

WIRTSCHAFTLICHE ALTERNATIVE ZUM HANDLAYUP – EIGNEN SICH AFP-TECHNOLOGIEN FÜR DEN BAU EINES KLEINFLUGZEUGS?

O. Hellbach, M. Beyrle, J. Faber

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) – Zentrum für Leichtbau-
produktionstechnologie (ZLP), Am Technologiezentrum 4, 86159 Augsburg, Deutschland

Zusammenfassung

Diese Arbeit hat das Ziel, die am besten geeignete Produktionstechnologie für die Herstellung von Rumpfen für Kleinflugzeuge zu ermitteln, und gliedert sich in zwei Teile:

Zunächst werden gemeinsam mit einem Kleinflugzeugbauer und einem Unternehmen aus der Faserverbundindustrie Anforderungen an den Fertigungsprozess und das Material definiert und priorisiert. Daraus leiten sich Auswahl- und Bewertungskriterien für die Produktionstechnologien ab.

Im zweiten Teil wird eine Prozessbewertung durchgeführt. Als mögliche Fertigungstechnologien werden das Wickeln und Legen von kohlenstofffaserverstärkten Bändern gegenübergestellt. Das Legen, das sich als besser geeignete Technologie erweist, wird unterteilt in drei Unterarten: Automated Fiber Placement von duromeren Prepregs (TS-AFP), Dry Fiber Placement (DFP), und Thermoplastisches Automated Fiber Placement mit In-situ-Konsolidierung (TP-AFP). Diese Prozesse werden hinsichtlich der Anforderungen, die im ersten Teil definiert wurden, untersucht und bewertet.

Anhand dieser Bewertung erhält der TS-AFP-Prozess die höchste Punktzahl. Der DFP-Prozess ist am zweitbesten geeignet. Der TP-AFP-Prozess ist, Stand heute, am wenigsten geeignet, weist jedoch das höchste Zukunftspotenzial auf.

Keywords

Automated Fiber Placement, Produktionstechnologien, Prozesse, Leichtbau, In-situ-Konsolidierung

1. EINLEITUNG

Die Fertigung konventioneller Kleinflugzeuge aus faserverstärktem Kunststoff (FVK) ist aktuell mit hohem manuellem Aufwand verbunden. Für die Herstellung eines Flugzeugrumpfes werden dafür klassischerweise zunächst zwei Halbschalen gefertigt: In eine Negativform werden mehrere Lagen Prepreg-Gewebe drapiert und anschließend in einem Ofen oder Autoklav ausgehärtet. Diese manuelle Arbeit führt in Hochlohnländern zu vergleichsweise hohen Produktionskosten, die oft nicht wettbewerbsfähig sind.

Ein Ansatz, den manuellen und zeitlichen Aufwand zu senken, besteht im Einsatz automatisierter, roboterbasierter Produktionstechniken. Diese versprechen neben einer Senkung der Produktionskosten auch eine Erhöhung der Reproduzierbarkeit und Prozessgenauigkeit.

In diesem Beitrag soll untersucht werden, unter welchen technischen und wirtschaftlichen Aspekten eine automatisierte Produktion auch für Kleinserien attraktiv sein kann. Dies wird im Zusammenspiel mit einer neuartigen Herstellungsmethode am Beispiel eines Kleinflugzeugrumpfes vorgestellt.

Ein Formwerkzeug in Form eines Flugzeugrumpfes soll auf einer Drehachse befestigt sein. Ein Roboter mit einem

Legekopf belegt das Formwerkzeug mit einem kohlenstofffaserverstärkten Tape (BILD 1). So entsteht die Haut des Rumpfes. Der Lagenaufbau besteht aus 0°, 45°, -45° und 90°-Lagen. Nach der Aushärtung wird das Formwerkzeug aus der Flugzeughaut heraus entnommen. Damit diese Entnahme möglich ist, besteht das Formwerkzeug aus mehreren zusammensteckbaren Segmenten, die so geformt sind, dass ein Werker alle Segmente nacheinander durch den Haubenausschnitt entnehmen kann.

Folgende Technologien sollen für den Bau eines solchen Flugzeugrumpfs miteinander verglichen werden:

- Automated Fiber Placement von duromeren (Thermoset) Prepregs (TS-AFP)
- Dry Fiber Placement (DFP)
- Thermoplastisches Automated Fiber Placement mit In-situ-Konsolidierung (TP-AFP)
- Wickeln

Ziel ist es, den aus technischer und wirtschaftlicher Sicht attraktivsten Fertigungsprozess durch gewichtete Anforderungskriterien zu ermitteln.

