

DRY FIBRE PLACEMENT - EINFLUSS VON PROZESSPARAMETERN AUF MECHANISCHE LAMINATEIGENSCHAFTEN UND INFUSIONSVERHALTEN

DRY FIBRE PLACEMENT – INFLUENCE OF PROCESS PARAMETERS ON MECHANICAL LAMINATE PROPERTIES AND INFUSION BEHAVIOUR

B. Grisin*, S. Carosella und P. Middendorf

IFB, Institut für Flugzeugbau der Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 31, 70569 Stuttgart
Tel.: + 49(0) 711 685 67557, *E-Mail: grisin@ifb.uni-stuttgart.de

Kurzfassung: Beim DFP- (Dry Fibre Placement) Prozess werden Kohlenstofffaserovinge gespreizt, bebindert und anschließend automatisiert mittels 2D und 3D Legeanlagen zu trockenen, textilen Preforms verarbeitet. Ziel war es, durch Einfachheit und Robustheit bestehende Handablage-Prozesse zu automatisieren, sodass ein Einsatz der DFP-Technik leicht möglich ist. Prozesssicherheit, wenig Verschnitt und eine flexible Produktion konnten nachgewiesen werden. In dieser Veröffentlichung werden Einflüsse der Prozessparameter, 2 mm breite Spalten (Gaps) und der prozentuale Anteil von 90° Lagen im Laminat, im Hinblick auf die mechanischen Kennwerte, sowie die Permeabilität bzw. die Infusionszeiten in Preform z-Richtung (Dicke) untersucht. Verglichen werden die Einflüsse auf Steifigkeit und Festigkeit, für Zug und Biegung. Für eine Referenzkonfiguration, ohne Gaps, wurden zudem umfassende unidirektionale, mechanischen Laminateneigenschaften ermittelt, welche zur rechnerischen Laminatauslegung herangezogen werden können. Es wird ein Verfahren zur Ermittlung der Infusionszeiten in Abhängigkeit der Laminatdicke, des Lagenaufbaus, von 2 mm breiten Gaps aufgezeigt und mittels VAP- (Vacuum Assisted Process) Infusionsversuchen verifiziert. Es wurden 24k Kohlenstofffaserovinge der Firma SGL, ein Bindersystem und ein Infusionsharzsystem der Firma Hexion verwendet. Zur Spreizung der Rovinge und zur DFP Ablage kamen Anlagen der Firma M&A Dieterle zum Einsatz.

Abstract: Within the DFP (Dry Fibre Placement) process carbon fiber rovings are spread, bound and then automatically processed into dry textile preforms using 2D and 3D laying systems. The aim was to automate existing hand lay-up processes through simplicity and robustness, making it easy to use DFP technology. Process reliability, low waste and flexible production could be demonstrated. In this publication, influences of the process parameters, 2 mm wide gaps and the percentage of 90° layers in the laminate, are investigated with regard to the mechanical properties, permeability and infusion times in the preform z-direction (thickness). The influences on stiffness and strength, for tension and bending, are compared. Comprehensive unidirectional mechanical laminate properties were also determined for a reference configuration, without gaps, which can be used for computational laminate design. A method for determining infusion times as a function of laminate thickness, ply structure, 2 mm wide gaps is demonstrated and verified using vacuum assisted process (VAP) infusion tests. 24k carbon fiber rovings from SGL, a binder system and an infusion resin system from Hexion were used. Equipment from M&A Dieterle was used to spread the rovings and for DFP deposition.

Schlagwörter: Mechanische Kennwerte, Kohlenstofffaser, Gaps, VAP, Duroplast, Binder, fixed Tow

Keywords: Mechanical properties, carbon fibre, gaps, VAP, thermoset, binder, fixed tow

Einleitung

Das Institut für Flugzeugbau (IFB) der Universität Stuttgart befasst sich mit der Entwicklung von neuartigen Faserlegeverfahren. Eines dieser Verfahren ist der Dry Fibre Placement Prozess, welcher zusammen mit der Firma M&A Dieterle in zwei geförderten Entwicklungsprojekten (BMW i ZIM, MWK Leichtbau-BW InnoChallenge) entwickelt und die dafür notwendige Anlagentechnik aufgebaut wurde.

Die Herstellung von Faserverbundstrukturen aus gespreizten, trockenen Kohlenstofffaserovingen, sogenannten fixed Tows, wird mit dem Ziel verfolgt,

homogene Laminat mit möglichst wenigen Fehlstellen zu erzeugen. Vor allem eine geringe Faserondulation und Faserkräuselung sind Vorteile des DFP. Nachteilig ist allerdings die damit einhergehende sehr geringe Permeabilität der erzeugten Preforms. [1] Es besteht die Möglichkeit die erforderlichen Flächengewichte der Einzellagen eines Laminats gezielt zu steuern. Das Flächengewicht einer Einzellage wird über die Breite der Spreizung der Rovinge und über den Bahnabstand eingestellt. Nach [2] werden aktuell 80 % der Kohlenstofffasern vor der Verarbeitung gespreizt. Die Ablage von bebinderten, gespreizten Fasern kann in beliebiger Lagenorientierung oder nur lokal platziert erfolgen. Der Preformaufbau kann damit lastpfadgerecht und

endkonturnah (near-net-shape) sein. Die Ablage kann je nach Anforderung und Anlagentechnik sowohl auf zweidimensionalen als auch auf dreidimensionalen Werkzeugen erfolgen.

