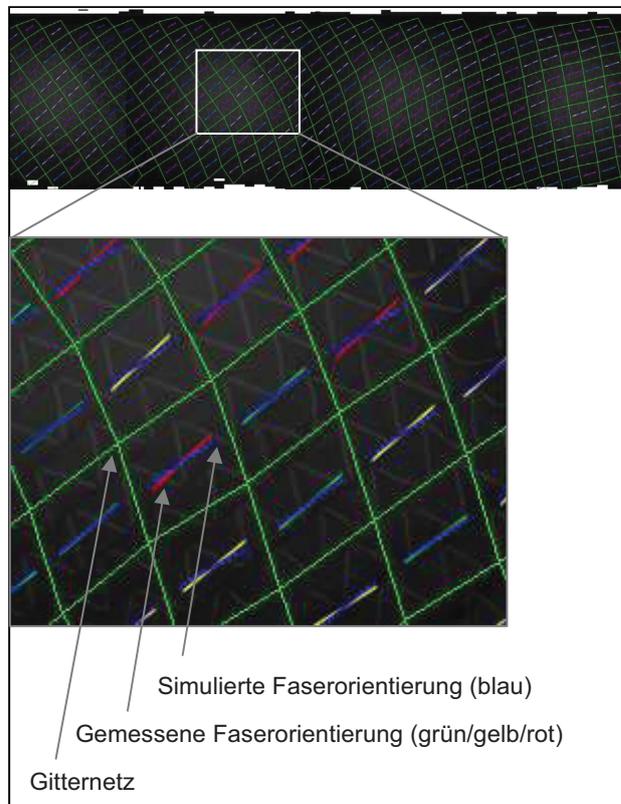


BILD 2: Vergleich Faserorientierung

### 3.2. Beurteilungskriterien zur Simulationsvalidierung

Sobald die Faserorientierung von Experiment und Simulation verglichen ist, muss hieraus eine Aussage für die Simulationsqualität gewonnen werden. Um diese Aussage zu erhalten, werden die Abweichungen, die für jede Zelle des Simulationsgitters berechnet werden, für verschiedene Umformbereiche zusammengefasst (Siehe Kapitel 3.3). Hierbei werden folgende Werte generiert.

- Mittlere Abweichung
- Standardabweichung

In Fällen, in denen eine genauere Aussage zur Streuung der Abweichungswerte benötigt wird, als es die Standardabweichung erlaubt, kann zudem die Verteilung der Abweichung in einem Graphen dargestellt werden. Die Bedeutung der Abweichungen in verschiedenen Umformbereichen ist in Kapitel 3.4 erläutert.

Um eine Validierung der Simulation mit unzuverlässigen Messwerten zu verhindern, werden diese mehrfach gefiltert. Bereits in der Analysesoftware wird in jeder Zelle die Zuverlässigkeit des Messwertes anhand von dem Anteil erkannter Kantenpunkte und Streuung der erkannten Faserorientierung überprüft. Bei der Auswertung der Vergleichsergebnisse wird der Anteil der auswertbaren Gitterzellen überprüft, so dass die generelle

Qualität der Messung erkannt wird. Versuche mit wenigen Messwerten können ausgeschlossen oder mit nur geringer Gewichtung in die Validierung der Simulation einfließen.

Es besteht zudem die Möglichkeit, dass Strukturen der Preform vom optischen Analysesystem als Faserorientierung erkannt werden. Damit solche Werte das Messergebnis nicht verfälschen, wird eine Plausibilitätsprüfung durchgeführt. Abweichungen zwischen Simulation und Messung, die über einem Schwellwert liegen, werden nicht in die Auswertung mit einbezogen. Dieser Wert liegt in den beschriebenen Versuchen bei 15°. Der Anteil der aufgrund dieses Kriteriums gefilterten Werte wird ebenfalls bei der Validierung begutachtet.

### 3.3. Aufteilung der Interpretationsbereiche

Die Validierungsform wird für die Interpretation der Vergleichsergebnisse in unterschiedliche Bereiche unterteilt. Diese Bereiche unterscheiden sich nach den Umformeffekten, welche die Fasergelege erfahren haben, die auf diese Bereiche geformt wurden. Die Bereiche sind folgendermaßen aufgeteilt:

- 1) Nicht umgeformter, ebener Bereich (Steg)
- 2) Umgeformter, ebener Bereich (ebene Gurtbereiche)
- 3) Umgeformter, konkaver Bereich (Gurt Innenradius)
- 4) Umgeformter, konvexer Bereich (Gurt Außenradius)

Diese Bereiche sind durch ihre Geometrie abgegrenzt. In BILD 3 sind die unterschiedlichen Bereiche eingezeichnet.