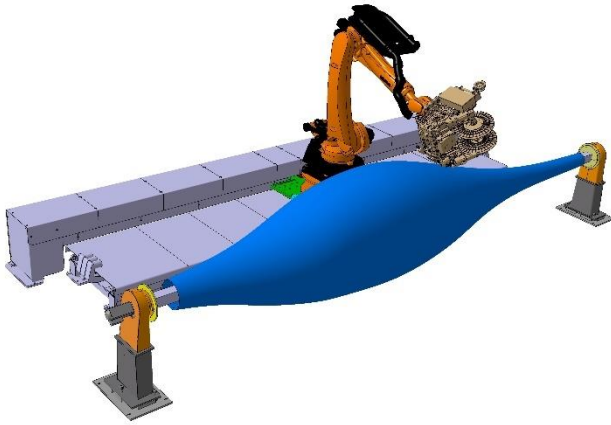


BILD 1. Belegung des Formwerkzeugs durch einen Lege-/Wickelkopf

2. DEFINITION DER ANFORDERUNGEN

In Zusammenarbeit mit einem Kleinflugzeugbauer und einem Unternehmen aus der Faserverbundindustrie wurden Anforderungskriterien an den Prozess, das Material und das Formwerkzeug definiert und mit einer Skala von 1 bis 10 gewichtet. TAB. 1 zeigt die Anforderungen an den Prozess. Im folgenden Kapitel werden die Anforderungen genauer erläutert und mit den Legeprozessen verglichen.

TAB. 1. Anforderungen an den Herstellungsprozess

Anforderung	Gewichtung der Anforderung (1 = unwichtig, 10 = sehr wichtig)
Hohe Robustheit	5
Hohes TRL	5
Hohe Automatisierbarkeit	7
Geringe Zykluszeit	8
Geringe Investitionskosten	9
Geringe laufende Kosten	9
Hohe Qualität des Resultats	9
Nachverfolgbarkeit, Qualitätsprüfung gegeben	10

3. ÜBERBLICK MÖGLICHER FERTIGUNGSTECHNOLOGIEN

Abhängig von der geplanten Rate an produzierten Bauteilen pro Jahr bieten sich verschiedene Technologien für die Fertigung von CFK-Bauteilen an. Für Prototypen bzw. Kleinserien sind Prozesse mit geringen Investitionskosten und hohem manuellen Arbeitsanteil zweckmäßig. Stand der Technik im Kleinflugzeugbau ist, dass zwei konkave Flugzeughalbschalen mit einem Gewebe ausgelegt (drapiert) werden.

Soll die Produktionsrate gesteigert werden, bieten sich Technologien mit weniger manueller Arbeit an, z.B. das Wickeln oder Automated Fiber Placement (AFP). Weitere, mechanische Vorteile ergeben sich durch das dort verwendete Material: unidirektionale Fasern werden abgelegt, hierdurch ist ein höherer Faservolumengehalt erreichbar und weniger Ondulationen sind im Bauteil. Der Fertigungsprozess ist auch übertragbar auf andere, ähnlich geformte Bauteile mit höheren Stückzahlen, z.B. Drohnen.

Je höher die geplante Rate an produzierten Bauteilen ist, desto attraktiver wird eine automatisierte Fertigung.

Es stellt sich die Frage, ob ein Wickel- oder Legeprozess besser geeignet ist, den Flugzeugrumpf zu fertigen. Stand der Technik für die Herstellung von Wasserstofftanks (Typ-IV-Behälter) in Fahrzeugen ist das Wickelverfahren. Hierbei übernehmen Kohlenstofffasern, die auf einen Kern gewickelt werden, die mechanischen Lasten. [1]

Beim Wickeln wird ein endloses Band auf einen Kern aufgewickelt. Erst am Ende des Prozesses wird das Band abgeschnitten. BILD 1 zeigt die zu belegende Rumpfgeometrie, eine Verdickung in der Mitte und spitz zulaufende Enden sind sichtbar.

Bei Umfangslagen muss sichergestellt sein, dass das Band nicht abrutscht. Die doppelte Krümmung des Rumpfes und die hohe Tapespannung beim Wickeln bewirken, dass das Band stets die Tendenz zum seitlichen Abrutschen („slip“) hat.

Für Lagen in Längsrichtung ergeben sich ebenfalls Schwierigkeiten: Durch die spitz zulaufende Form des Flugzeugrumpfes kommt es an den beiden Rumpfen beim Wickeln zu einer starken Materialansammlung, damit auch bei der breiten Rumpfmittle genügend Material mit den definierten Faserausrichtungen vorliegt. Dieses überschüssige, „überdimensionierte“ Material ist beim fertigen Rumpf unter dem Aspekt des Leichtbaus unerwünscht bzw. muss nachträglich abgetragen werden, was den Materialverschnitt nachteilig beeinflusst. Zudem kann eine konkave Strecke nicht umwickelt werden. Aus diesem Grund wird der Wickelprozess in den nachfolgenden Bewertungen nicht weiter betrachtet.

