

ANALYSE DER FERTIGUNG MASSGESCHNEIDERTER PREFORMS FÜR HOCHBEANSPRUCHTE CFK-BAUTEILE MITTELS FEM

P. Schiebel¹, N. Schnakenberg¹, A. S. Herrmann¹, A. Mesejo-Chiong², A. León-Mecías²,
¹ *Faserinstitut Bremen e.V., Am Biologischen Garten 2, 28359 Bremen (Germany)*
² *Facultad de Matemática y Computación, Universidad de La Habana, (Cuba)*

Zusammenfassung

Diese Veröffentlichung präsentiert die Analyse des Verformungsverhaltens von Kohlenstoffrovings (CF-Rovings) im Fertigungsprozess am Beispiel der Tailored Fibre Placement (TFP) Technologie. Ein numerisches Modell des TFP-Prozesses, welches aufbauend auf dem mechanischen Verhalten der Einzelfilamente und der Filamentinteraktionen die innere und äußere Gestalt des Faserbündels berechnen kann, wird vorgestellt. Für unterschiedliche Fertigungsparameter wie Ablegeradius und Nähfadenspannung lässt sich die im Rovingquerschnitt lokal einstellende Filamentdichte berechnen. Das in dem FEM-Programm LS-DYNA umgesetzte Modell ist mit einer reduzierten Filamentanzahl von 60 und 300 Filamenten erfolgreich getestet worden. Die jetzt mögliche Ausweitung auf die vollständige Rovinggeometrie wird die Entwicklungszeit von TFP-Preforms verkürzen. Neben den numerischen Analysen wurden mechanische Tests zum Deformationsverhalten trockener Kohlenstoffrovings und deren Ablegeverhalten im TFP-Prozess durchgeführt. Die Ausprägung von Inhomogenitäten im Werkstoffgefüge lässt sich mit diesen Ergebnissen deutlich reduzieren, ohne dass aufwändige Fertigungsversuche erforderlich werden. Mit der Einbindung in mechanische Optimierungsprogramme, wie zum Beispiel das von Mattheck [1] entwickelte CAIO Verfahren, wird die Gestaltung von noch leistungsfähigeren Faserverbundbauteilen möglich werden. Die Ergebnisse lassen sich auch auf andere Preformverfahren übertragen. Des Weiteren lassen sich die Ergebnisse in Simulationsprogramme zur vollständigen Analyse des Fertigungsprozesses mit Drapierung, Permeabilitätsbetrachtung für die Harzinjektion und dem Aushärteverhalten integrieren.

1. EINLEITUNG

Polymere Faserverbundwerkstoffe (FVW) weisen gegenüber konventionellen Strukturwerkstoffen deutliche Leistungsvorteile auf. Da insbesondere die auf die Masse bezogenen mechanischen Eigenschaften denen der metallischen Werkstoffe überlegen sind. Ausgehend von der Luft- und Raumfahrtindustrie hat der Einsatz von Kohlenstoff-Faserverstärkte Kunststoffe in vielen Bereichen der Verkehrs- und Energietechnik eine breite Anwendung gefunden.

Die belastungsgerechte Werkstoffauslegung ist Voraussetzung, dass die Vorteile der Verbundwerkstoffe voll zum Tragen kommen. Mit der ausgeprägten Anisotropie von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen gilt es, die Orientierung der Verstärkungsfasern optimal an die Bauteilbelastung auszurichten. Bei komplexen Spannungsverläufen sind somit lokal veränderliche Faserorientierungen erforderlich.

Alein in der Luftfahrt ist eine Vielzahl von Fertigungsverfahren für Faserverbundbauteile im Einsatz, welche sich hinsichtlich umsetzbarer Ablegebahnen, eingesetzter Materialien und Durchsatzraten unterscheiden. BILD 1 stellt etablierte Verfahren wie das Tapelegen und das Tow-Placement Verfahren, bislang weniger

etablierte Verfahren, wie dem Dry Fibre Placement (DFP), dem Fibre Patch Preforming (FPP) und dem Tailored Fibre Placement (TFP) Verfahren gegenüber. Die unterschiedlichen Freiheitsgrade in der Variabilität der lokalen Faserausrichtung lassen sich zusammen mit den Materialdurchsatzraten dargestellt.

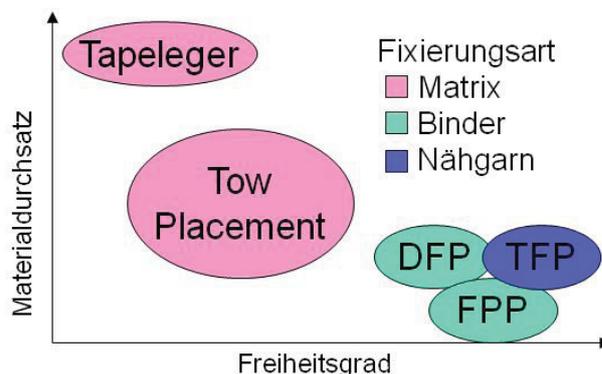


BILD 1. Ablegeraten und umsetzbare Krümmungsradien automatisierter Fertigungsverfahren

Bereits die Wahl des Ausgangsmaterials legt fest, in wie weit innerhalb einer Lage eine lokale Anpassung der Faserorientierung möglich ist, ohne dass es zu ungewollten Inhomogenitäten im Werkstoffgefüge kommt. Mit vorimprägnierten Faserbündeln werden minimale in-plane Radien von