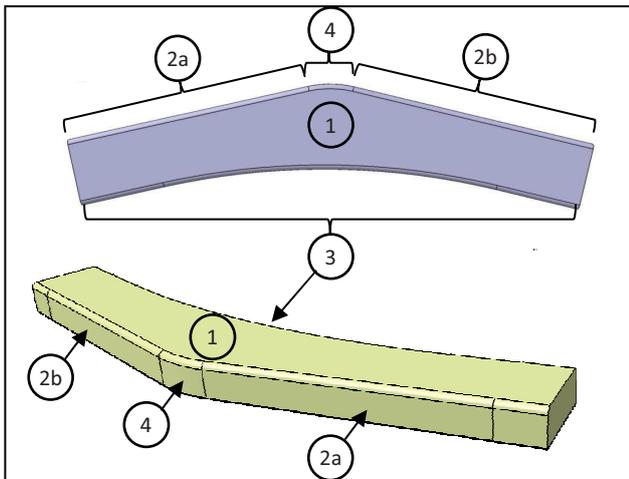


BILD 3: Interpretationsbereiche Validierungspreform

### 3.4. Interpretation der Vergleichsergebnisse

Die Ergebnisse der Faserwinkelabweichungen haben unterschiedliche Bedeutung für die Simulation, je nachdem, in welchem Bereich sie auftauchen und welcher Art die Abweichungen sind. Je mehr Umformeffekte in einem Bereich vorliegen, desto mehr Ursachen für die Abweichung kommen in Betracht. Die Deutung von Fehlerquellen in doppelt gekrümmten Bereichen kann daher nur in Kombination mit der Interpretation der Simulationsqualität in den Bereichen geringerer Komplexität vorgenommen werden.

Im Folgenden ist erläutert, welche Kombination aus Abweichungsbild und Umformcharakteristik auf welche Ursachen für die Abweichung hinweisen. Hierbei ist darauf hinzuweisen, dass sich die Reaktion des Materials aus den Materialeigenschaften und der wirkenden Spannung ergeben. Die Modellierung von Steifigkeit und wirkender Spannung, insbesondere der Einleitung der Spannung aufgrund der Reibung, sind daher als Paar zu sehen. Zudem überlagern sich bei Spannungen quer zur Faserrichtung Biegung und Schub. Eine eindeutige Separierung dieser Effekte ist an der Validierungsform nicht möglich.

- Bereich 1:

Der nicht umgeformte Bereich erfährt durch die Dehnung der Membran Zug in die Richtung der Kanten des ebenen Bereichs. Der Effekt hebt sich in der Mitte des Bereichs auf. Abweichungen zwischen Simulation und Experiment in diesem Gebiet weisen auf Fehler in dem Simulationsinput hin, da auch in der Simulation hier keine Kräfte in der Materialebene wirken. Diese Fehler spiegeln sich in einer mittleren Abweichung wider, während die Fehlerstreuung, folglich die Standardabweichung, hiervon nicht beeinflusst wird.

Je weiter die Analysezelle von dem Mittelpunkt der ebenen Fläche entfernt ist, desto stärker wirkt sich die Dehnung der Drapiermembran aus. Über die Reibung zwischen Membran und Faser werden Kräfte in die Faser eingeleitet. Es treten keine Druckkräfte auf. Da die Kräfte klein im Vergleich zur Zugfestigkeit der Fasern sind, sind hier insbesondere Effekte quer zur Faser auf. Es überlagern sich Schub und Biegung. Die Schubsteifigkeit wächst mit steigendem Schubwinkel. In diesem Bereich, in dem nur kleine Verschiebungen auftreten, ist die Schubsteifigkeit als gering anzunehmen. Der Einfluss des Schubs an der Verformung kann damit groß sein. Eine durch wachsende Spannung hervorgerufene Krümmung der Fasern geht von der Mittellinie des Stegbereichs aus. Dies gilt für Schub und Biegung gleichermaßen. Eine falsch parametrisierte Steifigkeit bezüglich dieser Effekte würde sich daher hauptsächlich als Streuung der Abweichung äußern. Eine falsche Parametrierung der wirkenden Kräfte über die Reibung ist eine weitere mögliche Ursache für ein solches Fehlerbild. Eine geringe Streuung der Faserorientierung ist auch durch Welligkeit im Halbzeug vor dem Versuch zu erwarten.