Die Qualität einer DFP-Preform wird durch die Betrachtung folgender Bewertungskriterien beschrieben:

- Spalten (Gaps)
- Faserwelligkeit (Ondulation)
- Überlappungen (Overlaps)
- Falten

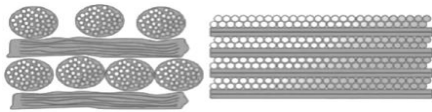


Bild 1: Idealisiertes Schema eines Preformvergleichs; ungespreizt – gespreizt, [2]

Der Einfluss von Gaps und der prozentuale Anteil von 90°-Lagen auf die mechanischen Eigenschaften, von im DFP-Verfahren gelegten Laminaten, wird in dieser Arbeit näher betrachtet. Es wird im speziellen auf Zug- und Biegeeigenschaften eingegangen.

In [3] wird beschrieben, dass der Einfluss von Gaps und Overlaps auf die mechanischen Zug- und Druckeigenschaften eines mittels AFP gelegten Prepreg Laminats sehr klein bzw. vernachlässigbar ist. Der Einfluss der Faserwelligkeit auf Festigkeit und Steifigkeit von Faserverbundwerkstoffen kann nach [4] sehr hoch sein. Die Welligkeit wird als Verhältnis der Amplitude zur Wellenlänge definiert. Bei einem Wert von 0,15 kann der Einfluss auf die Zugsteifigkeit zu einer Reduktion von 80 % führen. [4] Das Kriterium Überlappung wird nicht näher betrachtet. Aufgrund der Programmierung der Bahnen und der Breite der fixed Tows kann ein Auftreten von Überlappungen im Rahmen dieser Arbeit ausgeschlossen werden. Falten wurden ebenfalls nicht beobachtet und werden deshalb nicht näher betrachtet.

Beeinflussung der Permeabilität: Zur Beeinflussung der Permeabilität von DFP-Preforms in z-Richtung gibt es mehrere Möglichkeiten. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Einfluss durch das Legen von Gaps und die Faserorientierung untersucht.

- Legen von Gaps
- Änderung des Lagenaufbaus / der Faserorientierung
- Nadeln/Tufting
- Aufbringung von Binder / Bindergarnen auf den Lagenaufbau

In dieser Arbeit wird untersucht, welchen Einfluss Gaps und die Faserorientierung auf die Erhöhung der Permeabilität haben, wobei der Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften mituntersucht wird.

Durch das Tuften von Preforms können ebenfalls deutliche Erhöhungen der Permeabilität erreicht werden, was laut [5] mit einer Reduktion der Biegefestigkeit von bis zu 29 % und 23 % des Biegemoduls einhergeht. Der Einfluss von Bindern wird in dieser Arbeit nicht betrachtet und deshalb nicht näher spezifiziert.

Verfahren Stand der Technik: Im Bereich der Faserablagetechniken stellt das DFP eine Form der AFP/ATL Technik dar.

Beim AFP (Automated Fibre Placement) handelt es sich um die meist roboterbasierte Ablage von gespreizten, nicht imprägnierten, aber bebinderten Rovings. Die Ablage kann auf konkaven und konvexen Werkzeugformen erfolgen, welche auch komplexe Geometrien darstellen können.



Bild 2: AFP-Anlage von Coriolis [6]

Die eingesetzten fixed Tows können Breiten von ca. 3 mm bis 25 mm besitzen. Die Legeköpfe sind mit bis zu 32 einzeln gesteuerten Faserzuführungen ausgestattet. Das Verfahren eignet sich deshalb für sehr komplexe und mehrfachgekrümmte Bauteile. Durch die einzeln gesteuerten Faserbahnen kann die Außenkontur eines Bauteils sehr präzise abgebildet werden, es entsteht wenig Verschnitt und die Faltenbildung auf mehrfach gekrümmten Flächen wird stark reduziert. Das in dieser Arbeit eingesetzte DFP- (Dry Fibre Placement) Verfahren ist dementsprechend der Kategorie AFP zuzuordnen. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte und verwendete „Crosslayer“ Anlage stellt eine sehr vereinfachte Variante dar. Dies ist aber im Hinblick auf eine robuste und einfach zu bedienende Maschinenteknik von Vorteil. Im Rahmen des Projekts wurde gezeigt, dass die Programmierung und Bedienung einer Crosslayer Anlage innerhalb weniger Tage erlernbar ist.

