

VERGLEICH VON LEGETECHNOLOGIEN FÜR DIE AUTOMATISIERTE GLASFASERABLAGE IN DER GLARE-BAUTEILFERTIGUNG

C. D. Nguyen¹, C. Krombholz², H. Ucan³

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)
Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

Adresse: Ottenbecker Damm 12, 21684 Stade, Deutschland

Email: ¹chinh.nguyen@dlr.de, ²christian.krombholz@dlr.de, ³hakan.ucan@dlr.de

Internet: www.dlr.de/fa

Zusammenfassung

Im Forschungsverbundprojekt AutoGlare, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), ist grundlegend untersucht worden, ob die in der CFK-Bauteilfertigung eingesetzten Fiber Placement Technologien auch für die automatisierte Ablage von Glasfaserprepreg in der Glare-Bauteilfertigung eingesetzt werden können. Dabei sind zunächst durch 2D Versuche die generelle Verarbeitbarkeit des Materials geprüft und geeignete Prozessparameter wie Wärmezufuhr, Geschwindigkeit oder Anpresskraft hinsichtlich Ablegefähigkeit und -qualität anhand des Tacks oder Luftpfeilschlüssen ermittelt worden. Weiterhin ist für eine parallelisierte Ablage der Materialbahnen in einem doppelt gekrümmten Formwerkzeug untersucht worden, in wieweit sich die unterschiedlichen Materialbreiten mit Steering (entlang einer seitwärts gekrümmten Bahn) ablegen lassen. Hier hat sich gezeigt, dass das Steeringverhalten erheblich von der Materialbreite und der verwendeten Technologie abhängig ist.

Die Ergebnisse der Vorversuche fließen letztendlich in die Fertigung von zwei Rumpfhautfeldern, jeweils hergestellt mit der Automated Fiber Placement und Automated Tape Laying Technologie, womit der Einsatz beider Technologien für die automatisierte Glasfaserablage für eine GLARE Fertigung erfolgreich demonstriert werden kann. Durch den Einsatz der verschiedenen Technologien haben sich Unterschiede in den Prozesszeiten, Materialüberlappungen und Materialverbräuche ergeben.

1. EINLEITUNG

Der stetig zunehmende Luftverkehr stellt kontinuierlich wachsende Ansprüche an neue Flugzeugstrukturen im Hinblick auf Gewichtsreduzierung für einen reduzierten Treibstoffverbrauch. Hieraus ergeben sich u.a. Anforderungen Materialkonzepte zukünftiger Verkehrsflugzeuge derart zu gestalten, dass diese nicht nur einen hohen Anteil an Leichtbauwerkstoffen in der Primärstruktur besitzen, sondern zugleich auch bessere Performance-Eigenschaften mit sich bringen.

Der Einsatz von glasfaserverstärktem Aluminium (GLARE) bündelt die Anforderungen der Luftfahrtindustrie aufgrund der geringen Dichte und des sehr guten Schadenstoleranzverhaltens. Bei auftretenden Schäden besitzt das Material über ein definiertes Zeitintervall die Eigenschaft, die im Flug auftretenden Belastungen ohne Gesamtbauwerkzeugversagen standzuhalten [1, 2, 3].

Im Airbus A380 kommt neben herkömmlichen monolithischen Aluminiumwerkstoffen auch GLARE in den Rumpfhautfeldern zum Einsatz (BILD 1). Gefertigt werden diese Hautfelder mit einer Gesamtgröße von 469 m² durch den Luftfahrtzulieferer Premium AEROTECH GmbH in Nordenham und Fokker Technologies in Pappendrecht. Der manuelle Produktionsprozess ist für 50 Flugzeuge im Jahr ausgelegt und liefert im Jahr etwa 23.500 m² Rumpfhautfelder aus Glare [4, 5].

Für eine Anwendung dieses Materials für Kurzstreckenflugzeuge der nächsten Generation ist eine Erhöhung der Produktivität auf 60 Flugzeuge im Monat erforderlich. Das

dadurch verfolgte Produktionsziel von 10.000 m² Glare-Rumpfhautfeldern pro Monat kann aus diesem Grund mit dem aktuellen manuellen Produktionsprozess nur durch eine kostenintensive Parallelisierung von Fertigungsstrecken erreicht werden. Der Einsatz neuer Methoden und Technologien ist deshalb notwendig.

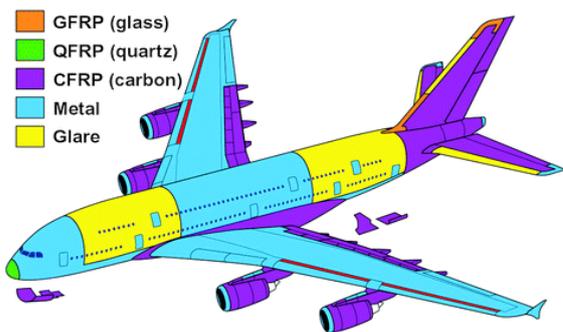


BILD 1: Eingesetzte Materialien im Airbus A380 [6]

Die Entwicklung einer neuen Prozesskette für die automatisierte Rumpfschalenfertigung zukünftiger Kurzstreckenflugzeuge ist folglich im Fokus der wissenschaftlichen Arbeiten im Verbundprojekt AutoGlare. Ein Schwerpunkt stellt die Untersuchung der automatisierten Ablage des Glasfasermaterials dar. Die Ergebnisse dazu werden in diesem Rahmen vorgestellt.

2. STAND DER TECHNIK

Nachfolgend erfolgt ein kurzer Überblick über den aktuellen Prozess der GLARE-Fertigung sowie Fertigungstech-

nologien zur automatisierten Faserablage, die alternativ zum Einsatz kommen könnten.

2.1. Glare-Fertigung

Die Herstellung von Glare-Bauteilen ist aktuell durch einen überwiegend manuellen Prozess geprägt. Dabei werden sowohl die Aluminiumbleche als auch das Glasfasermaterial durch geschulte Mitarbeiter auf einem Formwerkzeug positioniert (BILD 2). Auch das Ablegen der Klebstofffilme zum Verkleben zweier Aluminiumbleche (Splicen) wird manuell durchgeführt.



BILD 2: Manueller Fertigungsprozess der A380 Glare-Bauteile [7]

Vorteilhaft an diesem Fertigungsverfahren ist der geringe Investitionsaufwand, da neben einem Autoklav keine großen Anlagen benötigt werden. Nachteilig sind zum einen die Qualität des Bauteils und zum anderen die Produktionsraten, die je nach Mitarbeiter stark variieren können.

2.2. Automatisierte Fertigungstechnologien zur Faserablage

Im Vergleich zur manuellen Handablage kann durch eine Automatisierung der Fertigung eine Erhöhung der Produktivität bei gleichzeitiger Qualitätssteigerung erreicht werden [8]. Zudem variiert die Qualität der Bauteile verglichen mit der Handablage in einem deutlich kleineren Toleranzbereich. Auf dem Gebiet der Herstellung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) existieren heutzutage mehrere automatisierte Fertigungstechnologien, deren Einsätze je nach Anforderung mehr oder weniger geeignet sein können. BILD 3 stellt die wesentlichen Technologien dar.