- Bereiche 2a und 2b:

Die Validierungsform besitzt zwei ebene Gurtbereiche, deren Umformkanten schräg zum Koordinatensystem der Form verlaufen, einmal im positiven, einmal im negativen Winkelbereich. An den Kanten wird das Faserhalbzeug durch die Membranspannung umgebogen. Durch diese unterschiedlich orientierten Kanten stehen die Fasern nach der Umformung unterschiedliche Winkel im Vergleich zur ebenen Unterkante der Preform. Durch den mit der Zeit steigenden Differenzdruck während der Umformung wächst auch die Dehnung der Membran an, nachdem sie sich an die Gurtbereiche des Kerns angelegt hat. Dadurch wirken auch in diesen Bereichen Zugspannungen in Richtung der Preformunterkante auf das Material. Die Größe dieser Spannung ist in beiden ebenen Gurtbereichen etwa gleich groß, durch die unterschiedlichen Faserorientierungen wirken jedoch verschiedene

Anteile dieser Spannung in Längs- und Querrichtung der Faser. In dem Teil mit der „flacheren“ Faserorientierung wirkt ein größerer Spannungsanteil in Biege- bzw. Schubrichtung.

Eine falsch parametrisierte Biegesteifigkeit führt zu unrealistischer Krümmung der Fasern in der Simulation. Dieser Fehler äußert sich in der Standardabweichung und einer mittleren Abweichung aufgrund der Krümmung.

Eine falsch parametrisierte Schubsteifigkeit ruft ebenfalls eine Abweichung der Faserkrümmung hervor. Die Schubsteifigkeit wächst mit dem Schubwinkel. Die Krümmung wird dadurch begrenzt, wodurch sich die Auswirkungen fehlerhafter Parametrisierung auf die Streuung verringern. Da sich der Fehler aus dem Stegbereich, in dem der Einfluss der Schubverformung als groß angenommen wurde, fortsetzt, ist dennoch mit einer entsprechend hohen mittleren Abweichung zu rechnen.

Die Fehlerbilder von Biegung und Spannung ähneln sich trotz dieser Unterschiede. Eine eindeutige Zuordnung der Abweichungen zu einem Effekt ist auch aufgrund der Überlagerung der Verformungsursachen nicht möglich. Der Reibungskoeffizient hat erneut Einfluss auf alle Verformungsarten.

Ein Vergleich zwischen den beiden ebenen Gurtbereichen kann aufgrund der unterschiedlichen Faserorientierung in den Bereichen zur Abschätzung der Größe eines Parameterfehlers herangezogen werden.

- Bereich 3:

Die zwei gekrümmten Bereiche der Validierungsform unterscheiden sich anhand ihrer Charakteristik. Der Innenradius ist nur leicht gekrümmt und besitzt eine konkave Form, die sich über die gesamte Länge der Preform erstreckt. Wie auch in anderen Gurtbereichen wirkt aufgrund der Membrandehnung eine Zugspannung in Richtung der unteren Membrankante. Die Krümmung ruft zudem Verschiebungen in Richtung der Preformmitte hervor, die zu waagrecht verlaufenden Zugspannungen führt. Diese Spannung verursacht Einschnürungen der Preform an den seitlichen Rändern. Diese Einschnürungen unterscheiden sich je nach Materialsteifigkeit in dieser Orientierung. Der Vergleich der Größe der Einschnürungen ist eine weitere Möglichkeit, die Simulationsqualität zu überprüfen. Neben der Modellierung und Parametrisierung des Steifigkeitstensors kann insbesondere die Qualität der Zuschnittgenerierung der Simulation auf diese Weise einfach überprüft werden. Auf diese Vergleichsmöglichkeiten wird in dieser Arbeit nicht näher eingegangen.