Beim Legen / Automated Fiber Placement (AFP) hingegen kann das Band beliebig oft abgeschnitten werden. Das Bauteil wird nur dort verdickt, wo es mechanisch sinnvoll ist. Dies entspricht einer lastpfadgerechten Ablage und trägt positiv zu hohen mechanischen Eigenschaften bei gleichzeitig geringem Gewicht und weniger Materialeinsatz bei.

4. AFP-PROZESSE

4.1. Ablauf der Prozessketten

Beim TS-AFP wird ein mit einer Duromermatrix vorimprägniertes Tape auf das Substrat gelegt. Durch die Klebrigkeit des Prepreg-Materials haftet das Tape am Substrat. In einem nachfolgenden Prozessschritt wird ein Aushärtungszyklus durchgeführt, um die Duromermatrix zu verfestigen. Dieser Aushärtungszyklus kann, abhängig vom Matrixmaterial, entweder im Autoklav oder im Ofen erfolgen. In der Folge wird dieser gesamte Prozessablauf inkl. Autoklavschritt als „TS-AFP“ bezeichnet.

Beim DFP wird ein Trockenfasertape, auf das vorher Bindermaterial aufgetragen wurde, erhitzt und auf das Substrat gelegt. Durch die Erwärmung wird der Binder aktiviert und haftet am Substrat. Anschließend wird die Preform mit duroplastischem Harz infundiert und in einem Ofen oder Autoklaven ausgehärtet. In der Folge wird dieser

gesamte Prozessablauf inkl. Infusion und Ofenprozess als „DFP“ bezeichnet.

Beim **TP-AFP** wird ein mit einer thermoplastischen Matrix vorimprägniertes Tape bis zum Schmelzpunkt erhitzt und auf das Substrat gelegt. Die geschmolzene Matrix verbindet sich mit dem darunter liegenden Material. Diese vollständige Verarbeitung in einem Schritt wird als In-situ-Konsolidierung bezeichnet. Ein zusätzlicher Aushärtungszyklus ist möglich, jedoch im vorliegenden Anwendungsfall nicht erforderlich. Die In-situ-Konsolidierung während des Legevorgangs ermöglicht es, den zweiten Konsolidierungsschritt einzusparen und somit den vollen Nutzen aus dem thermoplastischen Material zu ziehen. Ein Aushärtungszyklus wird hier daher nicht betrachtet.

In dieser Arbeit werden lediglich die Prozessanforderungen analysiert. Die Anforderungen an das Material wurden jedoch ebenfalls definiert und analysiert. Unter anderem wurde eine hohe Glasübergangstemperatur der Matrix gefordert, sodass für den TP-AFP-Prozess lediglich Hochleistungsthermoplasten in Frage kommen (z.B. PEEK, PAEK, LM-PAEK, PEKK). Günstige PA-Materialien scheiden als Matrix aus.

In der Folge wird dieser gesamte Prozessablauf, d.h. die Ablage von Hochleistungsthermoplasten mit In-situ-Konsolidierung, als TP-AFP bezeichnet.

TAB. 2 zeigt eine Übersicht der Arbeitsschritte.

TAB. 2. Arbeitsschritte bei den einzelnen Fertigungsprozessen

Arbeitsschritt		Fertigungsprozess		
		TS-AFP	DFP	TP-AFP
Vorarbeit	Reinigung des Formwerkzeugs	x	x	x
	Aufbringung von Trennmittel	x	x	(x)
	Aufbringung einer Erstlage			x
AFP-Prozess	Layup (Ablage)	x	x	x
	Wartungsarbeiten	x	x	x
Konsolidierung	Anbringung eines Vakuumaufbaus	x	x	
	Infusion		x	
	Aushärtung im Ofen/Autoklav	x	x	
	Abnahme des Vakuumaufbaus	x	x	
Nacharbeit	Entnahme des Formwerkzeugs	x	x	x
	Trimmen	x	x	x

4.2. Legeprozess

Beim AFP wird ein sog. Tapelegekopf verwendet. Für komplexe Formen ist dieser häufig auf einem Roboterarm befestigt. Das Robotersystem erzeugt die Bewegungsbahnen, der Tapelegekopf legt Tapes unter Einwirkung von Wärme und Druck auf dem Substrat ab: Nachdem das Tape zugeführt wurde, wird es mit einer Wärmequelle erhitzt. Das Tape wird weitergeführt; sobald es sich am Kontaktpunkt (Nip Point) befindet, presst eine Konsolidierungsrolle das Tape auf das Substrat, damit sich Tape und Substrat verbinden. Bei der ersten Lage ist das Substrat das Formwerkzeug bzw. eine darauf aufgebrachte Folie, bei den nachfolgenden Schichten die vorher abgelegten Tapes.