BILD 3: Automatisierte Technologien für die Faserablage. Links: Pick & Place [9], oben: Automated Fiber Placement [10] unten: Automated Tape Laying [11]

Bei der Pick & Place Technologie werden vorkonfektionierte Zuschnitte (2D) automatisiert durch ein Greifersystem aufgenommen und an die dafür vorgesehene Position auf dem Formwerkzeug (2D oder 3D) abgelegt [12]. Durch die Automatisierung kann eine wiederholbar gute Positioniergenauigkeit der abgelegten Zuschnitte erreicht werden. Allerdings eignet sich diese Technologie aufgrund der Drapiereigenschaften des Fasermaterials überwiegend für einfach gekrümmte Lamine. Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Pick & Place Technologie für eine Glare-Bauteilfertigung wurden bereits bei der Firma PAG in Nordenham durchgeführt [4].

Zwei Faserlegetechnologien sind Automated Tape Laying (ATL) und Automated Fiber Placement (AFP). Im Gegensatz zur Pick & Place Technologie nehmen diese Technologien ganze Materialrollen auf und verarbeiten diese während der bahnbasierten Ablage. Dabei wird automatisch Material für die Ablage zugeführt, mit Hilfe einer Andrückereinheit auf den Untergrund angedrückt und am Ende einer Bahn (Course) geschnitten. Wenn notwendig, kann für eine bessere Klebrigkeit des Materials (Tack) auch Wärmeenergie hinzugeführt werden. Im Vergleich zur Handablage oder Pick & Place ist der Materialverschnitt hier deutlich geringer. Auch wenn ein Nachteil der Technologien die hohen Investitionskosten sind, nimmt deren Einsatz im Bereich des Flugzeugbaus aufgrund der sinkenden Preise stetig zu [13].

Industrielle ATL Maschinen verarbeiten üblicherweise Fasermaterial mit einer Breite von 150 mm, 300 mm oder 600 mm. Aufgrund der hohen Breite des Materials kann einerseits eine hohe Ablagerate und damit eine hohe Produktivität erreicht werden. Andererseits sinkt die Drapierfähigkeit des Materials mit zunehmender Breite, wodurch es bei stark doppelt gekrümmten Oberflächen zur Faltenbildung kommen kann. Aus diesem Grund ist die ATL Technologie überwiegend für 2D-Bauteile oder schwach gekrümmte Geometrie geeignet.

Im Vergleich dazu können AFP Maschinen gleichzeitig bis zu 32 separate Materialstreifen (Tows) nebeneinander ablegen. Durch die deutlich geringere Breite der einzelnen Tows (standardmäßig zwischen 3,17 mm bis 12,7 mm) gegenüber ATL-Material ist die Drapierfähigkeit deutlich erhöht. Damit ist die AFP Technologie hauptsächlich für stark doppelt gekrümmte Bauteile geeignet, kann aber auch für flache Bauteile verwendet werden. Zudem ist der Materialverschnitt bei AFP deutlich geringer als bei ATL, da aufgrund der geringeren Towbreite deutlich konturnaher abgelegt werden kann. Ein Nachteil von AFP gegenüber ATL ist die üblicherweise geringere Breite eines abgelegten Courses wodurch die Produktivität vergleichsweise schlechter ist.

3. EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

Im Rahmen dieses Papers wird die automatisierte Ablage von Glasfaserprepregmaterial mit den Fiber Placement Technologien ATL und AFP untersucht und miteinander verglichen. Dazu wird zunächst das Materialverhalten während der Ablage hinsichtlich Verarbeitbarkeit und Ablegeverhalten entlang eines gekrümmten Courses ermittelt. Weiterhin werden am Beispiel einer Hautfeldfertigung die beiden Technologien miteinander verglichen.

3.1. Testaufbau

Die Untersuchungen werden mit der GroFi®-Anlage in Stade, am Institut für Faserverbundleichtbau und Adapto-

nik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) durchgeführt. Gewöhnliche Fertigungsanlagen arbeiten entweder mit einer ATL- oder AFP-Technologie. Im Gegensatz dazu setzt die GroFi®-Anlage auf den Einsatz von beiden Technologien, wodurch mehrere AFP und ATL Einheiten simultan an einem Bauteil arbeiten können [14]. Mit diesem Ansatz soll eine deutlich höhere Produktivität im Vergleich zu aktuellen Anlagen demonstriert werden. (BILD 4).



BILD 4: Überblick über die GroFi®-Anlage am DLR in Stade

Die Versuche werden mit roboterbasierten ATL- und AFP-Technologien durchgeführt. Beide Technologien sind mit der Roboterkinematik KUKA KR 500-2 ausgerüstet. Während die ATL-Einheit 150 mm breites Tapematerial ablegt, legt die AFP-Einheit zeitgleich 16 Tows mit einer Breite von 6,35 mm ab.

Das in diesem Rahmen untersuchte GF-Material ist das DLS1611-1 der Firma Hexcel mit S2 Glasfasern. Es hat einen Harzanteil von 28 % sowie eine Aushärtetemperatur von 125°C. Bei den Aluminiumlagen handelt es sich um AL2024 mit Lagendicken von 0,3 mm und 0,4 mm.

3.2. Materialverhalten während der Verarbeitung

Um das Verhalten des Materials während der Ablage zu ermitteln, werden nachfolgende Untersuchungen durchgeführt.

- Allgemeine Verarbeitbarkeit des Materials
- Genauigkeitsuntersuchungen der Materialablage
- Verhalten des Materials in doppelt gekrümmten Formwerkzeugen (Steering)

Die Untersuchungen zur allgemeinen Verarbeitbarkeit des Materials werden an einem ebenen, vertikalen Formwerkzeug durchgeführt. Der Fokus liegt zum einen auf der Verarbeitung innerhalb der Legetechnologie, wie Schneiden und Fördern. Zum anderen auf dem Ablegen des Materials auf der Formwerkzeugoberfläche. Dazu werden Courses mit einer Länge von 1 m und einer Geschwindigkeit von 12 m/min abgelegt. Für ein möglichst gutes Ablageergebnis (ausreichende Anhaftung auf der Oberfläche, keine Luftpneinschlüsse) können verschiedene Prozessparameter wie Ablegegeschwindigkeit, Anpresskraft oder Temperatur variiert werden. Getestet wird sowohl die Ablage auf dem in Glare eingesetzte Aluminiumblech als auch auf dem Fasermaterial selbst.