Die resultierende Spannung in diesem Bereich führt wiederum zu Faserauslenkungen durch Biegung und Schub. Aufgrund der gekrümmten Umformkante liegen unterschiedliche Ausgangsfaserorientierungen vor. Der Anteil der in Biege- und Schubrichtung wirkenden Spannung ist über den Bereich verschieden, somit auch der Einfluss der jeweiligen Steifigkeiten. Eine fehlerhafte Parametrisierung zeigt sich daher in der Standardabweichung.

- Bereich 4:

Der Außenradius der Validierungsform ist konvex gekrümmt. Dieser Bereich verbindet die beiden

ebenen Gurtbereiche. Die Krümmung führt dazu, dass die Fasern hier gestaucht werden. Im Außenradius liegen folglich Druckspannungen vor. Diese überlagern sich wiederum mit der Zugspannung in Richtung der unteren Preformkante, die in allen Gurtbereichen vorliegt. In diesem Bereich sind größere Faserauslenkungen zu erwarten. Die Schubsteifigkeit wächst bei steigendem Schubwinkel langsam an bis zu einem Punkt, an dem sich die Fasern blockieren und die Schubsteifigkeit stark ansteigt. Wird dieser Punkt überschritten, droht Faltenbildung, da eine Verformung außerhalb der Halbzeugebene energetisch günstiger ist. Die Vorhersage von solchen Defekten ist eine der Hauptaufgaben der Umformsimulation.

Wird das Faserhalbzeug quer zur Faserrichtung gestaucht, werden die einzelnen Rovings zusammengeschoben. Die Größe dieses Effekts wird von der Drucksteifigkeit des Faserhalbzeugs (nicht der Faser selbst) beeinflusst. Gleichförmiges Zusammenschieben der Faser verändert die Faserorientierung nicht. In Bereichen unterschiedlicher Spannung quer zur Faser gibt es entsprechende Unterschiede der Größe der Verschiebung. Diese Unterschiede führen zu einer geänderten Faserorientierung. In den Übergangsbereichen spielt auch die Schubsteifigkeit eine Rolle. Lokale Druckspannungen führen somit zu Faserwelligkeit. Wird diese durch die Simulation nicht korrekt abgebildet, führt dies zu einer Streuung der Faserabweichungen, welche sich in einer höheren Standardabweichung niederschlägt. Sind die Verschiebungen so groß, dass die Rovings dicht aneinander liegen, nimmt der Wert für die Drucksteifigkeit quer zur Faser zu. Auch in diesen Fällen kann es zu Faltenbildung kommen.

Wirkt die Druckspannung schräg zur Faser, bewirkt dies Faserwelligkeit. Die Auswirkungen der Querkraft unter Druckspannung sind groß, da der stabilisierende Effekt der Zugspannungen wegfällt. Bei geringem Winkel zwischen Druckspannungsrichtung und Faserrichtung droht zudem lokales Knicken. Die Richtung der Faserauslenkung beim Knicken reagiert sehr sensibel auf den Ausgangswinkel. In ungünstigen Fällen können kleine Ausgangsfehler daher zu großen Fehlerwerten beim Vergleich führen.

Aufgrund der beschriebenen, sich überlagernden Effekte eignet sich der Bereich des Außenradius nicht von Anfang an für eine sinnvolle Auswertung des Vergleichs. Solange noch mehrere Parameter der Simulation ungenügend genau sind, ist es schwierig, eine Fehlerquelle zu identifizieren. Sobald Fehler durch die Biege- und Schubsteifigkeit durch die Validierung in den anderen Bereichen als klein anzunehmen sind, können in diesem Bereich die Drucksteifigkeit quer zur Faser und der Knickwiderstand überprüft werden. Da geringe Parameterabweichungen hier große Auswirkungen hervorrufen, eignet sich dieser Bereich auch zur Feinabstimmung. Existenz und Größe von Falten sind zudem auch ohne softwaregestützte Analyse schnell vergleichbar.

#### 4. ERGEBNISSE

Die beschriebene Vergleichsmethodik wurde für mehrere Preforms durchgeführt. Die Preforms sind jeweils aus einer Lage Biaxialgelege aufgebaut. Gelege mit den Faserorientierungen [0°/90°], [+45°/-45°] und [-45°/+45°] wurden verwendet. Es wurden vier verschiedene Orientierungen der oberliegenden Faser gegenüber dem Bauteilkoordinatensystem verwendet. Die Versuchsmatrix ist TAB 1 zu entnehmen.