Beim ATL (Automated Tape Laying) handelt es sich um ein Verfahren, bei welchem breite Prepreg Tapes (bis zu 300 mm) mittels, in der Regel, sehr großen Portalanlagen, automatisiert abgelegt werden. Es können leicht konkave oder konvexe Formen belegt werden. Die Komplexität der Bauteilgeometrie kann als gering

bis mittel eingestuft werden. Typische Anwendungen sind beispielsweise Außenhaut Anwendungen von Flugzeugkomponenten, wie Rumpfsegmente oder Flügelchalen. Die Vorteile liegen in einer großen Ablegerate und sehr großen Bauteilgeometrien. Nachteilig sind die hohen Investitionskosten und verminderte Ablegeraten bei steigender Bauteilkomplexität. [7]



Bild 3: Verwendete DFP-Anlage „Crosslayer“, M&A Dieterle GmbH

Material und Versuchsaufbau

Materialien: In Tabelle 1 sind alle in der Untersuchung verwendeten Materialien aufgelistet.

Tabelle 1: Verwendetes Material

Material	Bezeichnung
Faser	SGL SIGRAFIL®C T24-5.0/270-E100
Binder	Hexion Epikote Resin TRAC 06720
Matrix	Hexion RIMR135/RIMH137

Fixed Tow-Herstellung: Zur Herstellung der fixed Tows wurden die Rovings mittels einer mechanischen Spreizanlage auf eine Breite von 20 mm gespreizt und mittels des Binders fixiert. Der pulverförmige Binder wurde hierzu auf den gespreizten Roving aufgetragen und thermisch mittels Infrarotlampen aktiviert, konsolidiert, wieder abgekühlt und auf eine Filmspule aufgewickelt. Die verwendete Bindermenge betrug bei allen Versuchen 8 %. Die Aktivierung des Binders erfolgte für alle hergestellten fixed Tows mit 110° C.



Bild 4: Verwendete Spreizanlage M&A Dieterle GmbH

Tabelle 2: Fixed Tow Eigenschaften

Fixed Tow	Einheit	Wert
Breite	[mm]	20
Binder	[m-%]	8, einseitig
Tex Faser	[tex]	2400
Flächengewicht inkl. Binder	[g/m ²]	89

DFP-Prozess - Preformherstellung: Die Ablage der fixed Tows wurde mit einer Legegeschwindigkeit von 8,5 m/min und einer UV-Lampenleistung von 360 W durchgeführt. Es wurden maximal 7 Lagen übereinandergelegt. Zur Herstellung von Preforms mit mehr als 7 Lagen wurden diese in mehrere Preforms unterteilt und anschließend gestapelt. Die Preformgröße betrug 350 mm x 340 mm und die Ablage erfolgte auf ein Leinwand Glasfasergewebe (Hexcel, HexForce 02116 1260 TF970, 105 g/m²), welches als Trägermaterialdiente. Lagen ohne Gap wurden entsprechend der fixed Tow Breite mit 20 mm Bahnabstand gelegt, Lagen mit 2 mm Gap mit 22 mm Bahnabstand.

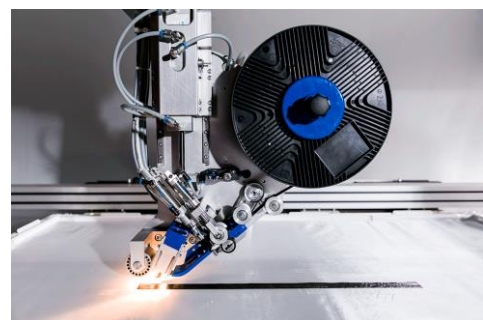


Bild 5: Crosslayer Legekopf

VAP Infusion: Zur Herstellung der Laminats wurde das VAP-Verfahren eingesetzt. Bei der empirischen Untersuchung des Infiltrationsverhaltens wurden der Ablageabstand zwischen den fixed Tows (Gaps) und die Lagenanzahl und Lagenorientierungen des Laminats variiert. Hierzu wurde ein Versuchsaufbau gewählt, bei welchem die Preforms auf einer Glasplatte

infiltriert wurden. Die Preforms wurden in z-Richtung (out-of-plane) gegen die Schwerkraft infiltriert.

Die in der Tabelle 3 aufgeführten Prozessparameter wurden zur Herstellung aller Probeplatten konstant gehalten und permanent im Versuch gemessen. Die Temperaturüberwachung erfolgte mittels Temperaturfühler Typ K, an drei Messstellen auf der Oberseite und an einer auf der Unterseite des Infiltrationsaufbaus. Die Temperierung geschah über einen geregelten IR-Strahler (Trisk, Typ:420469) von der Oberseite.

Tabelle 3: Infiltrationsparameter und Aushärtung

Prozessparameter	Wert
Temperatur Infusion	35° C
Absaugdruck, absolut	50 mbar
Temperzyklus	50° C / 16 h

Die Preforms wurden am Anguss mit einem Klebeband und komplett umlaufend mit einem zusätzlichen Streifen Tacky Tape Dichtband versiegelt, um zu verhindern, dass das Matrixsystem seitlich zur Oberseite fließen kann und somit trockene Stellen im Inneren der Laminare entstehen.