Die Courses sollen ohne Spalt (Gap) und mit möglichst geringer Überlappung (Overlap) abgelegt werden. Für die

Generierung der Ablegeprogramme müssen daher geeignete Abstände zwischen den Courses definiert werden, weswegen die Wiederholgenauigkeiten der Ablage zu ermitteln sind. Dazu werden einzelne Courses ausgewählt und mit 5-maliger Wiederholung automatisiert abgelegt. Nach jeder einzelnen Ablage wird die äußere Kante des Courses an insgesamt 14 Punkten mit einem Messtaster eines Leica AT960 Lasertrackers vermessen (BILD 5). Die Messpunkte 1+2 sowie 8+9 entsprechen den beiden Messpunkten am Courseanfang und Courseende, die in den Genauigkeitsuntersuchungen nicht betrachtet werden.

Die Untersuchungen mit der ATL-Technologie werden in einem 3D Formwerkzeug durchgeführt. Die Untersuchungen für AFP finden auf einem ebenen, vertikal positionierten Formwerkzeug und mit vier Tows statt.

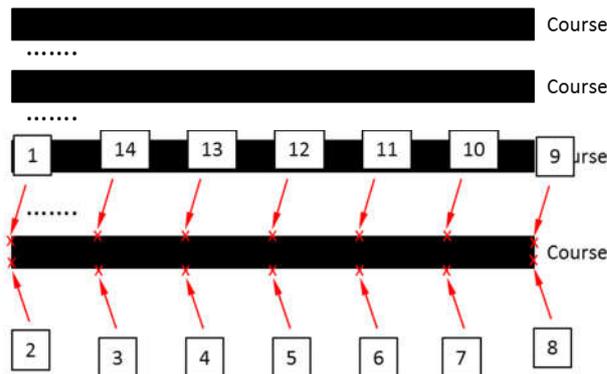


BILD 5: Schematische Darstellung der Messpunkte an einem abgelegten Course

Mit dem Ziel einer Hautfeldfertigung, das doppelt gekrümmte Oberflächen besitzt, wird darüber hinaus auch die Materialablage auf doppelt gekrümmte Oberflächen untersucht. Dabei soll das Fasermaterial nach Möglichkeit mit einer konstanten Überlappung und ohne Faserwinkelabweichung abgelegt werden. Mit einer konstanten Materialbreite und ohne Konturschnitt können beide Ziele nur für 2D-Bauteile erreicht werden. Sobald auf einer doppelt gekrümmten Oberfläche abgelegt wird, kann je nach Ablegestrategie nur das eine oder das andere Ziel erreicht werden. Soll der Faserwinkel konstant bleiben, kommt es über die gesamte Courselänge unvermeidlich zu einer variierenden Materialüberlappung. Lokale Materialaufdickungen im Laminat, unnötiger Materialverbrauch sowie ein erhöhtes Bauteilgewicht sind die Folge. Um diese Nachteile zu umgehen kann mit einer parallelisierten Ablage der Courses abgelegt werden. Dazu muss das Material allerdings mit einer Bahnkrümmung (Steering) abgelegt werden, was wiederum zu einer Faserwinkelabweichung führt.

Um die Auswirkungen des Steerings auf die Ablegequalität zu ermitteln und bewerten zu können, werden Steeringuntersuchungen für beide Legetechnologien in der Ebene durchgeführt. Dazu wird die Ablage des Hautfeld-demonstrators zunächst in der CAM-Umgebung ACES der Firma Fives programmiert und simuliert. Dadurch können die zu erwartenden Steeringradien im Vorfeld ermittelt und ein zu testender Radienbereich definiert werden. BILD 6 stellt die Steeringradien der einzelnen Courses für die 0° Orientierung dar, die zu erwarten sind. Hieraus ergibt sich, dass lokal mit einem Steeringradius von 12 m abgelegt werden muss um eine parallelisierte Ablage der Courses zu erreichen. Deshalb werden für den ATL-Prozess Stee-

ringradien zwischen 30 m und 10 m getestet. Aufgrund der geringen Towbreite bei AFP wird erwartet, dass deutlich kleinere Steeringradien möglich sind, weshalb das Testfenster in diesem Fall zwischen 15 m und 2 m liegt.

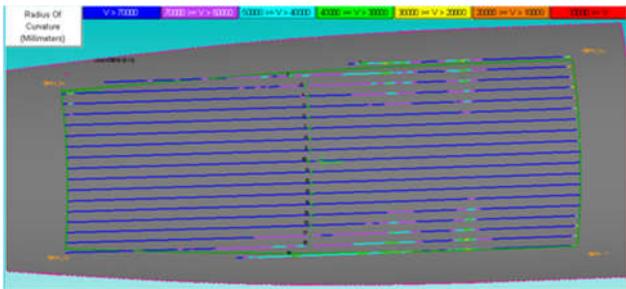


BILD 6: Simulation einer parallelisierten Ablage der 0° Orientierung in ACES

3.3. Hautfeldfertigung

Die finale Fertigung zweier Hautfelder dient der Gegenüberstellung der Legetechnologien ATL und AFP. Neben Qualitätsunterschieden im Bauteil aufgrund unterschiedlicher Legestrategien werden auch, bedingt durch die unterschiedlichen Legetechnologien, Materialverbräuche und Fertigungszeiten miteinander verglichen.

Bei den finalen Demonstratoren handelt es sich um einen Ausschnitt eines unteren Flugzeug-Rumpfabschnitts. Hervorzuheben ist hierbei die Geometrie des Demonstrators, die von einem zylindrischen zu einem doppelt gekrümmten Bereich verläuft. Das dazugehörige Formwerkzeug ist in BILD 7 dargestellt. Die Demonstratoren sind ca. 4,8 m lang und 1,7 m breit und haben einen 3/2-Glare-Laminataufbau was bedeutet, dass das Laminat aus drei Aluminium- und zwei Glasfaserschichten besteht. Die Glasfaserschichten wiederum bestehen jeweils aus einer 0° und einer 90° Lage. Der genaue Lagenaufbau ist in BILD 8 dargestellt. Die 3D umgeformten Aluminiumlagen werden manuell eingebracht. Anschließend erfolgt eine Aushärtung der Demonstratoren im Autoklav.



BILD 7: Formwerkzeug für die finalen Demonstratoren mit einer doppelt gekrümmten Oberfläche.

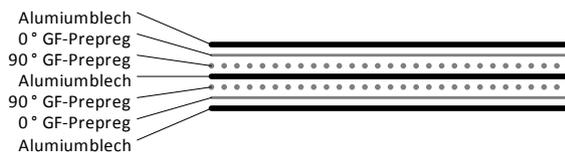


BILD 8: Lagenaufbau der Glare-Demonstratoren

4. ANALYSE

Nachfolgend werden die aus Kapitel 3 durchgeführten Experimente ausgewertet und analysiert.