1500 mm erreicht. Im TFP-Verfahren werden Radien von 10 mm und kleiner in reproduzierbarer Qualität verwirklicht, da der Einsatz von trockenen Faserhalbzeugen lokale Filamentverschiebungen innerhalb des Rovings zulässt. Unter Berücksichtigung der sich einstellenden Halbzeugquerschnitte kann die Ausprägung von Faserwelligkeiten und Harznestern vermieden werden. BILD 2 zeigt links das Aufstellen von Kohlenstoffrovings in einem TFP-Preform und rechts in einer Schnittansicht die Auswirkung auf das Laminatgefüge. Zentral ist hier der Querschnitt zweier Rovingschlaufen zu erkennen, die von keilförmigen Harznestern umgeben sind. Die Lagen oberhalb und unterhalb der deformierten Rovings werden stark ausgelängt.

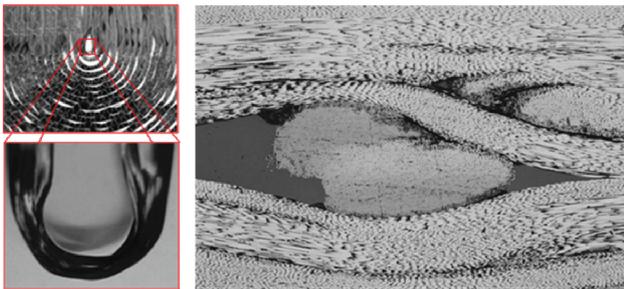


BILD 2. Ausbildung von Gefügeinhomogenitäten an belastungsoptimierten Faserverbundbauteilen; vom CF-Preform zum Faserverbundgefüge

Derzeit erfordert die Berücksichtigung der Rovingverformung durch eine Vielzahl von Fertigungsversuchen. Dieses führt zu kosten- und zeitintensiven Entwicklungsphasen, bei denen sukzessiv die fertigungsbedingte Anpassung der zuvor mechanisch optimierten Faserverläufe erfolgt. Die fehlende allgemeine Beschreibung des Deformationsverhaltens von Kohlenstoffrovings verhindert derzeit einen effizienteren Einsatz belastungsangepasster Faserverbundstrukturen wie sie technisch mit der TFP-Technologie möglich sind.

2. TFP-FERTIGUNGSPROZESS

Beim TFP-Prozess werden NC-gesteuerte modifizierte Stickautomaten eingesetzt. Über einen Nähfaden werden die Verstärkungsfasern auf einem Stickgrund fixiert. Durch abgestimmtes Ablegen mehrerer Preforms kann sukzessiv ein Faserhalbzeug für ein mehrachsig belastbares Bauteil hergestellt werden, welches gegenüber klassischen Textilien wie Geweben und Gelegen deutliche Gewichtsreduktionen im FVW ermöglicht. (vgl. [2], [3] und [4]). Der Prozess ist automatisiert und steigert seine Produktivität, in dem mehrere Stickköpfe parallel angeordnet werden, die gleichzeitig auf einem gemeinsamen Stickgrund arbeiten (vgl. [5] und [6]).

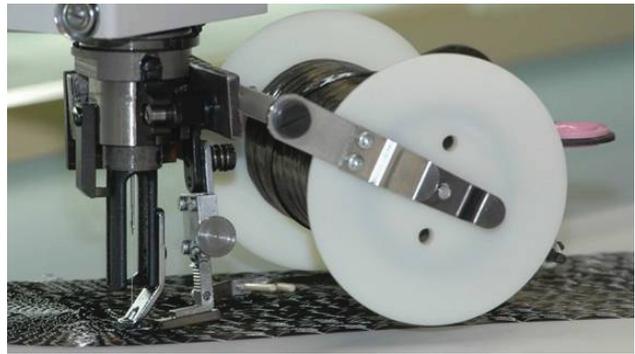


BILD 3. TFP-Stickkopf bei der CF-Rovingablage

Wie bei einer klassischen Haushaltsnähmaschine sind die TFP-Anlagen meistens mit einem Ober- und einem Unterfaden ausgestattet. Die Nadel führt den Oberfaden nach unten, um zusammen mit dem Greifer und dem Unterfaden einen Nahtstich auszubilden. Der Stickkopf kann um die Nadel rotieren und richtet sich in die jeweilige Ablegerichtung um die Nadel aus. Der Stickgrund verfährt auf einer Ebene auf dem Sticktisch, gemäß der konstruierten Ablegebahn. Synchron mit der Rovingführung macht der Stickgrund zusätzlich eine alternierende Seitwärtsbewegung, so dass sich ein Zickzackstich ausbilden kann.

3. KOHLENSTOFF-ROVINGS

Seit Jahrzehnten werden in der Forschung analytische und numerische Modelle zur Beschreibung des Werkstoffverhaltens von Faser- und Faserverbundwerkstoffen aufgestellt. Neben Modellen zur Analyse des Bruchgeschehens wurde das Umformverhalten von textilen Strukturen wie Geweben, Gelegen und Garnen untersucht. Das Formungsverhalten einzelner Rovings ist hingegen nicht ausreichend bekannt. Grundlage einer erfolgreichen Analyse des Werkstoffverhaltens im Produktionsprozess bildet das Wissen von definierten Materialparametern. In dem betrachteten Fall unterteilt sich dieses in die mechanischen Eigenschaften der Fasern und deren Interaktionen sowie dem geometrischen Aufbau des Faserbündels und seiner Filamentanordnung. Wegen ihrer breiten Anwendung wurden für die Untersuchungen HT-Fasern ausgewählt. Im Speziellen wurden 800 tex Rovings 12K HTA40 E13 und 12K HTS40 F13 der Firma Toho Tenax analysiert.