Vers.-nr.	Faserorientierung (Material)	Bindungsart	Faserorientierung ggü. Bauteil
1	[0°/90°]	Tricot-Loop	[+22,5°/-67,5°]
2	[0°/90°]	Tricot-Loop	[+22,5°/-67,5°]
3	[0°/90°]	Tricot-Loop	[-22,5°/+67,5°]
4	[0°/90°] (gestürzt)	Tricot-Loop	[-67,5°/+22,5°]
5	[0°/90°] (gestürzt)	Tricot-Loop	[+67,5°/-22,5°]
6	[+45°/-45°]	Tricot-Loop	[-67,5°/+22,5°]
7	[-45°/+45°]	Fränse	[+67,5°/-22,5°]

TAB 1. Versuchsmatrix

In den Versuchen 1 und 2 sind Material und Faserorientierung gleich. Ein Vergleich dieser Versuche gibt einen ersten Eindruck von der Reproduzierbarkeit der experimentellen Umformung. Versuch 3 wird mit demselben Material durchgeführt. Die Faserorientierung ist um 45° gedreht, dies ist gleichbedeutend mit einer Spiegelung an der Symmetrieachse der Validierungsform. In den Versuchen 4 und 5 wird das gleiche Halbzeug aus den Versuchen 1 bis 3 gestürzt umgeformt. In diesen Versuchen liegen die 90°-Rovings auf der Oberseite. Diese sind dünner als die 0°-Rovings. Die Faserorientierung der 90°-Rovings ist in den Gurtbereichen steiler als die der 0°-Rovings bei Versuch 1 bis 3. Die Orientierung der 90°-Roving ist in den Versuchen 1, 2 und 4 respektive 3 und 5 jedoch gleich. Ein Vergleich von Versuch 4 zu Versuch 1 oder 2 und von Versuch 5 zu Versuch 3 zeigt daher den Unterschied des Einflusses der Kontaktflächen an Formkern und Drapiermembran. In den Versuchen 6 und 7 werden Gelege mit 45°-Lagen untersucht. Die Faserorientierung gleicht Versuchen 4 bzw. 5. Diese Versuche zeigen den Einfluss der Bindungsart und Bindungsrichtung auf.

Die Ergebnisse für die Abweichung der Faserorientierung zwischen Experiment und Simulation sind für die einzelnen Interpretationsbereiche aufgeschlüsselt. Die maximalen und minimalen Abweichungen sind jeweils grau unterlegt.

##### Bereich 1: Nicht-umgeformter, ebener Bereich

Versuchsnr.	Mittl. Abw. [°]	Stdabw. [°]
1	-0,91	1,99
2	-0,66	2,21
3	0,36	2,02
4	-0,21	1,76
5	0,02	1,93
6	1,27	1,07
7	-0,67	1,19

TAB 2. Vergleichsergebnisse Bereich 1

In Bereich 1 zeigen sich in der mittleren Abweichung insbesondere Fehler im Simulationsinput. Die Versuche weisen in diesem Bereich sehr geringe mittlere

Abweichungen auf. Lediglich bei Versuch 6 liegt die mittlere Abweichung knapp über dem Wert von 1°. Der Input der Simulation entspricht den Versuchen folglich recht genau.

Die Standardabweichung beträgt für die [0°/90°]-Gelege etwa 2°. Die Streuung in diesem Bereich weist bereits auf eine ungenaue Parametrierung der Schub- bzw. Biegesteifigkeit oder der Reibung hin. Die Gelege [+/- 45°] und [-/+45°] weisen im Vergleich zu den Versuchen mit der jeweils gleichen Ausgangsfaserorientierung der [0°/90°]-Gelege eine geringere Streuung auf. Mögliche Ursache hierfür kann neben einer besseren Beschreibung durch das Materialmodell auch eine geringere Streuung der Faserorientierung in den Halbzeugen sein.