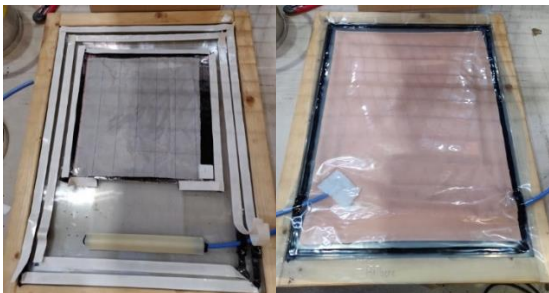


Bild 6: Versuchsaufbau VAP Infiltration

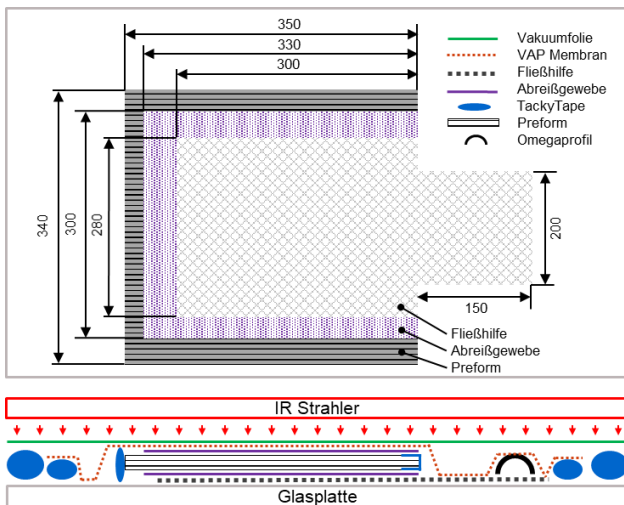


Bild 7: Schema des Infusionsaufbaus, der Preformgröße, Zuschnitte: Fließhilfe und Abreißgewebe

Zudem konnte so sichergestellt werden, dass die Preform, in z-Richtung imprägniert wird. Die Zuschnitte für das Abreißgewebe wurden umlaufend 20 mm kleiner als die Preform gewählt und für die Fließhilfe nochmals um 10 bzw. 15 mm gekürzt. (vgl. Bild 8).

Messung der Infiltrationszeit: Die Infiltrationszeitmessung beginnt mit dem Öffnen des Angusses und dauert bis zur vollständigen Imprägnierung des Lagenaufbaus. Als vollständige Imprägnierung wurde der Zeitpunkt definiert, bei dem auf der Oberseite des VAP Aufbaus erkennbar war, dass das Matrixsystem die komplette Fläche der Membran über der Preform benetzt hatte. Dies ist zuverlässig beobachtbar, da sich die verwendete semipermeable Membran der Firma Composyst bei Kontakt mit Harz dunkel verfärbt.



Bild 8: VAP-Infusion - Messung der Infiltrationszeit (links); Infusion kurz bevor vollständiger Imprägnierung (rechts)

Auf Bild 9 ist zu erkennen, wie sich die Fließfront am Anguss in x- und y-Richtung ausbreitet. Links oben ist zu erkennen, dass die Preform bereits in z-Richtung imprägniert wurde (rote Markierungen). Es sind die Positionen der drei Temperatursensoren auf der Oberseite zu erkennen. Der vierte Sensor befindet sich zentral unter der Infiltrationsplatte. Rechts im Bild ist eine letzte trockene Stelle des Infusionsvorgangs kurz vor der vollständigen Imprägnierung zu beobachten.

Lagenaufbau der Probeplatten: Zur Herstellung der Prüfkörper für die Bestimmung der Materialkennwerte wurden Laminare hergestellt, welche mit entsprechender Dicke und Lagenaufbau den Anforderungen der jeweiligen Norm entsprechen. Bei aufeinanderfolgenden gleichgerichteten Lagen wurden diese jeweils um 50 % ihrer Breite versetzt. Für die eingesetzten 20 mm breiten fixed Tows um 10 mm. Bei den Konfigurationen mit 2 mm breiten Gaps zwischen jeder Bahn entsprechend um 11 mm.

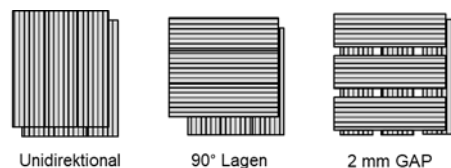


Bild 9: Preformkonfigurationen

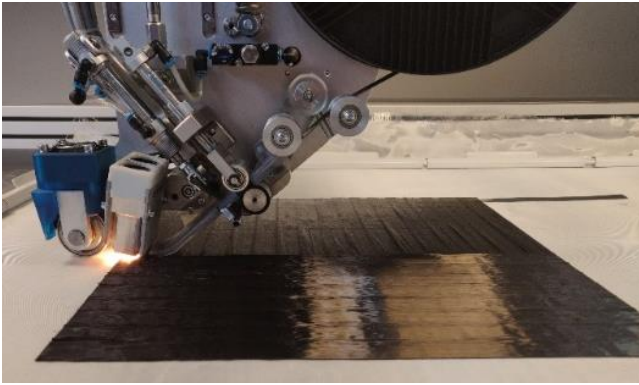


Bild 10: DFP-Ablage einer Preform Konfiguration ohne Gaps und 0° und 90° Lagen

Zur Herstellung der Platten für die Ermittlung des Einflusses von Gaps und dem Anteil von 90°-Lagen auf Zug- und Biegeeigenschaften wurden Lagenaufbauten nach Bild 12 gewählt. Für beide Varianten ohne Gaps und mit 2 mm Gaps wurden identische Lagenaufbauten verwendet, um die Ergebnisse vergleichen zu können. Um Dickenschwankungen im Laminat zu verhindern, wurden aufeinanderfolgende gleichgerichtete Lagen immer um 50 % ihrer Breite versetzt zueinander abgelegt.