3.1. Mechanische Kennzahlen zur Rovingdeformation

Die grundlegenden mechanischen Kennwerte von Einzelfilamenten und Rovings sind durch zahlreiche Veröffentlichungen und Herstellerangaben bekannt, da sie für die mechanische Auslegung von Faserverbundbauteilen benötigt werden. Für diese Untersuchungen werden die Werte für Zugfestigkeit, -steifigkeit und Bruchdehnung der Fasern nach [7] und [8] verwendet.

Kennwerte zum Aufreißverhalten oder geeignete Prüfverfahren für Rovings sind in der Literatur nicht dokumentiert. Im Folgenden werden Quer-Zug- und Längs-Abscherversuche vorgestellt, welche unter Zuhilfenahme modifizierter Lasteinleitungselemente an einer DIA-STRON FDAS765 am FIBRE durchgeführt wurden [9].

In beiden Versuchen werden die Rovings auf die jeweilige Probenlänge zugeschnitten und mittels des Dymax 3093 UV/VIS Klebers entlang der seitlichen Kante auf Lasteinleitungselementen fixiert. Um eine Verfälschung der Ergebnisse durch den aufgetragenen Kleber zu vermeiden, ist die Fixierung mit einem geringen Klebstoffeinsatz durchzuführen. Dieses kann über ein Druckluftdosiergerät wie das JBE 1113 der Firma I&J Fisnar erreicht werden.

Die Präparation der verwendeten Probekörper erfordert eine große Sorgfalt. Das Zuschneiden der Multifilamentgarne auf Prüflänge führt zu einer nicht genau quantifizierbaren Verfälschung der Ergebnisse, was sich ebenfalls in der in BILD 6 dargestellten großen Standardabweichung widerspiegelt. Die ermittelten Werte sollen deshalb lediglich als Richtwert zur Modellbildung verstanden werden.

3.1.1. Roving-Dehnung unter 90°

Jede Serie wurde mit 30 Probekörpern durchgeführt. Der für die Probekörper typische Kraft-Dehnungsverlauf und der prinzipielle Versuchsaufbau sind in BILD 4 dargestellt. Die eingesetzten Rovingabschnitte hatten eine Länge von 15 mm. Die Bruchkräfte der mit Schlichte versehenen Rovings sind in BILD 6 zusammengetragen. Im Mittel wurde für HTS eine Kraft von 0,0031 N, für HTA 0,0020 N und für T 700 S 0,0041 N ermittelt. Die Bruchdehnung variierte bei allen Serien sehr stark, zwischen 1 % und 15 %.

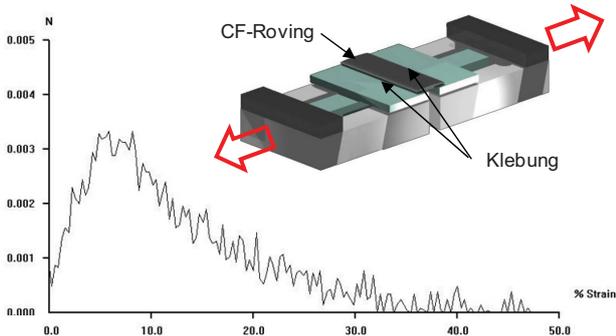


BILD 4. 90°-Zugversuch am 12k HTS-Garn an DIASTRON

3.1.2. Schubverformung von Rovings

Die Schubverformung erfolgte an Probekörpern mit einer Länge von 20 mm und je Serie wurden ebenfalls 30 Einzeltests durchgeführt. Der für die

Probekörper typische Kraft-Dehnungsverlauf und der prinzipielle Versuchsaufbau ist in BILD 5 dargestellt. Die mittleren Bruchkräfte sind ebenfalls in BILD 6 zusammengetragen. Im Mittel wurde für HTS eine Kraft von 0,063 N, für HTA 0,060 N und für T 700 S 0,087 N ermittelt. Die Standardabweichung für die Bruchkräfte liegt je nach Faserart zwischen 42 % und 75 % und ist in diesem Versuchsaufbau geringer als beim Querzugversuch. Insgesamt sind die Standardabweichungen jedoch sehr groß.