Nachdem die Rolle und die Wärmequelle passiert sind, kühlt das Tapesegment konvektiv zur Umgebungsluft und konduktiv zum Substrat ab.

Abhängig vom genauen AFP-Prozess unterscheiden sich die Konsolidierungsrolle, die Art der Wärmeeinbringung und die Beschaffenheit der Tapes signifikant.

Beim **TS-AFP** weist das Material bereits vor dem Passieren der Wärmequelle eine gewisse Klebrigkeit („tack“) auf. Die Erwärmung dient dem Erhöhen der Klebrigkeit im Nip Point und damit der Ablagequalität. Zudem kann dadurch die Ablagegeschwindigkeit erhöht werden. Es ist kein Aufschmelzen des Tapes erforderlich, was zu relativ niedrigen Temperaturen führt. Einige Materialien müssen überhaupt nicht erwärmt werden.

Klebrigkeit ist die Adhäsion zwischen zwei Oberflächen während des Legeprozesses und kann als Trennungsenergie gemessen werden. Die Klebrigkeit wird durch mehrere Faktoren beeinflusst, beispielsweise durch die Temperatur [2], das Alter des Materials [2], die Kompaktierungskraft [3], und die Ablagegeschwindigkeit [3].

Dieses Verhalten lässt sich durch die Viskosität des Materials erklären - mit höherer Kompaktierungskraft, geringerer Ablagegeschwindigkeit, und steigender Temperatur nimmt die Viskosität des Epoxidharzes ab, wodurch sich die Lagen besser aneinander anpassen können [2].

Beim **DFP** sind die Bänder trockene, nicht-imprägnierte Fasern mit oberflächlich aufgebrachtem Binder. Die Erwärmung mit der Wärmequelle dient hier der Aktivierung des Binders, sodass dieser klebrig wird. Das häufig verwendete EPIKOTE 05390 hat eine Erweichungstemperatur von 80°C-90°C, das für die Luft- und Raumfahrt qualifizierte EPIKOTE 05311 von 100°C-110°C. Höhere Temperaturen sind für thermoplastische Binder erforderlich, da diese aufgeschmolzen werden müssen.

Einzigartig beim DFP-Prozess ist die Eigenschaft, dass nicht nur unidirektionale, sondern auch gewebte Tapes für die Ablage verwendet werden können.

Ebenfalls einzigartig ist die Möglichkeit des Active Tow Steering, wie z.B. von Kim et al. [4] gezeigt: Da die einzelnen Fasern nicht mit Matrix getränkt sind, können sie

gegeneinander verschert werden. Dies ist von Vorteil, wenn die abzulegenden Bahnen gekrümmt sind und daher nicht alle Fasern innerhalb des Tapes dieselbe Strecke zurücklegen müssen. In solchen Bereichen werden die Fasern unabhängig voneinander bewegt und gegeneinander verschert, was bei Prepreg-Tapes nicht oder nur sehr begrenzt möglich ist.

Beim TP-AFP muss die Wärmequelle den Thermoplasten aufschmelzen, sodass innerhalb kürzester Zeit eine stoffschlüssige Verbindung zwischen abgelegtem Tape und Substrat entsteht. Hier ist das Timing und Zusammenspiel zwischen Wärmeeintrag, Abkühlung, Druck der Rolle und Geschwindigkeit des Prozesses von hoher Bedeutung. Werden die Oberflächen der beiden Fügepartner (also des ankommenden Tapes und des Substrats) erhitzt, schmilzt Material auf. Die Kompaktierrolle stellt einen engen Kontakt der Fügepartner her. Überall dort, wo die Temperatur über der Glasübergangstemperatur T_g liegt, können sich Polymerketten über die Grenzfläche bewegen. Eine höhere Temperatur, bis unter die Degradationstemperatur, führt zu einer schnelleren Verbindung.

4.3. Wärmequellen

Für die Haftung zwischen dem zugeführten Tape und dem Substrat ist normalerweise eine Wärmequelle notwendig. Hierfür gibt es zahlreiche Möglichkeiten, die gängigsten Wärmequellen sind Heißgasdüsen, Infrarotstrahler (IR), Laser und Flashlamps (gepulste Lampen). Heißgasdüsen sind vergleichsweise preiswert bei dennoch hohen erreichbaren Temperaturen, jedoch schwierig zu regeln. IR-Strahler sind für duromere Materialien sehr gebräuchlich, geben jedoch nur einen relativ schwachen Wärmestrom ab, der zum Aufschmelzen von Thermoplasten im notwendigen Zeitraum nicht ausreicht. Da IR-Strahler nicht stark fokussiert sind, ist zudem eine gezielte Wärmeeinbringung schwer zu realisieren. Auch kann die Temperatur über eine Bahn aufgrund von Aufheizzeiten und latenter Wärmeabgabe von Reflektoren variieren [5]. Für (Hochleistungs-)Thermoplaste werden oft Laser eingesetzt; diese zeichnen sich durch eine hohe Energiedichte, eine kurze Aufheizzeit, eine einstellbare Fokussierung, eine schnelle Ansteuerbarkeit und eine homogene Qualität aus. In der Literatur sind CO₂-Laser, Nd:YAG-Laser und Diodenlaser zu finden [6].