Lage	Zug			Lage	Biegung		
	0% 90°(UD)	15% 90°	30% 90°		0% 90°(UD)	15% 90°	30% 90°
1				1			
2				2			
3			90°	3			90°
4				4			
5		90°		5		90°	
6			90°	6			90°
7				7			
8-13	Symmetrisch			8			
	Symmetrisch			9			
	Symmetrisch			10			
	Symmetrisch			11			
	Symmetrisch			12			
	Symmetrisch			13			
	Symmetrisch			14-26	Symmetrisch		

Legende	
0° Lage	
0° Lage(50% versetzt)	
90° Layer	

Bild 11: Lagenaufbau für die Prüfkörper der Zugversuche (links) und Biegeversuche (rechts)

Ergebnisse und Diskussion

Kennwerte: Die gemessenen Kennwerte für die Preformkonfiguration „keine Gaps“ und „keine 90°-Lagen“, sind der Tabelle 4 zu entnehmen. Es handelt sich um die unidirektionalen Basiskennwerte des Laminats, welche mit den verwendeten Materialien und dem angewendeten Spreiz- und Legeverfahren hergestellt werden können.

Biegekennwerte - Einfluss der Gaps und der 90°-Lagen: Die gemessenen Kennwerte sind der Tabelle 5 zu entnehmen. Die wichtigsten Zusammenhänge können wie folgt zusammengefasst werden.

- Gaps haben keinen Einfluss auf das Biegemodul
- Die Biegefestigkeit reduziert sich um 3 %, wenn 2 mm breite Gaps eingebracht werden

- Die Biegefestigkeit reduziert sich um 8 % beim Einbringen von 90°-Lagen (Anteil: 30 %)

Die Ergebnisse zeigen, dass die Gaps kein Einfluss auf das Biegemodul der getesteten Proben haben. Die Reduktion der Biegefestigkeit ist mit 3 % bezogen auf den Absolutwert einer Konfiguration ohne Gaps gering. Es lässt sich eine geringere Reduktion der Biegefestigkeit bei Erhöhung des 90° Lagenanteils erkennen, als zu erwarten wäre. Durch die Position der 0°-Lagen im äußeren Bereich des Laminats, können diese im Biegefall die entstehenden Zug- und Druckkräfte weiter aufnehmen.

Die Standardabweichungen betragen im Mittel 3,75 % der Absolutwerte der Zugfestigkeit und 2,75 % der Absolutwerte des Zugmoduls.

Zugkennwerte - Einfluss der Gaps und der 90°-Lagen: Die gemessenen Kennwerte sind der Tabelle 5 zu entnehmen. Die wichtigsten Zusammenhänge können wie folgt zusammengefasst werden.

- Das Zugmodul reduziert sich um 2,6 %, wenn 2 mm breite Gaps eingebracht werden
- Die Zugfestigkeit reduziert sich um 7 %, wenn 2 mm breite Gaps eingebracht werden
- Die Reduzierung der Zugfestigkeit korreliert im gleichen Maße mit dem prozentualen Anteil an 90°-Lagen

Die Ergebnisse zeigen, dass der Einfluss der Gaps auf das Zugmodul gering ist. Der Einfluss auf die Zugfestigkeit mit einer Reduktion um 7% ist deutlich größer. Das Ergebnis zeigt, dass die durch Gaps induzierten Fehler zu einem früheren Versagen in den Proben führen.

Die Standardabweichungen betragen im Mittel 5 % der Absolutwerte der Biegefestigkeit und 4 % der Absolutwerte des Biegemoduls.

Tabelle 4: Kennwerte: Keine Gaps, 8m% Binderanteil – 0% 90° Lagen; Faservolumengehalt auf 55 % normiert

Kennwert	Einheit	Wert (Standardabw.)	Norm
0° Zugfestigkeit	[MPa]	2079 (\pm 133)	DIN-EN ISO 527-4
0° Zugmodul	[GPa]	117 (\pm 4)	DIN-EN ISO 527-4
90° Zugfestigkeit	[MPa]	42 (\pm 4)	DIN-EN ISO 527-5
90° Zugmodul	[GPa]	7.2 (\pm 0,3)	DIN-EN ISO 527-5
0° Biegefestigkeit	[MPa]	1088 (\pm 39)	DIN-EN ISO 14125B
0° Biegesteifigkeit	[GPa]	96 (\pm 3)	DIN-EN ISO 14125B
Schubfestigkeit	[MPa]	76 (\pm 2)	DIN-EN ISO 14129
Schubmodul	[GPa]	3,4 (\pm 0,1)	DIN-EN ISO 14129
0° Druckfestigkeit	[MPa]	834 (\pm 105) *	DIN-EN ISO 14126 *
0° Drucksteifigkeit	[GPa]	106 (\pm 3) *	DIN-EN ISO 14126 *
Interlaminare Scherfestigkeit	[GPa]	56 (\pm 2)	EN 2563

*Da es nicht möglich war, eine laute Norm geforderte 4 mm dicke Platte mit unidirektionalem Lagenaufbau und ohne Gaps zu fertigen, werden hier die Werte einer 2 mm dicken Platte mit 15 % 90°-Lagen ohne Gaps angegeben.