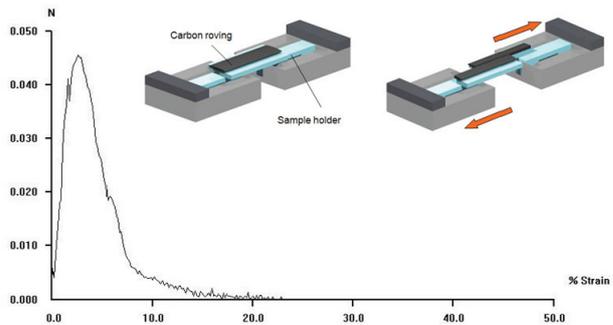


BILD 5. Längs-Abscherversuch an DIASTRON

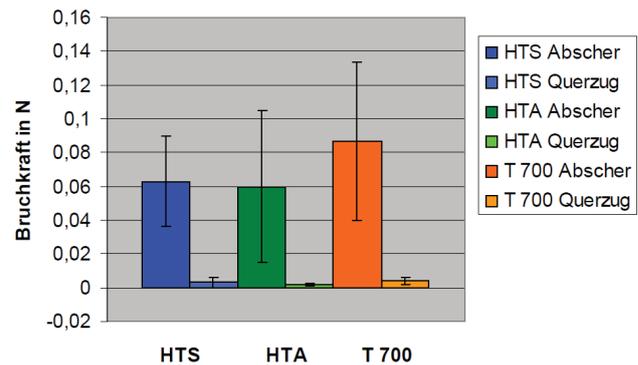


BILD 6. Roving-Bruchkraft für Quer- und Längs-Abscherversuch

3.1.3. Verformungs- und Rückstellkräfte der Multifilamentgarne

Um Aussagen zum Biegeverhalten von Faserbündeln treffen zu können, wurden an einer DMA Q800 V7.5 an unterschiedlichen CF-Garnen Drei-Punkt-Biegeversuche durchgeführt. Der Prüfaufbau ist im Bild 7 schematisch dargestellt.

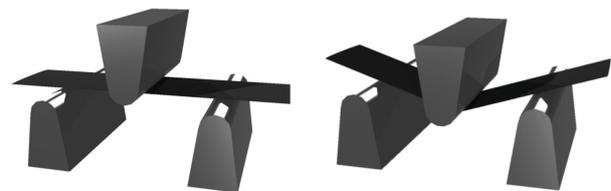


BILD 7. Schematischer Aufbau der Roving 3 Punkt Biege Prüfung

Diese Versuche wurden für 12k HTS Rovings mit einer Garmlänge von 35 mm und den

Prüfgeschwindigkeiten 1, 5, 10 und 20 mm/min durchgeführt. Je Serie wurden 6 Probekörper getestet. Die mittlere Kraft in Abhängigkeit von der Durchbiegung ist in BILD 8 dargestellt.

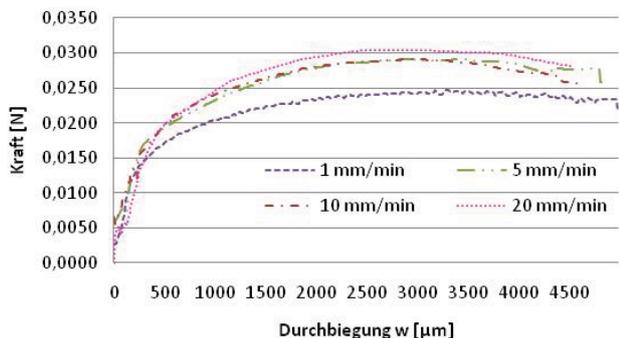


BILD 8. Kraft-/Verformungsdiagramm der 3-Punkt Biege-Prüfung an 12k HTS Rovings

3.2. Filamentanordnung

Neben den mechanischen Eigenschaften der Fasern und der Schlichte sind für die Modellierung Kenntnisse über die Anordnung der Filamente zueinander im gestreckten Ausgangszustand als auch bei definierten Deformationen erforderlich.

3.2.1. Gestreckte CF-Rovings

Die Beschreibung der Filamentanordnung gestreckter Rovings erfolgte visuell auf Basis von REM Aufnahmen. Für die äußeren Filamente ist eine ausgeprägte Parallelität ersichtlich. Für das vereinfachte FE-Modell wird die Annahme einer fehlerfreien Parallelität aller Filamente im Querschnitt getroffen, die in der Realität jedoch nicht bestätigt werden kann.

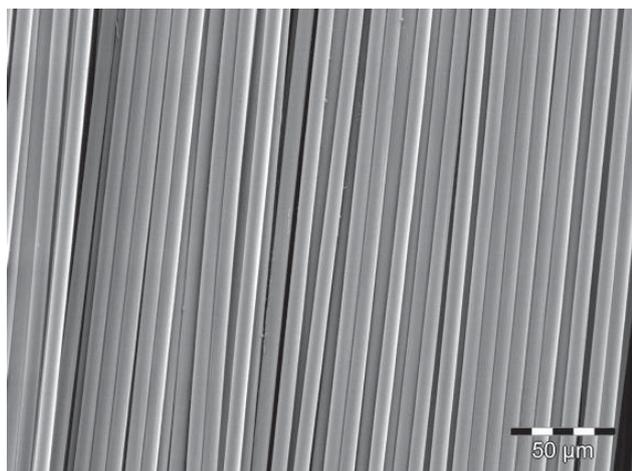


BILD 9. REM-Aufnahmen eines 12k HTS-Rovings

Die vom Hersteller aufgebraute Schlichte hat zwei Aufgaben zu erfüllen. Zum einen hält sie während der textilen Verarbeitung die Filamente zusammen und zum anderen dient sie als Haftvermittler zwischen dem Kohlenstoff und der eingebrachten Matrix des Faserverbundwerkstoffes.

Bei den betrachteten Rovings sind die Filamente vollflächig mit einer dünnen Schicht Schlichte überzogen. Zwischen benachbarten Filamenten bilden sich kleine Brücken aus, wenn ein Abstand von ca. 1 µm unterschritten wird. Die REM-Aufnahme in BILD 10 zeigt einen Ausschnitt zweier benachbarter Kohlenstofffilamente, welche nicht exakt parallel verlaufen. Im unteren Bereich des Bildes liegen die Filamente dichter zusammen. Durch den Schlichteauftrag hat sich eine Verbindung aufgebaut. Im oberen Bereich des Bildes stehen die beiden Filamente nicht in Kontakt. Bei unseren Untersuchungen wurde ein Abstand von ca. 1 µm als maximaler Abstand für die Brückenausbildung identifiziert.