##### Bereich 2: Umgeformter, ebener Bereich

Versuchsnr.	Mittl. Abw. [°]		Stdabw. [°]	
	Bereich 2a	Bereich 2b	Bereich 2a	Bereich 2b
1	-1,80	-0,23	3,02	3,26
2	-1,91	0,26	3,12	3,77
3	-0,30	1,11	3,11	2,91
4	-0,26	-1,23	3,53	2,22
5	0,28	-0,52	2,28	3,30
6	1,14	1,35	3,15	1,12
7	-0,34	-0,83	1,02	2,80

TAB 3. Vergleichsergebnisse Bereich 2

Die mittlere Abweichung ist in den zwei ebenen Gurtbereichen ebenfalls gering. Werden diese Werte in Verbindung mit den mittleren Abweichungen von Bereich 1 betrachtet, erscheinen die Werte größtenteils noch besser. Der Unterschied der mittleren Abweichungen zwischen den beiden ebenen Gurtbereichen ist durch den in Kapitel 3.4 erwähnten unterschiedlichen Einfluss der Spannung auf Biegung und Schub begründet. Dieser Unterschied und die relativ hohe Streuung, die in fast allen Fällen vorliegt weisen darauf hin, dass die Simulation von Biegung und Schub deutlich optimiert werden kann. Die Gelege mit 45°-Lagen weisen eine mittlere Abweichung auf, die von der mittleren Abweichung aus dem nicht-umgeformten Bereich nur sehr gering differiert. Die geringere Streuung in je einem der Gurtbereiche untermauert die Erkenntnisse aus Bereich 1, dass die Modellierung dieser Materialien genauer ist als die des [0°/90°]-Geleges. Die hohe Streuung im jeweiligen ebenen Gurtbereich, in dem aufgrund der Faserorientierung Biegung und Schub stärker zum Tragen kommen, weist jedoch auch für diese Gelege auf Verbesserungsbedarf hin.

Die Werte von Versuch 1 und 2 sind in diesen Bereichen sehr ähnlich. Unter Berücksichtigung der an der Symmetrieachse der Validierungsform gespiegelten Faserorientierung weist auch Versuch 3 ein nur geringfügig abweichendes Vergleichsergebnis auf. Dies spricht für eine hohe Reproduzierbarkeit von Versuchsergebnissen.

## Bereich 3: Umgeformter, konkaver Bereich

Versuchsnr.	Mittl. Abw. [°]	Stdabw. [°]
1	-1,23	3,37
2	-0,64	3,40
3	0,24	3,59
4	1,07	2,76
5	-1,52	3,31
6	2,13	2,33
7	-0,99	2,46

TAB 4. Vergleichsergebnisse Bereich 3

Die Abweichungen zwischen Versuch und Simulation in Bereich 3 werden ebenfalls durch Biegung und Schub dominiert, deren Fehler sich insbesondere in der Standardabweichung äußern. Die mittleren Abweichungen sind, insbesondere in Verbindung mit der mittleren Abweichung aus Bereich 1, als gering einzuschätzen. Die Standardabweichung bewegt sich etwa auf dem Niveau von den ebenen Gurtbereichen. Die Vergleichsergebnisse aus diesem Bereich bestätigen damit die Erkenntnisse aus den anderen Gebieten.

## Bereich 4: Umgeformter, konvexer Bereich

Versuchsnr.	Mittl. Abw. [°]	Stdabw. [°]
1	-1,75	3,60
2	-1,48	4,32
3	0,16	4,03
4	-4,22	3,73
5	3,60	4,75
6	-0,68	3,86
7	1,50	4,35

TAB 5. Vergleichsergebnisse Bereich 4

Bereich 4 weist die komplexesten Umformeffekte auf. Ungenaue Modellierung kommt durch die Charakteristik dieses Bereichs besonders stark zum Tragen. Die Verformungen sind hier größer, die Abhängigkeit der Schubsteifigkeit vom Schubwinkel kommt entsprechend stärker zum Tragen. Der Winkel zwischen den Fasern und der Spannungsrichtung beeinflusst die Auswirkung auf das Material stark. Die Ergebnisse der Versuche weichen entsprechend stark voneinander ab. Versuche 4 und 5 weisen eine auffällig hohe mittlere Abweichung auf. Dies sind die Versuche mit einer Faserorientierung von 67,5° bzw. -67,5° bezüglich des Bauteils. Da Bereich 4 auf der Symmetrielinie der Validierungsform liegt, können diese Versuche hier verglichen werden. In diesen Versuchen ist das Halbzeug gestürzt, d. h. der 90°-Rowing liegt oben. In den Versuchen 5 und 6 liegen die gleichen Faserorientierungen bezüglich der Validierungsform vor. Diese Versuche weisen deutlich geringere mittlere Abweichungen auf. Dies deutet darauf hin, dass der Einfluss der Bindung auf die Schub- bzw. Biegesteifigkeit nicht korrekt parametrisiert ist.