CO₂-Laser eignen sich aufgrund ihrer Größe und des großen Einflusses der Laserposition auf die Konsolidierungsqualität nicht für einen robotergestützten AFP-Prozess. Nd:YAG-Laser und Diodenlaser arbeiten in einem Wellenbereich, in dem die Strahlung von der Matrix transmittiert und von den Kohlenstofffasern absorbiert wird. Daher werden nur die Fasern erhitzt, was aufgrund der hohen Leitfähigkeit zu einer homogenen Erwärmung führt [6]. Diodenlaser sind zudem günstiger und effizienter als die anderen beiden. Nachteile von Lasern sind die notwendigen Sicherheitsvorkehrungen für eine Laserabschirmung und die hohen Kosten. Um auf eine Laserabschirmung verzichten zu können, wurden gepulste Lampen (Xenon-Flashlamps) entwickelt [7]. Bei diesen ist die Beobachtung des Nip Points jedoch nicht einfach, da sich der lichtemittierende Quarz sehr nah daran befindet und damit die Beobachtung des Nip Points mit Pyrometern oder Kameras erschwert.

TAB. 3 zeigt eine Übersicht der verschiedenen Wärmequellen.

TAB. 3. Zusammenfassung der Wärmequellen nach [8]

Eigenschaft	Wärmequelle			
	Heißgasdüse	Infrarotstrahler	Laser	Gepulste Lampe
Temperatur	Mittel	Gering	Hoch	Hoch
Kontrollierbarkeit	Gering	Mittel	Hoch	Hoch
Schutzmaßnahmen	Mittel	Gering	Hoch	Mittel
Investitionskosten	Mittel	Gering	Hoch	Hoch

Da beim TS-AFP nur relativ geringe Temperaturen notwendig sind, können generell alle genannten Wärmequellen verwendet werden. Für eine hocheffektive Produktion werden daher teilweise Laser verwendet, deutlich günstiger sind jedoch Infrarotstrahler.

Auch beim DFP sind nur geringe Temperaturen zum Aktivieren des Binders notwendig, günstige Wärmequellen sind daher ausreichend. Für eine industrielle Produktion empfiehlt sich jedoch eher eine gerichtete Wärmequelle wie eine gepulste Lampe.

Einen günstigen Einstieg in die Verarbeitung von Thermoplasten mit niedriger Schmelztemperatur bieten Heißgasdüsen, v.a. wenn eine Nachkonsolidierung im Ofen/Autoklav angestrebt ist. Da beim TP-AFP der Wärmeeintrag aufgrund des fehlenden nachfolgenden Konsolidierungsschritts jedoch von zentraler Bedeutung ist, sind kontrollierbare Wärmequellen wie Laser oder gepulste Lampen sinnvoll.

4.4. Größte Herausforderungen

Der TS-AFP-Prozess ist das mit Abstand am meisten verbreitete AFP-Verfahren in der Industrie. Dies liegt an der guten erreichbaren Bauteilqualität - diese ergibt sich daraus, dass die verarbeiteten Tapes bereits mit einer Matrix imprägniert sind und somit schon über das Ausgangsmaterial eine optimale Faser-Matrix-Verteilung sichergestellt ist. Zudem können auch hochviskose Harze verwendet werden, die sich für eine Infusion nicht eignen würden. Die Aushärtung im Ofen oder Autoklav heilt außerdem eventuelle Ungenauigkeiten, die beim Ablegen entstanden sind (wie z.B. Gaps).

Nachteilhaft sind die relativ hohen Investitionskosten - eine Kühlkammer zum Aufbewahren des Rohmaterials sowie ein Ofen/Autoklav zur Aushärtung werden benötigt. Auch die wiederkehrenden Kosten sind wegen der arbeits- und energieintensiven Aushärtung nicht zu vernachlässigen.

Vorteilhaft beim DFP sind die trockenen Tapes, die lange bei Raumtemperatur haltbar sind und während des Ablegeprozesses kein Harz im Tapelegekopf abgeben. Lediglich einzelne, trockene Kohlefaserfussel müssen entfernt werden, die zeitaufwändige Reinigung des klebrigen Harzes entfällt.