Tabelle 5: Zug- und Biegekenwerte in 0°-Richtung, 8m% Binderanteil; Faservolumengehalt auf 55 % normiert

Kennwert	Einheit	kein Gap			2 mm Gap		
		UD	15 % 90°	30 % 90°	UD	15 % 90°	30 % 90°
0° Zugfestigkeit	[MPa]	2079 (\pm 133)	1937 (\pm 79)	1589 (\pm 26)	1944 (\pm 121)	1773 (\pm 92)	1514 (\pm 47)
0° Zugmodul	[GPa]	117 (\pm 4)	105 (\pm 3)	88 (\pm 1)	117(\pm 5)	98 (\pm 4)	86 (\pm 2)
0° Biegefestigkeit	[MPa]	1088 (\pm 39)	1010 (\pm 84)	977 (\pm 37)	1032 (\pm 53)	972 (\pm 33)	956 (\pm 55)
0° Biegesteifigkeit	[GPa]	96 (\pm 3)	91 (\pm 8)	70 (\pm 2)	98 (\pm 6)	88 (\pm 2)	70 (\pm 2)

Tabelle 6: Ergebnisse der Infiltrationszeiten und B (Materialfaktor)

Laminat- dicke	kein Gap						2 mm Gap					
	UD	B	15 % 90°	B	30 % 90°	B	UD	B	15 % 90°	B	30 % 90°	B
[mm]	[min]	[min/ mm ²]	[min]	[min/ mm ²]	[min]	[min/ mm ²]	[min]	[min/ mm ²]	[min]	[min/ mm ²]	[min]	[min/ mm ²]
1	17,0	17,0	9,5	9,5	11,0	11,0	15,5	15,5	5,0	5,0	3,5	3,5
1,5	79,0	35,1	71,0	31,6			36,0	16,0				
2					35,0	8,8			40,0	10,0	14,0	3,5
3									57,0	6,3	27,0	3,0
4											59,0	3,7

Laminatqualität - Schlibbildanalyse: Im Folgenden sind repräsentative Schlibbildanalysen der hergestellten Laminare dargestellt. Wie auf Bild 13 zu sehen, konnten sehr homogene Laminare hergestellt werden. Es wurde festgestellt, dass die Qualität des Laminats maßgeblich mit der Qualität der Spreizung zusammenhängt. Auf Bild 14 und 15 sind mögliche Fehler zu sehen, welche auf eine fehlerhafte Spreizung hinweisen. Es kann lokal zu Harzanhäufungen oder auch Dicken-schwankungen kommen. Bild 16 zeigt ein 2 mm Gap und die damit eingehende Ondulation benachbarter Lagen.

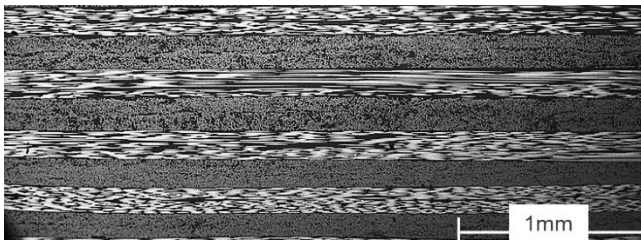


Bild 12: Lagenaufbau [2 x 0° / 2 x 90°], keine Gaps

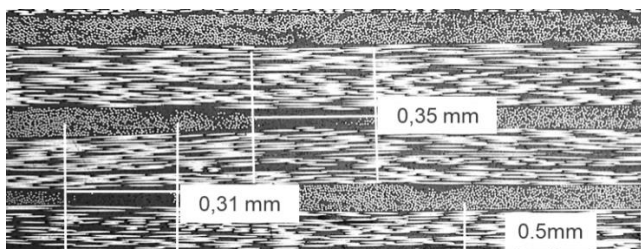


Bild 13: Lagenaufbau 30 % 90°, keine Gaps, Harzanhäufung aufgrund von Fehlern beim Spreizen

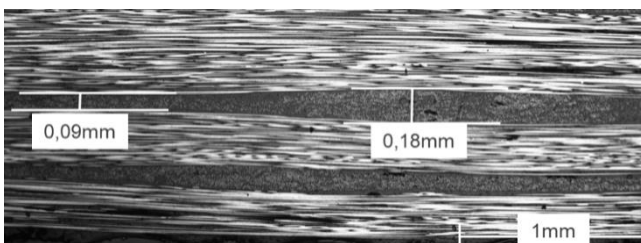


Bild 14: Lagenaufbau 15 % 90°, keine Gaps, Dicken-schwankung aufgrund ungleichmäßiger Spreizung