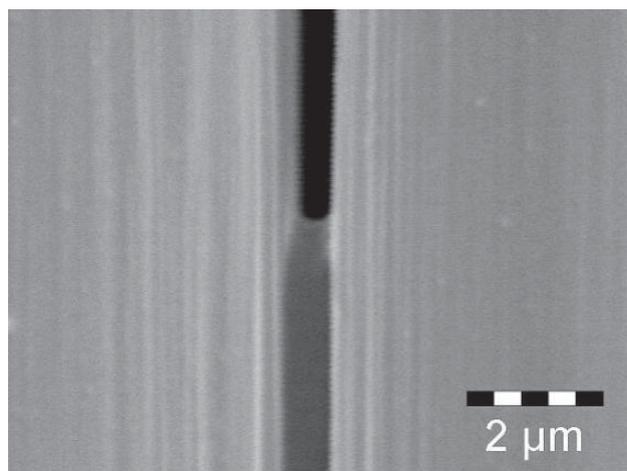


BILD 10. REM-Aufnahmen zweier Kohlenstofffilamente mit Schlichte

3.2.2. Rovinggestalt auf gekrümmten Bahnen

Die äußere und innere Gestalt von CF-Rovings wurde für unterschiedliche Ablegebahnen untersucht. Mit der TFP-Technik wurden Lagen umgesetzt, in denen die CF-Rovings sowohl mit hoher als auch mit niedriger Fadenspannung auf Bahnen mit 10 mm bis 100 mm Krümmungsradius abgelegt wurden. Ein solcher TFP-Versuchspreform ist in BILD 11 dargestellt.

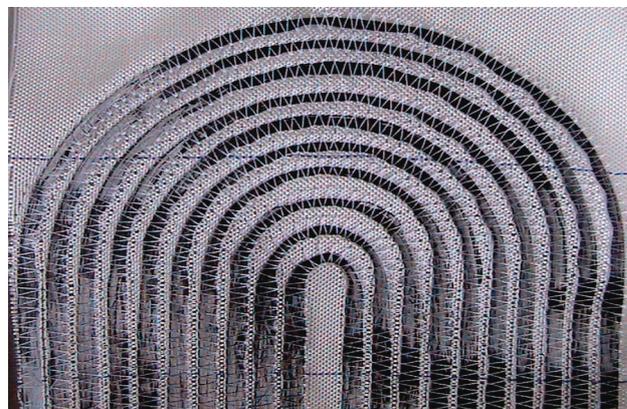


BILD 11. TFP-Versuchspreform mit Ablegebahnen von 10-100 mm Radius

Um möglichst viele Daten über die lokalen Filamentanordnung zu erhalten, sind dreidimensionale Prüfverfahren hier von besonderem Interesse. Wegen ihres hohen Auflösungsvermögens wird die Computertomographie besonders in Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zur Analyse von Faserverbundstrukturen eingesetzt. Die Eignung der μ -CT-Technologie zur Auflösung der lokalen CF-Filamentdichte wurde nach Stabilisierung der TFP-Preforms mit einem Epoxidharz untersucht.

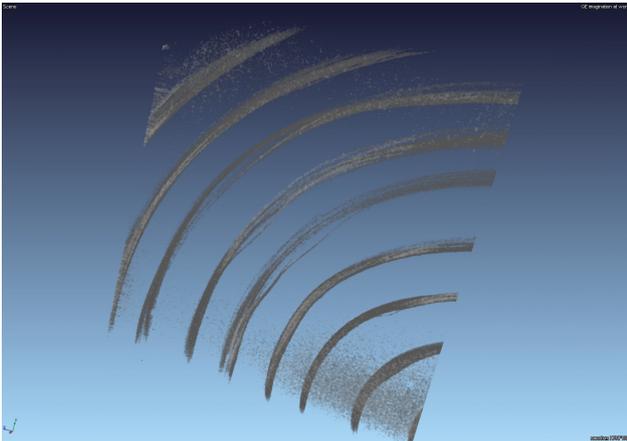


BILD 12. μ -CT Aufnahme eines TFP-Preforms.

Bild 12 zeigt die dreidimensionale μ -CT-Aufnahme eines stabilisierten TFP-Preforms. Die Datenanalyse zeigt jedoch, dass die abgelegten Rovings nur in Bereichen mit einer hohen Filamentdichte detektiert werden. Der zu geringe Dichteunterschied zwischen den CF-Filamenten mit $\rho=1,8 \text{ g/cm}^3$ und dem Epoxidharz mit $\rho=1,0 \text{ g/cm}^3$ wirkt sich negativ auf den Kontrast aus. Durch die Verwendung kleinerer Probekörper kann die Auflösung jedoch erhöht werden.

An klassischen Schliffbildern von stabilisierten Preforms lassen sich die Einzelfilamente mit der Auflichtmikroskopie ohne Verluste detektieren. Wegen des hohen Präparationsaufwandes und dem erforderlichen Materialabtrag beim Schleifen bzw. Polieren der Proben ist jedoch die Anzahl der umsetzbaren Schnittansichten begrenzt. Die gewählten Schnitte sind in BILD 13 dargestellt.