Die übrigen Versuche sind makroskopisch recht gut beschrieben. Die Standardabweichung ist jedoch bei allen Versuchen hoch. Dies kann sowohl dadurch kommen, dass die Ausprägung der Welligkeit in diesem Bereich in falscher Größe simuliert wird, als auch durch eine lokale Verschiebung der Welligkeit.

## 5. AUSBLICK

Durch den Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Messungen der experimentellen Umformresultate konnte dem Niveau der Simulation quantifizierte Werte

zugeordnet werden. Die Abweichungen bewegen sich in einer Größenordnung, welche viele Anwendungen bereits zulässt. Es wurde zudem das Verbesserungspotential aufgezeigt.

Im Anschluss an die ersten Vergleiche ist nun die Anpassung der Simulationsparameter geplant, um die identifizierten Abweichungen zu minimieren. Ein Parameter, der hierbei eine wichtige Rolle spielen wird, ist der richtungsabhängige Reibungskoeffizient. Dieser Parameter hat einen großen Einfluss auf das Simulationsergebnis, derzeit sind jedoch kaum verlässliche Werte in der Literatur vorhanden.

Die aufgeführten Ergebnisse wurden mit einlagigen Preforms ermittelt. Aktuell laufen Versuchsreihen mit mehrlagigen Preforms. Diese werden die Validierung der Kontaktparametrierung zwischen den Lagen ermöglichen. Die Versuchsreihen beinhalten zudem Proben mit eingebrachten Fixiernähten, deren Simulation bezüglich Einfluss auf das Umformverhalten ebenfalls validiert werden soll.

Ein wichtiger Schritt wird dann die Anwendung der Simulation auf eine zweite Validierungsform sein, um die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Geometrien zu verifizieren.

Nach der Simulationsoptimierung für das Single-Diaphragma-Umformen von den hier verwendeten Materialien, wird die Validierung von weiteren Halbzeugen angegangen. Die Erweiterung der Simulation auf andere Umformprozesse wird ebenfalls ein zukünftiger Arbeitsinhalt, durch den am Ende ein Vergleich unterschiedlicher Fertigungsprozesse in der Entwurfsphase ermöglicht wird.

Die Verknüpfung der Faserorientierung, die als Ergebnis der Umformsimulation vorliegt, mit der Festigkeitssimulation per FEM ist ein weiteres künftiges Ziel, welches eine hohe und validierte Qualität der Umformsimulation voraussetzt.

## 6. DANKSAGUNG

Diese Arbeit wurde innerhalb des Projektes FACT/Vi-Tech durchgeführt. Dieses Projekt wird im Rahmen des Förderprogramms LuFO IV vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gefördert (Förderkennzeichen: 20W0804H). Die Autoren möchten sich ausdrücklich für diese Förderung bedanken.

- [1] Gubernatis, S.; Göttinger, M.; Dumont, F.; Weimer, C.: Forming simulation verification for non-woven reinforcements. *TexComp10*, 26.-28.10.2010, Lille
- [2] Weimer, C.; Miene, A.; Landuyt, E.; Kranjenski, V.; Köhnke, B.; Stadler, F.; Preussler, S.; Göttinger, M.; Bischoff, T.: Prozessbegleitende Schadensanalyse (PROSA) - Ein wesentlicher Baustein für die kosteneffiziente Fertigung und Analyse von CFK-Strukturen. DGLR Tagung, Friedrichshafen, 2006.
- [3] M. Göttinger, C. Weimer, A. Miene. In-Line Preform-Prozesskontrolle in der CFK-Fertigung. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2009. 8.-10.09. 2009, Aachen.
- [4] G. Bradsky, A. Kaehler. Software that sees. *Learning OpenCV. Computer Vision with the OpenCV Library*. O'Reilly, 2008.
- [5] Miene, A.; Herrmann, A. S.; Göttinger, M.: Quality assurance by digital image analysis for the preforming and draping process of dry carbon fibre material. *SAMPE Europe Conference*, Paris, April 1-3, 2008.