Da kein externer Materialhersteller den Prepregging-Prozess durchführt, sind die Materialkosten gering. Fasern und Matrix können getrennt voneinander beschafft und "in-house" zusammengebracht werden. Diese Infusion muss jedoch selbst durchgeführt werden und ist arbeitsintensiv.

Mehr als bei den anderen Prozessen ist beim DFP auf eine passende Faser-Matrix-Kombination bzw. Prozessführung zu achten. Ist die Kompaktierung des Preforms nach der Ablage zu gering, können sich Fasern bei der Infusion wellen und verschieben; ist sie zu groß, wird die Infusion durch eine verminderte Permeabilität erschwert.

Vorteilhaft beim TP-AFP ist die hohe Automatisierung und damit hohe Effizienz – durch den fehlenden Nachkonsolidierungsschritt kann sowohl auf Hardware (Kühlkammer, Ofen/Autoklav, Vakuumaufbau), als auch auf manuelle Arbeit (Vakuumaufbau, Transport in den Ofen/Autoklav) verzichtet werden.

Im Gegensatz zu den anderen AFP-Prozessen werden hier thermoplastische Materialien verwendet statt duromere Harze – dies eröffnet nicht nur die Möglichkeit des Aufschmelzens (und damit der Schweißbarkeit und Recyclingfähigkeit), sondern auch andere positive Eigenschaften wie eine verbesserte Impact-Toleranz. Zudem können thermoplastische Materialien ohne Kühlung bei Raumtemperatur gelagert werden.

Die größte Herausforderung ist die richtige Materialkonsolidierung bei geeigneten Ablegeraten, da die Konsolidierung innerhalb kürzester Zeit unter der Konsolidierungsrolle erfolgen muss. Daher kann die Ablegegeschwindigkeit nicht beliebig gesteigert werden.

Mehr als bei den anderen Prozessen ist außerdem die Materialqualität des Eingangsmaterials entscheidend für die Qualität des späteren Bauteils. Der Porengehalt im Bauteil, insbesondere von Mikroporen, wird weitgehend durch die Eingangsmaterialqualität bestimmt und kann bei der einstufigen Verarbeitung ohne Nachkonsolidierung nur bedingt reduziert werden.

Eine weitere Herausforderung besteht darin, dass die einzelnen Schichten zu unterschiedlichen Zeiten abgelegt werden. Hierdurch können sich die Temperaturen verschiedener Schichten entlang der Dicke des Laminats unterscheiden. Schrumpfen die oberen Schichten aufgrund einer höheren Temperaturdifferenz zur Umgebung schneller als die unteren Schichten mit einer geringeren Temperaturdifferenz, kommt es zu Verzug. Dieser Verzug ist ein zentrales Problem bei der Herstellung von dünnen Laminaten und konkaven Formen mittels TP-AFP. Bei einer konvexen und geschlossenen Form, wie der des Kleinflugzeugrumpfes, wird jedoch ein geringer Verzug erwartet.

Durch die fehlende Nachkonsolidierung ist die Ablage für die Bauteilqualität entscheidend; Gaps, Overlaps und andere Fehlstellen bleiben im Bauteil und können nicht in einem nachfolgenden Prozessschritt "geheilt" werden.

5. ANALYSE DER PROZESSANFORDERUNGEN

In diesem Kapitel werden die AFP-Prozesse hinsichtlich der in TAB. 1 ermittelten Kriterien analysiert.

5.1. Robustheit

Die Robustheit gibt an, wie tolerant der Fertigungsprozess gegenüber Störungen ist.

Beim TS-AFP und beim DFP ist die Ablage sehr robust. Die Infusion / Konsolidierung ist mit manueller Arbeit verbunden, sodass hier tendenziell mehr Fehler auftreten können. Somit befindet sich der kritischste Prozessschritt am Ende der Prozesskette. Fehler, die zu einer schlechten Bauteilqualität führen, können i.d.R. nicht mehr nachträglich behoben werden.

Beim TP-AFP ist die reine Ablage sehr robust sofern das Tape-Material keine Fehlstellen (z.B. Splices = Verbindungsstellen) aufweist. Da es sich bei diesem Verfahren um einen einstufigen Prozess handelt, spiegeln sich Störungen im Ausgangsmaterial direkt im Endergebnis wider. Da das Ausgangsmaterial je nach Hersteller teils größere Schwankungen als bei den anderen Prozessen hat und fehlerhaft abgelegte Bahnen nicht einfach wieder abgezogen werden können, ist eine Materialeingangskontrolle sowie eine Überwachung des Prozesses unerlässlich.