4.1. Analyse des Materialverhaltens

Da das untersuchte GF-Material für eine manuelle Handablage ausgelegt und entwickelt wurde, besitzt es einen im Vergleich zu CFK-Prepregs der Luftfahrtindustrie niedrigeren Tack. Nichtsdestotrotz kann es mit beiden Technologien verarbeitet werden. Durch Anpresskräfte im Bereich von ca. 80 N je 10 mm Rollenbreite und Zufuhr von Wärmeenergie mit Hilfe von Infrarotstrahlern kann eine flächige Anhaftung des Fasermaterials sowohl auf Aluminium als auch auf Glasfaseruntergrund erreicht werden. Bei der AFP Technologie hat sich herausgestellt, dass eine ausreichende Wärmezufuhr vor allem am Anfang eines Courses wichtig für eine ausreichende Anhaftung ist. Ist dies nicht gegeben, tendiert das abgelegte Material aufgrund der zunehmenden Towspannung während des Beschleunigungsvorgangs zur Ablösung. Bei der ATL Technologie wiederum ist darauf zu achten, dass nicht das abzulegende sondern das bereits abgelegte Material erwärmt wird. Wird das abzulegende Material erwärmt, erhöht sich auch der Tack zwischen Material und Trägerpapier, das auch zum Fördern des Materials verwendet wird. Ein beschädigungsfreies Ablösen vom Trägerpapier vor dem Ablegepunkt ist dann nicht mehr möglich.

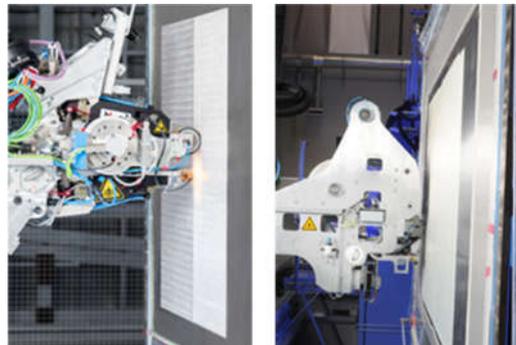


BILD 9: Materialversuche mit AFP (links) und ATL (rechts) an einem ebenen Formwerkzeug

Das Fasermaterial kann mit den Legetechnologien verarbeitet werden. Sowohl bei der Führung des Materials vom Fasermagazin bis zum Endeffektor beim AFP, als auch die Bandführung beim ATL treten keine nennenswerten Probleme auf. Das Schneiden des Fasermaterials am Ende eines Course kann bei AFP durch Stanzen und bei ATL durch Ultraschallschneiden prozesssicher durchgeführt werden.

Die Wiederholgenauigkeit der Ablage wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst, die in BILD 10 dargestellt sind.

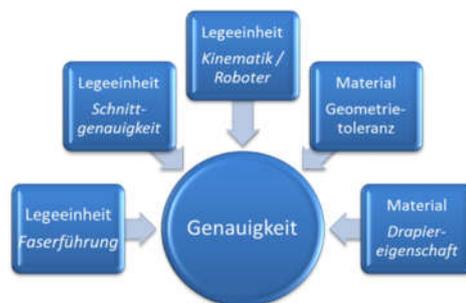


BILD 10: Einflussgrößen auf die Wiederholgenauigkeit einer automatisierten, bahnbasierten Faserablage

Neben den Genauigkeiten der Kinematik und den geometrischen Materialtoleranzen ergeben sich ebenfalls Einflüsse aus der Legeeinheit (Faserführung, Schnittgenauigkeit) sowie der Materialeigenschaften bezüglich des Drapierverhaltens.

In BILD 11 sind die ermittelten Standardabweichungen für ausgewählte Courses sowohl für 0° als auch 90° Orientierung dargestellt.

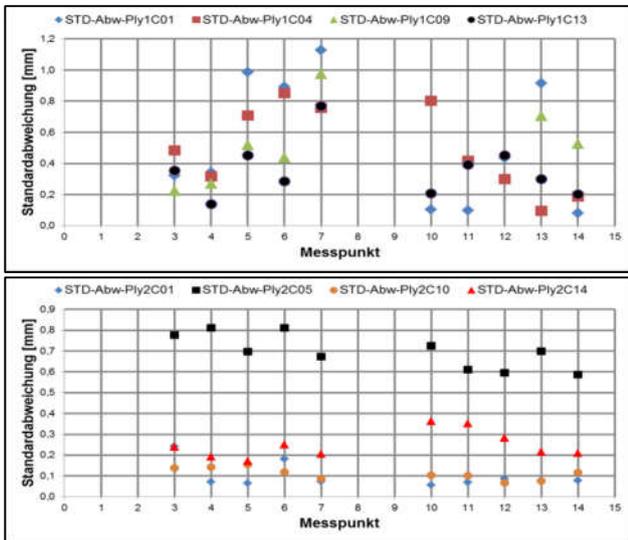


BILD 11: Darstellung der Standardabweichungen des ATL-Prozesses für die 0° Orientierung (oben) und 90° Orientierung (unten). C=Course.

Die ermittelten Standardabweichungen für ATL in 3D sind hierbei maximal 1,1 mm und unterscheiden sich zwischen den beiden Plies. Ply 2 mit einer Faserorientierung von 90° besitzt entlang der einzelnen Messpunkte pro Course einen annähernd konstanten Verlauf der Standardabweichung, wohingegen bei Ply 1 mit einer Faserorientierung von 0° größere Schwankungen auftreten, die zum Courseanfang (Messpunkte 3 + 14) unterhalb von < 0,6 mm und zum Courseende (Messpunkte 7 + 10) auf ≤ 1,1 mm ansteigen. Die unterschiedlichen Verläufe der Standardabweichung lassen sich aller Voraussicht nach auf unterschiedliche Krümmungsradien des Formwerkzeugs in X- und Z-Richtung zurückführen.

- $r_x \approx 1.700 \text{ mm bis } 2.000 \text{ mm}$
- $r_z \approx 16.000 \text{ mm bis } 22.800 \text{ mm}$

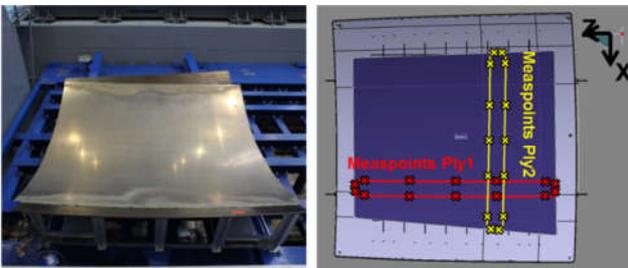


BILD 12: Formwerkzeug für Versuche zur Wiederholgenauigkeit

Daraus resultiert für Ply 1 aufgrund des kleineren r_x quer zur Legerichtung eine größere Inhomogenität der Materiallänge, da in der Materialmitte mehr Materiallänge erforderlich ist, als an den seitlichen Materialkanten. Dies führt aufgrund der Limitierung der Materialverschönerung bei ATL-

Prepregmaterialien sowie der Anpresskraft zu einem 3D-Drapierverhalten des Materials und somit zu größeren Standardabweichungen zum Ende eines Courses.