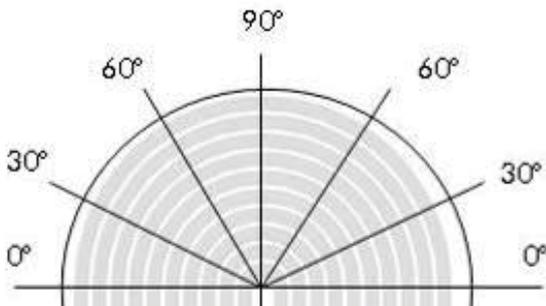


BILD 13. Schnittplan der Probekörperentnahme der stabilisierten TFP-Versuchspreforms

In Tabelle 1 sind die unterschiedlichen Rovingquerschnitte einer Preformvariante mit hoher Nähfadenspannung dargestellt.

Winkel	3	4	5	6	7	8	9
0°							
30°							
60°							
90°							
60°							
30°							
0°							

TAB 1. Rovingquerschnitt aus Schliffbildern bei hoher Nähfadenspannung für 30 (3) bis 90 (9) mm Radius

Für eine effektive Auswertung der durchgeführten Schliffbilder wurde ein Bildanalyseprogramm entwickelt, welches für jeden Rovingquerschnitt die Durchmesser und die x/y-Koordinaten eines jeden Filamentes in eine Datenbank speichert. Bei guter Bildqualität werden mit dieser Software bis zu 99,5 % der Filamente eines Rovings erkannt.

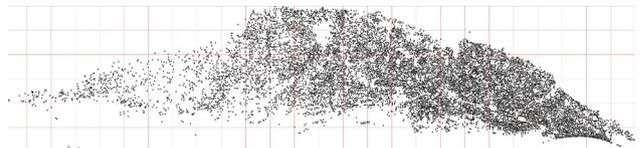


BILD 14. Anordnung der 11.955 Filamente eines 12k Rovings bei starker Krümmung (Zentrum der Kreisbahn rechts)

Zur weiterführenden Auswertung wird über den Garnquerschnitt ein Raster gelegt, in dem für jedes Feld der Flächenanteil der Filamente im Verhältnis zu dem vom Harz bestimmt wird. Die über das Rastermaß gemittelte Filamentdichte erleichtert den Vergleich mit den Simulationsergebnissen.



BILD 15. Mit Grauwerten dargestellte gerasterte Filamentdichte

4. MODELLIERUNG DES TFP-PROZESSES

Wegen der hohen Umformgrade des Rovings im Ablegeprozess und der effizienten Lösung der Kontaktbedingung ist der Einsatz eines FEM-Programms mit expliziter Zeitintegration erforderlich. Es existieren zahlreiche Programme, die für die Simulation von Multifilament-Garnen geeignet sind. Wegen der umfangreichen Kontaktalgorithmen, geeigneter Elementarten und den implementierten Stoffgesetzen kommt hier LS-DYNA von LSTC (Livermore Software Technology Corporation) für die numerische Lösung der Problemstellung zum Einsatz.

4.1. Modellierung des Rovings

Die Kohlenstofffilamente werden mit Belytschko-Schwer Balkenelementen (Typ 2) dargestellt. Dieser Typ von Balkenelement ermöglicht eine kurze Rechenzeit, kann jedoch nur für lineares Materialverhalten eingesetzt werden. Die Quervernetzung der Filamente wird über diskrete Balkenelemente abgebildet, welche als Feder-/Dämpfer Elemente wirken. Die kurze Elementlänge dieser Elemente ($\sim 1 \mu\text{m}$) wirkt sich nicht wie bei üblichen Balkenelementen auf die maximale Zeitschrittlänge aus. Der Stickgrund wird durch einfache Schalenelemente modelliert.

Als Materialmodell wird für die CF-Filamente ein rein linear elastisches isotropisches Verhalten angenommen. Das Verhalten der Schlichte wird nichtlinear plastisch angenommen. Das gewählte Materialmodell ist mit Versagensbedingungen ausgestattet. Im Roving-Verformungsprozess wird die Dehnung dieser quervernetzenden Elemente überwacht. Bei Überschreiten einer definierten Dehnung wird ein solches Element gelöscht.

Die äußere Kontur des Ausgangsrovings lässt sich über mathematische Funktionen beschreiben. In diesen Untersuchungen wurden zwei Halbellipsen angenommen. Für den Aufbau des Rovings wurde eine MATLAB-Routine entwickelt. Für die angenommene Querschnittfläche wird zunächst eine homogene, dichtest gepackte hexagonale Filamentanordnung umgesetzt. Über eine Zufallsfunktion werden anschließend einzelne Filamente nacheinander entfernt bis die geforderte Filamentanzahl erreicht ist.

Die Beschreibung der Schlichte wird im Modell durch zusätzliche Elemente quer zu den Filamentelementen umgesetzt. Für den Ausgangsquerschnitt prüft die MATLAB-Routine den Abstand benachbarter Filamentknoten. Bei Unterschreitung einer festgelegten Strecke werden diese Knoten durch Definition eines zusätzlichen Balkenelementes miteinander verbunden. Aufgebaut sind diese Elemente aus den jeweiligen Filamentknoten und für das Elementkoordinatensystem jeweils einem zusätzlichen Knoten. BILD16 zeigt für das Roving-Modell den Querschnitt mit 300 Filamentknoten und den Schlichtebalken.



BILD 16. Balken- und Schlichteanordnung im Rovingmodell (300-Filamente)

Die Beschreibung des Kollisionsverhaltens zwischen den Filamenten wird über die Kontaktbedingungen CONTACT AUTOMATIC GENERAL beschrieben.