5.2. Technology Readiness Level

Das Technology Readiness Level (TRL) dient der Bewertung des Entwicklungsstandes von neuen Technologien. Ein geringes TRL bedeutet einen geringen Reifegrad bzw. dass Grundlagenforschung betrieben wird, ein hohes TRL von bis zu TRL 9 bedeutet, dass die Technologie erfolgreich in der Industrie eingesetzt wird.

Mit einem TRL von 9 kann das TS-AFP als sehr verlässlich und etabliert beschrieben werden, daher wird es in der Luft- und Raumfahrtindustrie oft verwendet. Der Prozess wird beispielsweise für die Fertigung von Rumpfsektionen des Airbus A350 und der Boeing 787 eingesetzt.

Auch der DFP-Prozess wird in der Industrie eingesetzt, das TRL kann auf 9 beziffert werden. Im Vergleich zum TS-AFP ist dieser Prozess in der Luft- und Raumfahrtindustrie jedoch deutlich weniger verbreitet. Die Tragflächen der Jakowlew MS-21 werden im DFP-Verfahren hergestellt [9].

Der TP-AFP-Prozess ist für die Luft- und Raumfahrt noch in der Entwicklung und Gegenstand zahlreicher Forschungsprojekte. 2023 wurde erstmals eine 8 m lange Oberschale einer A320-Geometrie im TP-AFP-Verfahren hergestellt [10], der Multifunctional Fuselage Demonstrator (MFFD) ist bis heute die größte je gebaute thermoplastische Luftfahrtstruktur [11]. Diese und weitere Ergebnisse legen eine Bewertung des TRL mit 5 nahe.

5.3. Automatisierungspotenzial

Eine hohe Automatisierbarkeit ist vorteilhaft um Fehlerquellen zu reduzieren, Wiederholbarkeit sicherzustellen und Produktionskosten zu senken.

Bei der Automatisierung bzw. dem Automatisierungspotenzial muss unterschieden werden zwischen der eigentlichen Ablage und dem eventuell nachfolgenden Konsolidierungsschritt. Die Automatisierung der Ablegeprozesse ist allgemein hoch.

Beim TS-AFP müssen während der Ablage Materialwechsel durchgeführt werden, aufgrund der hohen Etabliertheit des Verfahrens sind jedoch Spulenschränke mit langen Materialrollen verfügbar. Da das Harz der Prepreg-Tapes klebrig ist, ist ein gewisser Reinigungsaufwand zu erwarten. Auch die Ablage muss überwacht werden, dies kann "manuell" geschehen (durch Werker, die nach den abgelegten Schichten das Laminat visuell inspizieren), oder automatisiert durch Qualitätssicherungssysteme.

Die nachfolgende Konsolidierung ist mit einem höheren manuellen Aufwand verbunden, der mit derzeitigen Mitteln von Werkern durchgeführt werden muss.

Beim DFP müssen während der Ablage ebenfalls Materialwechsel und gelegentliche Reinigungsarbeiten durchgeführt werden. Verunreinigungen können hierbei durch trockene Fasern und abgelöstem Binder entstehen. Auch hier muss die Ablage überwacht werden.

Die nachfolgende Infusion und Aushärtung sind mit einem höheren manuellen Aufwand verbunden, der mit derzeitigen Mitteln von Werkern durchgeführt werden muss.

Da das TP-AFP lange nicht so etabliert ist, sind auch die Materialien lange nicht so etabliert wie bei den anderen beiden Prozessen. Dies bedeutet, dass öfters die Materialspulen gewechselt werden müssen, und bei gelegentlich vorkommenden Materialfehlern manuelle Nacharbeit und ein Neueinfädeln des Tapes erforderlich sind. Abhängig von der Temperatur des Materials und der Wärmequelle muss auch öfters die Kompaktierrolle ausgetauscht werden.

Da kein nachfolgender Aushärtungsschritt vonnöten ist, entfällt die manuelle Arbeit hier komplett. Damit lässt sich zusammenfassen, dass der TP-AFP-Prozess das höchste Automatisierungspotenzial hat, dieses jedoch mit heutigen Mitteln (bzw. den heutigen verfügbaren Tape-Materialien) noch nicht vollständig ausgeschöpft wird. In Zukunft sind jedoch besser in-situ-geeignete Materialien erwartbar.

5.4. Zykluszeit

Die Zykluszeit gibt an, wieviel Zeit für die Fertigung eines Bauteils benötigt wird. Von großer Bedeutung sind die Ablagegeschwindigkeit, die Anzahl und Größe der Lagen, und ob ein nachfolgender Konsolidierungsprozess vonnöten ist. Die Ablagegeschwindigkeit bestimmt sich durch das Material und die Wärmequelle.