Für Ply 2 hingegen ist der Krümmungsradius r_z quer zur Legerichtung um eine Größenordnung größer, wodurch sich die Inhomogenität der Materiallänge deutlich geringer ausprägt und ein 2D-Drapierverhalten angenommen werden kann. Darüber hinaus ist für Ply 2 ersichtlich, dass die Streuung der Standardabweichungen 0,25 mm beträgt, jedoch die Niveaus der Standardabweichungen relativ stark abweichen.

Bei den Untersuchungen mit AFP sind insgesamt 12 Punkte entlang der äußeren Kante eines abgelegten Courses gemessen worden. Dementsprechend sind die Punkte 7+8 sowie 1+2 der Anfang und das Ende eines Courses und werden hier nicht weiter berücksichtigt. Für beide Orientierungen liegen die Standardabweichungen zwischen < 0,1 mm und < 0,6 mm auf einem ähnlichen Niveau (BILD 13). Verglichen mit ATL und einer maximalen Standardabweichung von 1,1 mm ist diese bei AFP somit um bis zu 0,5 mm geringer. Als erheblicher Einflussfaktor kann zum einen die Ablegeoberfläche (3D bei ATL, 2D bei AFP) angenommen werden. Wie bereits erwähnt, kommt es in der 3D Ablage zu einem Verschärfen des Fasermaterials und damit zu einer zusätzlichen Variation der Materialbreite. Dieses Verschärfen findet bei der 2D Ablage nicht statt. Zum anderen sind die Breitentoleranzen des Fasermaterials unterschiedlich. Während sie bei 150 mm Material bei +0/-0,75 mm liegt, beträgt die Toleranz bei 6,35 mm Material $\pm 0,127 \text{ mm}$. Den genauen Einfluss dieser beiden Faktoren gilt es in nachfolgenden Untersuchungen genauer zu ermitteln.

Weiterhin ist bei der 0° Ablage zu erkennen, dass die in Ablegerichtung rechte Coursekante (Messpunkte 9-12) eine deutlich bessere Wiederholgenauigkeit aufweist als die linke Coursekante (Messpunkte 3-6). Bei der 90° Ablage hingegen ist eine Verbesserung der Wiederholgenauigkeit von Courseanfang (Messpunkte 6+7) zum Courseende (Messpunkte 3+12) zu beobachten. Weiterführende Untersuchungen bezüglich der Ursachen stehen hier allerdings noch aus.

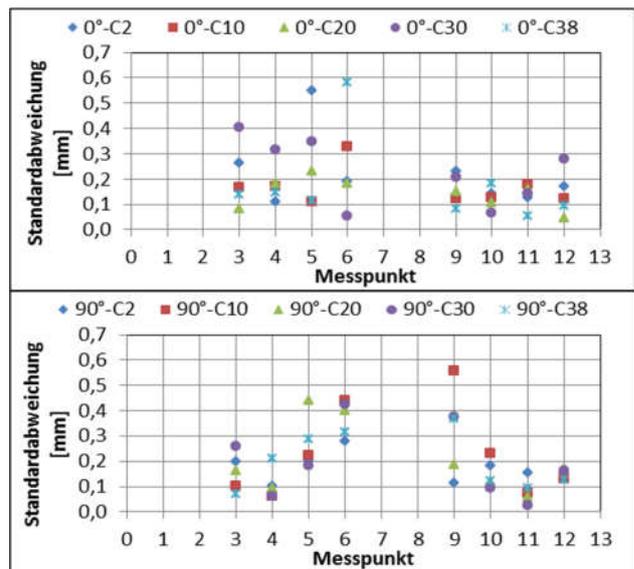


BILD 13: Darstellung der Standardabweichungen des AFP-Prozesses für die 0° Orientierung (oben) und 90° Orientierung (unten)

Hinsichtlich Steering ergeben sich zwischen ATL und AFP deutliche Unterschiede im Materialverhalten. Im BILD 14 sind die Ergebnisse der ATL-Ablagen für Steeringradien von $R = 30\text{ m}$, 20 m und 15 m dargestellt. Wie zu erkennen ist, treten in allen Fällen Falten in der Ablage auf. Selbst bei einem Steeringradius von 30 m ist es nicht möglich, fehlerfrei abzulegen. Während hier entlang des Courses einzelne Längsfalten auftreten, bilden sich mit Abnahme des Steeringradius auch Falten quer zur Ablagerichtung aus. Zudem nimmt deren Anzahl auch deutlich zu. Eine fehlerfreie Ablage mit 12 m Steeringradius, wie dies laut Simulation für die Ablage des Zielbauteils notwendig ist, kann somit nicht erreicht werden. Eine Verwendung der parallelisierten Ablage als Strategie für den ATL-Prozess mit 150 mm breitem Material ist daher nicht fehlerfrei möglich.



BILD 14: Ablage mit 150 mm breitem Material und verschiedenen Steeringradien auf ebenem Untergrund

Darauf aufbauende Untersuchungen im doppelt gekrümmten Formwerkzeug mit der Geometrie des Zielbauteils haben diese Ergebnisse bestätigt (BILD 15). Die drei linken Courses sind parallelisiert abgelegt worden. Deutliche Beulen und Ablösungen am Rand sind zu erkennen. Die vier rechten Courses sind mit festem Faserwinkel abgelegt worden. Mit dieser Strategie kann eine gute Ablage erreicht werden. Allerdings sind hier die Überlappungen zwischen den Courses durch die helleren, weißen Streifen deutlich zu erkennen.



BILD 15: Ablage im doppelt gekrümmten Formwerkzeug mit unterschiedlichen Strategien. Links der roten Linie: Parallelisiert. Rechts der roten Linie: Fester Faserwinkel.

Im Vergleich zur ATL kann mit AFP ein deutlich besseres Steeringverhalten erreicht werden. Bis zu einem Steeringradius von 6 m kann das Material sehr gut abgelegt werden (BILD 16). Trotz Krümmung der Tows können diese

beschädigungsfrei und mit einer flächigen Anhaftung auf die Oberfläche abgelegt werden. Erst bei einem Steeringradius von 4 m treten erste Fehlstellen in Form von Beulen auf der Innenseite der Courses auf. Diese können einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften eines ausgehärteten Bauteils haben. Wird der Steeringradius noch weiter verkleinert, treten zudem lokale Fehlpositionierungen auf.

Da Material mit der AFP-Technologie mit bis zu 6 m Steeringradius fehlerfrei abgelegt werden kann und somit die erforderlichen 12 m deutlich unterbietet werden, eignet sich diese Technologie für die Strategie der parallelisierten Ablage. Dadurch können ungleichmäßige Materialüberlappungen und folglich ein höheres Bauteilgewicht vermieden werden.