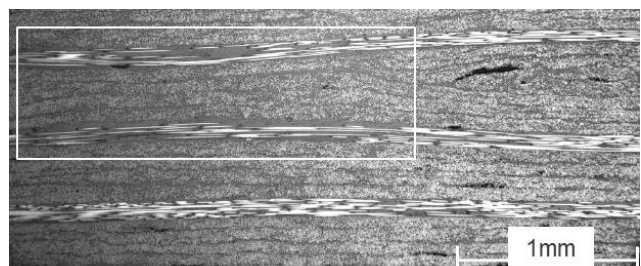


Bild 15: Lagenaufbau 15 % 90°, 2 mm Gaps, Gap => lokale Ondulation in 90°-Lagen

Ermittlung der Infiltrationszeit: Zur Vorhersage der Infiltrationszeit eines bestimmten Lagenaufbaus, wurde der Ansatz nach Darcy gewählt. Da die Laminatdicke sehr gering ist, wurde der Einfluss der Schwerkraft auf die Druckdifferenz vernachlässigt.

Gesetz von Darcy, [8]

$$K_z = - \frac{q * \eta * \Delta z}{A * \Delta p} \quad (1.1)$$

$$q = \frac{A * z}{\eta * t} \quad (1.2)$$

$$t(z) = \frac{\eta}{K_z * \Delta p} * z^2 \quad (1.3)$$

mit $\eta, \Delta p, K_z = konst$
folgt $t(z) = B * z^2 \quad (2)$

- Mit K_z = Permeabilität in z-Richtung
- q = Volumenstrom
- z = Weg in z-Richtung
- t = Zeit
- η = dynamische Viskosität
- Δp = Druckdifferenz
- B = Materialfaktor (bei $\eta, \Delta p, K_z = konst.$)

Wie aus (2) hervorgeht stellt die Infiltrationszeit in Abhängigkeit der Preformdicke (z-Richtung) bei konstanter Viskosität, konstantem Differenzdruck und unveränderter Permeabilität eine Parabel dar, welche durch den Nullpunkt geht. Daraus folgt, dass die Infiltrationszeit einer bestimmten Lagenkonfiguration quadratisch mit der Dicke steigt. Durch Bestimmung eines Stützpunktes, kann eine Kurve erzeugt werden, aus der die Infiltrationszeiten für alle Dicken der Konfiguration abgelesen werden können. Zur Bestimmung der Kurven wurden Infiltrationszeiten gemessen und nach (2) der Materialfaktor B für die Kurven berechnet. Die Ergebnisse der gemessenen Konfigurationen bzw. Stützpunkte sind in Tabelle 6 dargestellt. Zur Bestimmung des Materialfaktors B einer Kurve wurde der Mittelwert der B-Werte einer Konfiguration verwendet.

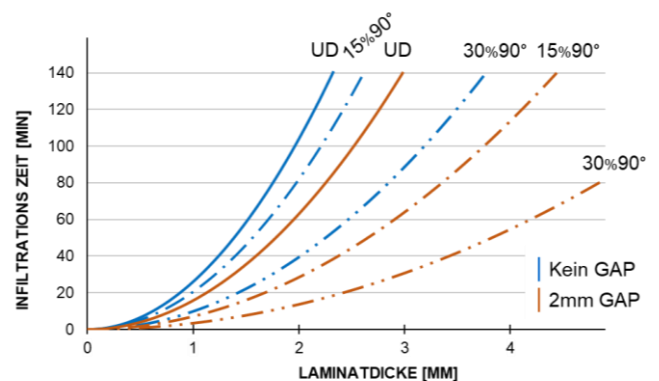


Bild 16: Infiltrationszeiten der verschiedenen Konfigurationen in Abhängigkeit der Laminatdicke

In Bild 17 ist zu erkennen, dass der Einfluss der Gaps auf die Infusionsgeschwindigkeit für unidirektionale Laminat im Verhältnis zu den Konfigurationen mit 90°-Anteilen gering ist. Die Infusionsgeschwindigkeit bei Konfigurationen ohne Gap, aber mit steigenden 90°-Anteil, beträgt bei 30 % 90°-Anteil noch 33 % im Vergleich zum unidirektionalen Laminat. Im Durchschnitt beträgt die Infusionszeit einer Konfiguration mit 2 mm breiten Gap im Vergleich zur Konfiguration ohne GAP nur noch 25 % der Zeit. Auf Bild 18 wird dargestellt, wie sich die Infiltrationszeit eines 3 mm dicken Laminats mit 2 mm Gaps, bei dem in dieser Arbeit verwendeten Matrixsystem mit einer Topfzeit von 120 min, in Abhängigkeit der Lagenkonfiguration bestimmen lässt. Ein rein unidirektionaler Lagenaufbau ist bei einer Laminatdicke von 3 mm, im VAP-Prozess, nicht herstellbar, da die Infusionsdauer die Topfzeit übersteigen würde. Für eine Preform mit 15 % 90°-Lagen beträgt die Zeit 65 min, für einen Anteil von 30 % 90°-Lagen 30-min.