4.2. Modellierung des Ablegeprozesses

Für das eingesetzte Nähgarn wird ein elastisch-plastisches Verhalten angenommen. Die Fließspannung dient zur Steuerung der Fadenspannung. Der in BILD 17 dargestellte TFP-Stickkopf wird als Starrkörper, ohne Verformung aber mit translatorischen und rotatorischen Freiheitsgraden dargestellt.

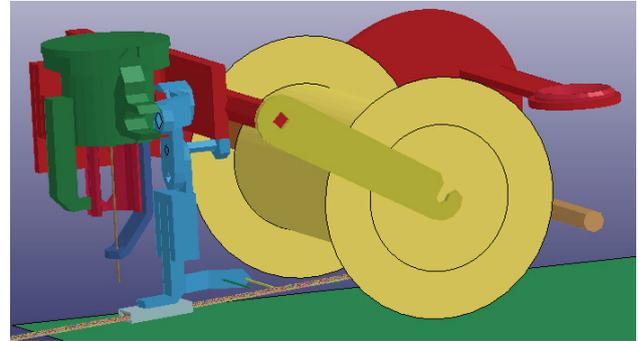


BILD 17. Modell des TFP Kopfes mit Roving

Die Analyse der Bewegungsabläufe wurde unter Zuhilfenahme von Videoaufnahmen des TFP-Prozesses durchgeführt. Die ermittelten Bewegungskurven wurden, wie für die Pendelbewegung der Rovingführung beispielhaft in BILD 18 dargestellt, in das FE-Modell überführt.

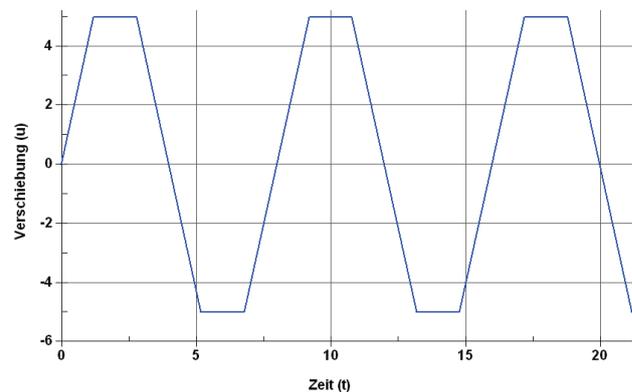


BILD 18. Auslenkung des Rovingpendels

4.3. Simulationsergebnisse

Es wurden zwei Versuchsszenarien analysiert. Als erstes wurde das mechanische Biegeverhalten des Rovings über die äußeren Kräfte bei der Rovingbiegung im Drei-Punkt-Biege-Versuch analysiert. Es wurde der Versuchsaufbau aus BILD 7 in das FE-Modell überführt. Die Längsansicht der sich einstellenden Deformation des Rovings ist in BILD 19 dargestellt.

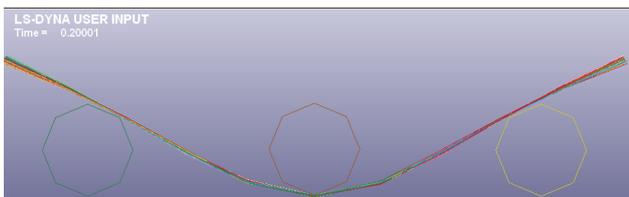


BILD 19. Simulation des Drei-Punkt –Biegeversuches

Als zweites wurde die sich einstellende Filamentverteilung an dem TFP-Modell aus BILD 17 für zwei unterschiedliche Fadenspannungen untersucht. Wie bei den TFP-Preforms führt die niedrige Fadenspannung zu einer stärker ausgeprägten Verformung des Rovings. Der Rovingquerschnitt wird schmaler und höher. Bei hoher Fadenspannung wird hingegen der Roving stärker auf den Stickgrund gedrückt und besitzt eine flachere Gestalt. In Bild 20 ist das Verhalten von realen Rovings und simulierten Rovings dargestellt. In A) ist der hier betrachtete Rovingausschnitt markiert. B) zeigt den realen Rovingquerschnitt bei hoher und C) bei niedriger Fadenspannung. Die Simulationsergebnisse für 60 Filamente sind für hohe Fadenspannung in D) und für niedrige Fadenspannung in E) dargestellt.

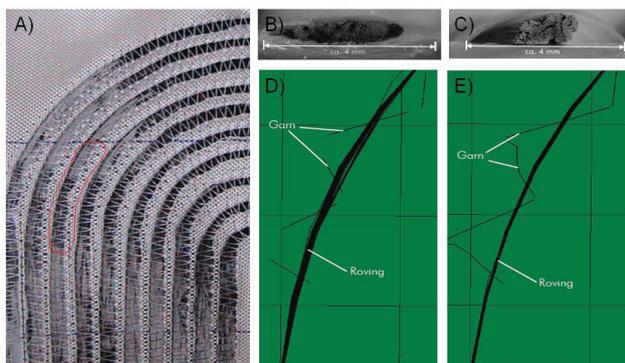


BILD 20. TFP-Versuchspreform (A-C) und Detailansicht der Simulationsergebnisse mit hoher (D) und niedriger (E) Nähfadenspannung

Um genauere Aussagen zu der sich lokal einstellenden Filamentdichte treffen zu können, wurden zusätzliche Berechnungen mit einem Roving aus 300 Filamenten durchgeführt. BILD 21 zeigt in einer Schnittansicht des Modells den sich einstellenden Rovingquerschnitt bei erhöhter Nähfadenspannung. Die deutlich höhere Filamentdichte liegt auf der Innenseite der Ablegebahn in der rechten Bildhälfte. Bereichsweise liegen die Filamente wie im Ausgangsroving gebündelt vor. Auf der Außenbahn (links) treten hingegen keine und auf der Bahnmitte nur vereinzelt Filamente auf.