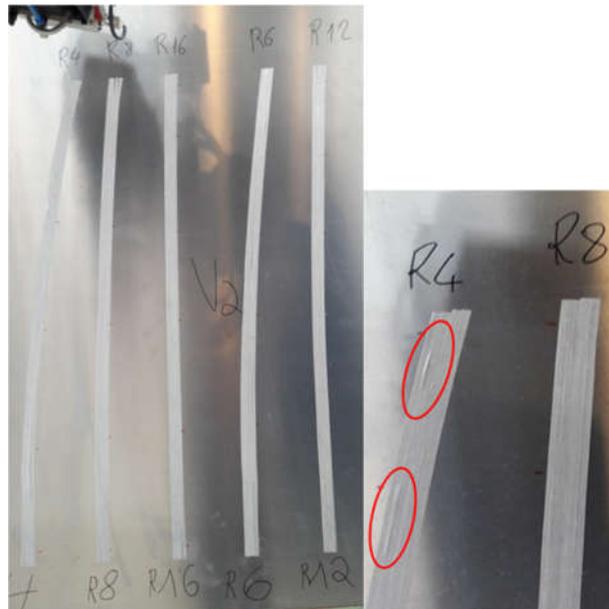


BILD 16: Links: Ablage mit 4 Tows à $6,35\text{ mm}$ Breite mit verschiedenen Steeringradien von $R = 12\text{ m}$ bis 4 m . Rechts: Beulen der Tows auf der Innenseite der Courses bei zu kleinem Steeringradius

4.2. Gegenüberstellung ATL / AFP durch Hautfeldfertigung

Sowohl mit ATL- als mit AFP-Technologie können die Glasfaserlagen der Hautfelder erfolgreich abgelegt werden. Dadurch kann an einem realitätstreuen Beispielbauteil der Prozess zwischen ATL und AFP miteinander verglichen werden.



BILD 17: Automatisierte GF-Prepreg-Ablage mit der ATL-Technologie



BILD 18: Automatisierte GF-Prepreg-Ablage mit der AFP-Technologie

Da aus den Untersuchungen des Materialverhaltens mit ATL ein Steering nicht erfolgreich demonstriert werden kann, ist dieser Demonstrator mit festem Faserwinkel abgelegt worden. Wie bereits erwähnt, lassen sich dadurch Überlappungen der einzelnen Courses nicht vermeiden (BILD 19).

Durch Simulation der Ablage in der CAM-Umgebung ACES und importieren der generierten Courses in eine CAD-Umgebung können die zu erwartenden Überlappungen im Vorfeld ermittelt werden. Diese betragen bei den 0° Lagen (längs zum Formwerkzeug) 12,1 mm und bei den 90° Lagen (quer zum Formwerkzeug) 2,2 mm, jeweils am Anfang und Ende eines Courses. Die Messungen der Überlappungen während der Faserablage haben für die 0° Orientierung 12 ± 1 mm und für 90° 2 ± 1 mm ergeben (BILD 19). Da damit eine sehr gute Korrelation zwischen realen und simulierten Überlappungen gezeigt werden kann, kann die verwendete CAD/CAM Umgebung zukünftig sehr gut für solche Vorhersagen genutzt werden.

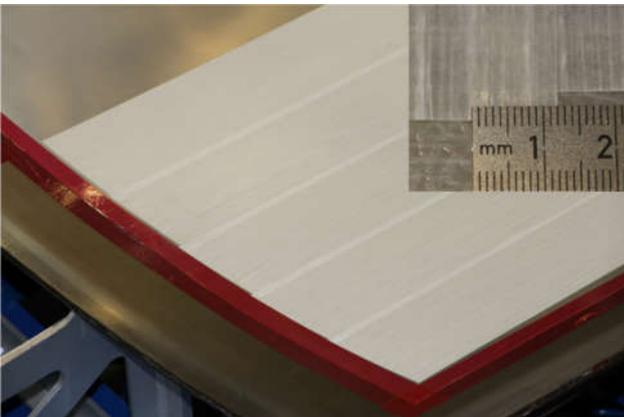


BILD 19: Überlappungen am Ende der abgelegten Courses. Rechts oben: Messen der Überlappungsbreite.

Im Gegensatz zum ATL-Demonstrator ist der AFP-Demonstrator auf Grundlage der Ergebnisse bezüglich Materialverhalten erfolgreich mit Steering abgelegt worden. Dabei sind 16 Tows mit einer Materialbreite von 6,35 mm zeitgleich verarbeitet worden. In BILD 20 ist eine 90° Lage mit parallelisierten Courses dargestellt.

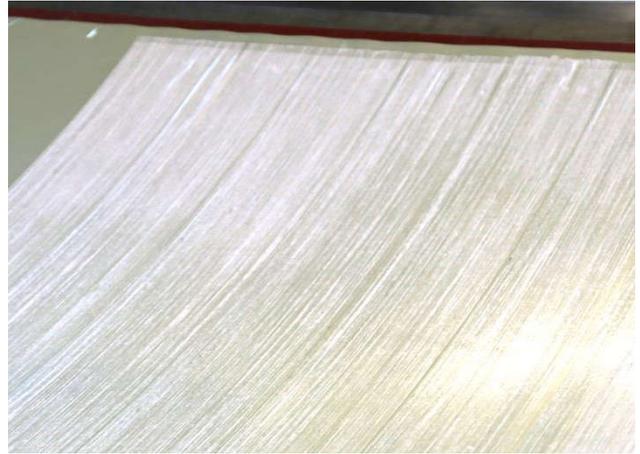


BILD 20: Parallelisiert abgelegte Courses mit der AFP-Technologie

Bei beiden Legetechnologien haben die nicht exakt aufliegenden Aluminiumbleche einen erheblichen Einfluss auf die Ablage des Fasermaterials gehabt. Für die Umformung der Bleche von einer 2D zur 3D Geometrie stand nur ein Formwerkzeug zur Verfügung, dessen Geometrie nur ähnlich zu der des Demonstrators ist. Beim Ablegen der Bleche in das Formwerkzeug ist dadurch deutlich zu erkennen gewesen, dass sich Beulen gebildet haben (BILD 21). Beim Ablegen des Fasermaterials wird die entsprechende Aluminiumlage zunächst lokal durch die Andrückereinheit auf die Formwerkzeugoberfläche gedrückt. Nach dem Überfahren der jeweiligen Stelle kommt es aufgrund der Eigenspannung im Blech zur Relaxation und dadurch zur Anhebung der Aluminiumlage von der Formwerkzeugoberfläche. Dies hat zur Folge, dass sich das abgelegte Material teilweise wieder von der Oberfläche gelöst hat. Mit Fixieren der Bleche am Bauteilrand, Zwischenvakuum nach jeder Aluminiumlage sowie einem Vakuum zwischen der ersten Aluminiumlage und dem Formwerkzeug kann das Ablösen des Fasermaterials behoben werden.