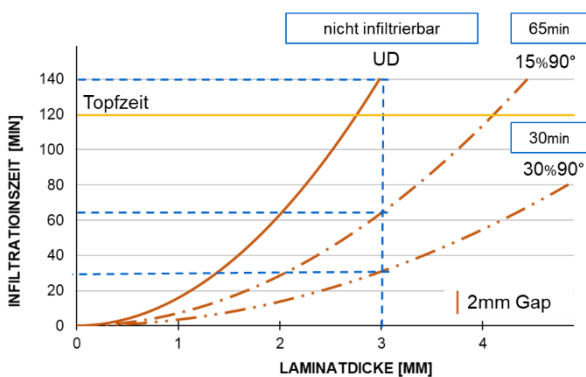


Bild 17: Beispiel der Ermittlung der Infiltrationszeit

Anwendungsbeispiele: Im Rahmen des Projekts wurden mehrere Prototypen entwickelt und erfolgreich hergestellt. Dies diente zur Verifizierung der Prozesskette. Es konnte gezeigt werden, dass sich mit der DFP-Technik zuverlässig Preforms und Bauteile mit höchsten mechanischen Anforderungen herstellen lassen.

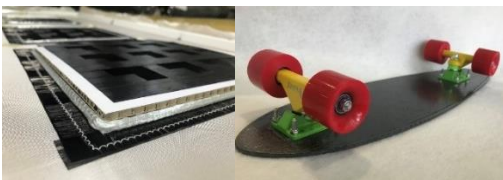


Bild 18: Sandwichtaufbau DFP Crosslayer Decklagen mit TFP Kantenabschluss und Skateboard

Zusammenfassung

Die Prozesssicherheit, wenig Verschnitt und eine flexible Produktion konnten für den DFP-Prozess nachgewiesen werden. Dies ist für neue Produktentwicklungen ebenso gefordert, wie für kleine und mittlere Serien. Durch Machbarkeitsanalysen konnte gezeigt werden, dass innerhalb kürzester Zeit, Bauteile mit sehr hohem Leichtbaupotential mit einfachen Mitteln

hergestellt werden können. Es wurden wichtige Einflüsse der Prozessparameter des DFP-Prozesses auf die mechanischen Eigenschaften der Laminat ermittelt. Einfache Richtlinien wurden erstellt, welche sich zur Beeinflussung und Vorhersage von Infusionszeiten heranziehen lassen. Die beiden variablen Prozessparameter „Gaps“ und „Anzahl von 90°-Lagen“ im Laminat wurden systematisch mit ihrem quantitativen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften (Zug- und Biegekennwerte) des Laminats verknüpft.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die gute Zusammenarbeit mit der Firma M&A Dieterle in zwei öffentlich geförderten Projekten. Zum einen im BMWi ZIM Projekt „fixedTow“ im Rahmen dessen der Prozess zur Spreizung und Bebindung von Kohlenstofffasern entwickelt wurde. Zum anderen im MWK Projekt des Landes Baden-Württembergs, im Rahmen des InnoChallenge Programms, in welchem die DFP Anlagentechnik „Crosslayer“ entwickelt wurde.

Literatur

- [1] OLIVER RIMMEL, DAVID BECKER & PETER MITSCHANG, Impact of Stitching on Permeability and Mechanical Properties of Preforms Manufactured by Dry Fiber Placement, Polymer Composites 2018, DOI 10.1002/pc.24911
- [2] CW Composites World Magazine, Seite 30-32, June 2018
- [3] KAVEN CROFT, LARRY LESSARD, DAMIANO PASINI, MEHDI HOJJATI, JIHUA CHEN UND ALI YOUSEFPOUR. „Experimental study of the effect of automated fiber placement induced defects on performance of composite laminates“. In: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 42.5 (2011), S. 484–491. issn: 1359835X. doi: 10.1016/j.compositesa.2011.01.007.
- [4] HEIECK F., Qualitätsbewertung von Faser-kunststoff-verbunden mittels optischer Texturanalyse auf 3D - Preformoberflächen [Dissertation], Stuttgart 2019 Institut für Flugzeugbau der Universität Stuttgart
- [5] OLIVER RIMMEL, DAVID BECKER & PETER MITSCHANG (2016), Maximizing the out-of-plane permeability of preforms manufactured by dry fiber placement, Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science, 2:3-4, 93-102, DOI: 10.1080/20550340.2016.1260900
- [6] Coriolis, www.coriolis-composites.com, Aufruf 17.01.2021
- [7] CAROSELLA, S. Analyse und Verbesserung des Faserablegeverfahrens Tailored Fibre Placement zur kostenoptimierten Preformherstellung [Dissertation], Stuttgart 2015 Institut für Flugzeugbau der Universität Stuttgart
- [8] H. DARCY, Les Fontaines Publiques de la ville de Dijon (The public fountains of the city of Dijon). Paris: Libraire des Corps Imperiaux des Ponts et Chaussées et des Mines (1856)