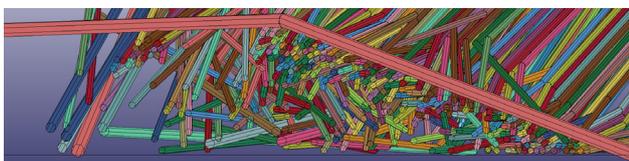


BILD 21. Simulierter Rovingquerschnitt mit 300 Filamenten

5. ERGEBNISSZUSAMMENFASSUNG

Es wurden grundlegende Versuche zum Aufreißverhalten von CF-Rovings durchgeführt. Hierauf aufbauend ist das Modell eines Kohlenstoffrovings und des TFP-Ablegeprozesses entwickelt worden. Die vorgestellten Simulationsergebnisse wurden mit reduzierten Rovingabmessungen erstellt. Zur Validierung mit dem realen Rovingverhalten wurden als mechanischer Test der Drei-Punkt-Biegeversuch und für die geometrische Untersuchungen Digitale Bildanalysen an Schlibbilder von stabilisierten TFP-Mustern durchgeführt.

6. AUSBLICK

Die folgenden Untersuchungen werden die Ausweitung des Modells auf die realen Abmessungen eines 12kRovings beinhalten. Um weiterhin mit vertretbaren Rechenzeiten zu arbeiten, soll die Balkenzahl für die Filamente im Rovingquerschnitt nicht die der bislang eingesetzten 300 übersteigen. Jeder Balken im FE-Modell muss dann das Verhalten von 40 Einzelfilamenten in der Realität wiedergeben. Speziell die Biegeeigenschaften der vergrößerten Balkenelemente als auch die Zug-/Druckeigenschaften der Quervernetzungen (Schlichte) werden für die weiteren Untersuchungen angepasst werden.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die Elementlänge des Nähfadens und der Filamente in dem Modell weiter reduziert werden muss, um das reale Materialverhalten genauer berechnen zu können.

Nach weiterer Anpassung und Validierung des Modells werden die Ergebnisse die Auslegung von Faserverbundstrukturen signifikant verbessern. Eine direkte Anwendung liegt in der Preformgestaltung, in der eine Beschleunigung der Entwicklungszeiten durch Reduktion der Fertigungsversuche erzielt werden kann. Mit der Einbindung des Roving-Verformungsverhaltens in Simulationsprogramme zur Ermittlung von belastungsoptimierten Faserverläufen wird die Ausschöpfung des Leichtbaupotenzial von Faserverbundwerkstoffen unterschiedlichster Anwendungen erhöht.

7. DANKSAGUNG

Wir danken der DFG für die Unterstützungen im Rahmen des Forschungsprojektes „Modellierung und Simulation des Verformungsverhaltens von Kohlenstoff-Rovings“. Weiter Dank gilt der Unterstützung von Herrn. F. Sieker von GE Sensing & Inspection Technologies GmbH, Wunstorf für die CT-Analysen.

-
- [1] Mattheck, C., Baumgartner, A., Kriechbaum, R., Walther, F.: "Computational methods for the understanding of biological optimization", Computational Materials Science, 1(3), 302-312, 1993.
 - [2] Weimer, C., Mitschang, P., Neitzel, M.: Continous Manufacturing of Tailored Reinforcements for Liquid Infusion Processes Based on Stitching Technologies, FPCM-6, 2002, Auckland, New Zealand
 - [3] Mattheij, P., Gliesche, K., Feltin D.: 3D reinforced stitched carbon/epoxy laminates made by tailored fibre placement, Composites: Part A 31 (2000) 571–581
 - [4] Weimer, C., 'T. Preller, T., Mitschang, P., Drechsler, K.: Approach to net-shape preforming using textile technologies. Part I: edges, 'Composites: Part A 31 (2000) 1261–1268
 - [5] Gliesche, K., Hübner, T., Orawetz, H.: Application of the tailored fibre placement (TFP) process for a local reinforcement on an "open-hole" tension plate from carbon/epoxy laminates, Composites Science and Technology 63 81–88, 2003
 - [6] Gliesche, K, Orawetz, H.: Nutzung des Tailored Fibre Placement Verfahrens zur Low-cost-Herstellung von beanspruchungsgerechten Spantstrukturen, Critical Design Review des Verbundprojektes EMIR CFK-Rumpf, Bremen, 2004
 - [7] Werkszeugnis HTA 5131 800tex f12000 t 0 Toho Tenax Europe GmbH, Wuppertal 18.08.2008
 - [8] Werkszeugnis HTS 40 F13 12K 800tex, Toho Tenax Europe GmbH, Wuppertal 18.08.2008
 - [9] Backhaus, K.: Analyse des globalen Verformungsverhaltens von Kohlenstoff- und Viskosefaserrovings auf Basis mikromechanischer Vorgänge. Diplomarbeit aus dem Faserinstitut Bremen e.V.; 29.02.2009