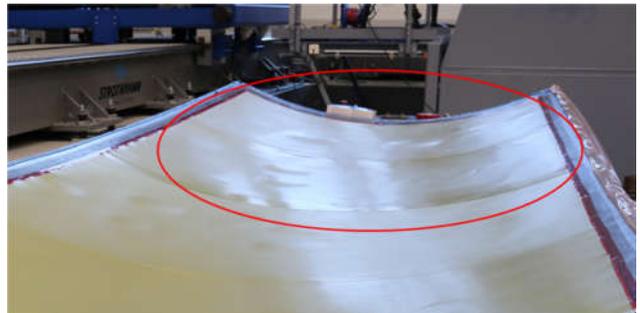


BILD 21: Beulen im Aluminiumbleche durch nicht exakte Umformung (rote Umrandung)

Weiterhin ist beobachtet worden, dass der Effekt der nicht exakt aufliegenden Bleche beim AFP-Demonstrator deutlich geringer ist als beim ATL-Demonstrator. Ein Grund dafür könnte die unterschiedliche Ausrichtung der Aluminiumsplices sein. Während diese beim ATL-Demonstrator in Längsrichtung verläuft, verläuft sie beim AFP-Demonstrator in Querrichtung. Dadurch ist zwar die Anzahl der Splices je Lage aufgrund der Limitierungen der Blechbreite höher (hier fünf bis sechs), dafür sind die einzelnen Bleche deutlich kleiner im Vergleich zu den Längssplices. Hier ist es nur ein Splice je Lage, dafür sind

die Bleche deutlich größer. Durch die kleineren Blechgrößen passen diese sich besser an die Formwerkzeuggeometrie an und der Bulkingeffekt wird reduziert, was vorteilhaft für die Ablage ist.

Es ist zu erwarten, dass mit umgeformten Aluminiumblechen, die exakt an die Bauteilgeometrie angepasst sind, der beschriebene Effekt nicht oder nur noch in sehr geringem Ausmaß auftreten wird. Zudem können dadurch auch Eigenspannungen im Bauteil, die nach einer Aushärtung auftreten würden, deutlich reduziert werden.

4.3. Vergleich von Materialverbrauch

Durch die unterschiedlichen Ablegestrategien sowie Legetechnologien ergeben sich Unterschiede beim Materialverbrauch.

Aus der CAM-Umgebung können die benötigten Materialmengen ermittelt werden. Die Gesamtfläche der vier abzulegenden Glasfaserlagen beträgt 33,3 m². Um diese Fläche abzudecken, wird mit der AFP-Technologie eine Materialmenge von 33,5 m² benötigt, was die Gesamtfläche um lediglich 0,6 % übersteigt. Im Gegensatz dazu wird mit der ATL-Technologie 36,1 m² Material benötigt, wodurch 8,5 % mehr Material verbraucht wurde als notwendig.

Der Materialverbrauch hängt zum einen von der Breite des abzulegenden Materials und zum anderen von den Überlappungen ab. Am Bauteilrand muss die gesamte Materialbreite solange abgelegt werden, bis der Course die Bauteilkontur komplett abdeckt (BILD 22). Je breiter das Material desto mehr Verschnitt muss dadurch abgelegt werden. Daraus ergibt sich bei 150 mm breitem Material ein deutlich höherer Verbrauch als bei 6,35 mm. Da der Verschnitt jedoch außerhalb der Bauteilkontur liegt, hat er keinen Einfluss auf das finale Bauteilgewicht.

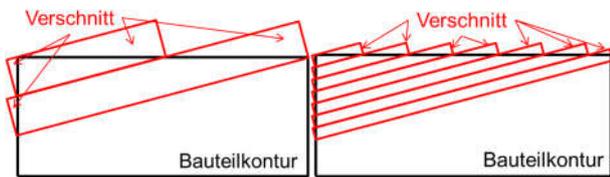


BILD 22: Vergleich des Materialverschnitts zwischen ATL (links) und AFP (rechts)

Die Überlappungen innerhalb eines Bauteils treten aufgrund der Ablage mit festem Faserwinkel auf, wie dies bei dem ATL-Demonstrator der Fall ist (BILD 19). Aufgrund der unterschiedlichen Ablegestrategien können die Courses bei der AFP-Technologie auf Stoß abgelegt werden. Bei ATL hingegen werden 0,45 m² der Bauteilfläche unerwünschter Weise überlappend abgelegt, was 1,34 % entspricht. Da diese Überlappungen innerhalb der Bauteilkontur liegen, verursachen diese nicht nur erhöhte Kosten durch Materialverbrauch, sondern zusätzlich höhere Betriebskosten durch ein höheres Bauteilgewicht.

4.4. Vergleich von Prozesszeiten

Um die reine Prozesszeit zu ermitteln sind die Courses, die für die Fertigung der Demonstratoren verwendet wurden, mit beiden Technologien ohne Ablegen von Fasermaterial auf dem Formwerkzeug und mit Aufzeichnung der Zeiten abgefahren worden. Zeiten wie Reparatur, Materialbestückung oder Qualitätssicherung sind nicht berücksichtigt worden. Die ermittelten Zeiten können aus Tabelle 1 entnommen werden.

Tabelle 1: Übersicht über die Ablegezeiten

	ATL	AFP
0° - Lage	16 min 05 sek (14 Courses)	19 min 30 sek (18 Courses)
90° - Lage	16 min 40 sek (33 Courses)	22 min 10 sek (49 Courses)
Gesamtzeit (2x0° + 2x90°)	65 min 30 sek (94 Courses)	78 min 40 sek (134 Courses)

Die unterschiedlichen Fertigungszeiten lassen sich hauptsächlich durch die unterschiedlichen Coursebreiten erklären, die bei ATL 150 mm und bei AFP 101,6 mm betragen. Dadurch müssen mit der AFP-Technologie in etwa 50 % mehr Courses abgelegt werden als mit der ATL-Technologie. Bei 90° Lagen entspricht die Anzahl der Courses mit AFP somit in etwa der 1,5-fachen Anzahl der Courses mit ATL. Bei 0° Lagen hingegen werden mit AFP nur 18 Courses abgelegt und nicht 21, was das 1,5-fache von ATL gewesen wäre. Dies liegt daran, dass durch die auftretenden Überlappungen bei ATL mehr Courses abgelegt werden müssen, um die gesamte Fläche abzudecken. Bei 90°-Lagen sind die Überlappungen mit 2,2 mm deutlich kleiner als bei 0°-Lagen, wodurch die 90°-Lagen weniger beeinflusst werden.

Weiterhin sind die Zeiten für die einzelnen Courses bei AFP etwa vier Sekunden kürzer als bei ATL. Als Ursache kann der unterschiedliche Schneidprozess ermittelt werden. Bei AFP werden die einzelnen Tows durchtrennt, während der Endeffektor den Course noch abfährt und Material ablegt. Ein Abbremsen kurz vor Courseende bis zum Stillstand ist dadurch nicht nötig. Im Gegensatz dazu muss bei ATL etwa 450 mm vor Courseende angehalten werden, damit das Material durchtrennt werden kann. Das Schneiden selbst dauert zudem länger als bei AFP, da in diesem Fall ein Ultraschallmesser über die gesamte Materialbreite verfahren muss. Nach dem Durchtrennen muss der Endeffektor nochmals kurzzeitig beschleunigt und das restliche Fasermaterial bis Courseende abgelegt werden.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Um die Produktionsrate des Glare-Fertigungsprozesses zu steigern, ist im Projekt AutoGlare unter anderem eine Automatisierung der Glasfaserablage mit Fiber Placement Technologien untersucht worden. Dabei wurden die Technologien ATL und AFP zunächst hinsichtlich Verarbeitbarkeit, Wiederholgenauigkeit beim Ablegen sowie Drapierfähigkeit durch Steering miteinander verglichen.

Es hat sich gezeigt, dass mit geeigneten Prozessparametern das Material mit beiden Technologien gut verarbeitet werden kann. Sowohl das Fördern als auch Andrücken des Materials auf die Ablegeoberfläche, aber auch das Schneiden des Materials am Ende eines Courses können prozesssicher durchgeführt werden. Auch die Wiederholgenauigkeiten der Ablagen sind bei beiden Technologien auf einem guten Niveau. Bei den Untersuchungen bezüglich Steering haben sich deutliche Unterschiede zwischen den Technologien ergeben. Mit ATL kann kein befriedigendes Steering von 12 m Steeringradius realisiert werden. Selbst bei 30 m haben sich Falten in der Ablage

gebildet. Mit AFP und den deutlich schmalere Tows kann ein Steeringradius von 6 m erreicht werden, wodurch die Anforderungen für ein parallelisiertes Ablegen der Courses beim Demonstrator erfüllt sind.

Die Ergebnisse haben in zwei Demonstratoren, gefertigt jeweils mit ATL und AFP, gemündet, wodurch der Einsatz der Technologien für eine automatisierte Glasfaserablage demonstriert werden kann. Mit den auf Basis der Ergebnisse aus den Vorversuchen ausgewählten Ablegestrategien für die unterschiedlichen Technologien kann das Material abgelegt werden. Dementsprechend wurde bei ATL ohne und bei AFP mit Steering abgelegt. Zudem hat sich gezeigt, dass die nicht exakt anliegenden Aluminiumbleche Beulen verursachen und sich das Fasermaterial an diesen Stellen wieder ablösen kann.

Ein Nachteil der ATL-Technologie gegenüber AFP ist der Materialverbrauch. Während bei AFP nur 0,6 % mehr Material benötigt wird als die abzulegende Gesamtfläche, sind es bei ATL 8,5 %. Erhebliche Mehrkosten in der Fertigung sind die Folge. Zudem verursachen die im Bauteil auftretenden Überlappungen aufgrund des ATL-Prozesses eine Zunahme des Gewichts der Glasfaserprepreglagen von 1,34 %. Dies wiederum verursacht höhere Betriebskosten des Flugzeugs.

Die unterschiedlichen Fertigungszeiten zwischen den Technologien lassen sich hauptsächlich dadurch erklären, dass bedingt durch die verschiedenen Coursebreiten unterschiedlich viele Courses abgelegt werden. Ein weiterer Unterschied, welches die Fertigungszeit beeinflusst ist der Schneidprozess. Verglichen mit ATL ergibt sich hier bei AFP eine etwa vier Sekunden kürzere Ablegezeit je Course.

6. AUSBLICK

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass es durch die auftretenden Beulen im Aluminiumblech zu Ablöseerscheinungen des abgelegten Fasermaterials kommt. Dieses Verhalten kann aktuell nur durch ein zeitaufwendiges Zwischenvakuum entgegengewirkt werden. Als Ursache wird das nicht exakte Anliegen der Aluminiumbleche am Formwerkzeug vermutet. Aus diesem Grund sollte die Faserablage auch mit exakt anliegenden Blechen untersucht werden.

Weiterhin wurden die Genauigkeitsuntersuchungen bei AFP nur auf einem ebenen Formwerkzeug durchgeführt. Für einen besseren direkten Vergleich zur ATL sollten die Versuche auch auf einen 3D Formwerkzeug durchgeführt werden. In diesem Zusammenhang kann zudem untersucht werden, weshalb die Wiederholgenauigkeiten bei AFP bei 0° Orientierung an der einen Coursekante besser ist als an der gegenüberliegenden und bei 90° Orientierung am Courseanfang schlechter ist als am Courseende.

7. REFERENZEN

- [1] A. Vlot, J.W. Gunnink; *Fibre Metal Laminates: An Introduction*, Springer Netherlands, 2001
- [2] R.C. Alderliesten; *Fatigue and Fracture of Fibre Metal Laminates*, Springer International Publishing, 2017
- [3] T. Beumler; *A contribution to aircraft certification issues on strength properties in non-damaged and fatigue damaged GLARE structures*, PhD, Technische Universität Delft, 2004
- [4] H. Ucan et al.; *Produktionstechnologien für Leichtbaustrukturen aus Faser-Metall-Laminaten im Flugzeugrumpf*. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2017, 5. - 7. September 2017, München, Germany
- [5] W. Mock; *Das neue Dach des Airbus A380*, unter: <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/raumfahrt/das-neue-dach-airbus-a380/> (abgerufen am 20.08.2018)
- [6] A. Viandier et al.; *Hybridisation as an efficient joining, electrochemical corrosion study as a need*, Journal for electrochemistry and plating technology, 2017
- [7] *Glare fuselage panels*, unter: <http://www.mgts.nl/en/portfolio/glare-fuselage-panels> (abgerufen am 20.08.2018)
- [8] G. Marsh; *Wing worker for the world*, Reinforced Plastics, Volume 53, Issue 3, p.24-28, 2010
- [9] <https://www.airborne.com/automation-solutions-advanced-composites/> (abgerufen am 20.08.2018)
- [10] *Highest productivity that ends up into the fastest return of the investment*, unter: <http://www.mtorres.es/en/aeronautics/products/carbon-fiber/torresfiberlayup> (abgerufen am 20.08.2018)
- [11] *Productivity and flexibility together in a perfect solution*, unter: <http://www.mtorres.es/en/aeronautics/products/carbon-fiber/torreslayup> (abgerufen am 20.08.2018)
- [12] Mona Eckardt et al.; *Investigation of an automated dry fiber preforming process for an aircraft fuselage demonstrator using collaborating robots*, CEAS Aeronautical Journal, Volume 7, Issue 3, pp 429–440, 2016
- [13] K. Kozaczuk; *Automated Fiber Placement Systems Overview*, Transactions of the Institute of Aviation, No.4 (245), p. 52-59, 2016
- [14] C. Krombholz; *GroFi: Large-scale fiber placement research facility*, J. large-scale Res. Facil., vol. 2, no. A58, pp. 1–4, 2016