Die Ablagegeschwindigkeit beim TS-AFP kann, abhängig vom Material und dem kinematischen System, auf ca. 60 m/min angenommen werden. Der anschließende Konsolidierungsprozess dauert je nach Material zusätzlich einige Stunden; das Material M21 muss beispielsweise für 120 Minuten auf 180°C gehalten werden [12].

Auch beim DFP ist die Ablegeschwindigkeit vorrangig vom kinematischen System definiert, Ablegeraten von bis zu 100 m/min sind möglich [13]. Der anschließende

Konsolidierungsprozess dauert aufgrund der zusätzlichen Harzinfusion etwas länger als beim TS-AFP.

Die Ablagegeschwindigkeit beim TP-AFP ist deutlich geringer als bei den anderen Prozessen. Für Hochleistungsthermoplasten, die mit einem Laser erhitzt werden, sind Ablegeraten von 6-24m/min möglich [14]. Die aufwendige Nacharbeit bzw. Aushärtung entfällt jedoch. Damit ist der TP-AFP-Prozess typischerweise der schnellste Prozess.

5.5. Investitionskosten

Für jeden Prozess ist spezielles Equipment notwendig. In TAB. 4 wird eine grobe, relative Abschätzung der Investitionskosten (non-recurring costs, NRC) gegeben.

TAB. 4. Abschätzung der Investitionskosten

Posten	Kosten	TS-AFP	DFP	TP-AFP
Formwerkzeug	€	x	x	x
OLP-Software	€	x	x	x
Legerkopf	€€	x	x	x
Robotisches System mit Linearachse und Drehachse	€€€	x	x	x
Vakuumpumpe	€	x	x	
Wärmequelle (IR)	€	x	x	
Wärmequelle (Laser)	€€€			x
Laserschutzzeile	€			x
Infusionsequipment	€		x	
Ofen	€€€		x	
Autoklav	€€€€	x		
Kühlkammer	€€	x	(x)	

5.6. Laufende Kosten

Die laufenden Kosten (recurring costs, RC) setzen sich zusammen aus den Materialkosten (Fasern und Matrix), den Energiekosten, den Arbeitskosten, und den Verbrauchsmaterialkosten.

Die Ausgangsmaterialien beim TS-AFP sind teurer als beim DFP, und eine nachfolgende Konsolidierung mit Vakuumaufbau im Autoklav ist vonnöten. – €€

Der DFP-Prozess ist aufgrund der geringen Materialkosten der günstigste Prozess. Jedoch ist hier der manuelle Aufwand, die Infusion, am höchsten. – €

Beim TP-AFP entfallen die Kosten für die Nachkonsolidierung. Allerdings ist das Material, abhängig

von der Qualität, im Vergleich zu den anderen Verfahren sehr teuer. Mit zunehmendem Einsatz der Technologie in der Zukunft sollte das Material jedoch günstiger werden.
– €€€

5.7. Qualität des Resultats

Beim TS-AFP kann aufgrund der Etabliertheit des Verfahrens und der Materialien von einer sehr guten Qualität ausgegangen werden. Abhängig vom Prepregmaterial sind Faservolumengehalte von 55-65% bei einem Porengehalt von unter 1% möglich.

Beim DFP-Verfahren ist der Prozess aufgrund der Infusion fehleranfälliger als beim TS-AFP, zudem hat das Laminat i.A. einen höheren Harzgehalt. Eine hohe Kompaktierung bzw. ein hoher Faservolumengehalt resultiert in einer schlechteren Infiltrierbarkeit. Der Faservolumengehalt hängt stark von der verwendeten Materialkombination von Fasern, Binder und Matrix ab, und kann ca. 50-55% bei einem Porengehalt von unter 2% betragen.

Das TP-AFP wird aktuell in verschiedenen Forschungsprojekten kontinuierlich weiterentwickelt. Der Faservolumengehalt des Bauteils entspricht dem des Ausgangsmaterials und beträgt ca. 55-60%. Die Laminatqualität von in-situ-gefertigten Bauteilen ist aktuell geringer als von nachkonsolidierten Bauteilen, Raps et al. berichten von über 80% der Zug- und Druckfestigkeit gegenüber heißgepressten Referenzproben, bei mangelhaftem, eigentlich nicht für In-situ-Konsolidierung geeignetem Ausgangsmaterial jedoch von nur unter 30% [15]. Durch Prozessoptimierung und in-situ-geeignete Tapes konnten Deden et al. ILSS-Werte von 84% verglichen mit heißgepressten Proben erreichen, die mit einem nachfolgenden Ofenzyklus auf bis zu 96% gesteigert werden konnten. Der Porengehalt betrug unter 1,5%. [16] Die Qualität des Ausgangsmaterials ist entscheidend, aktuell ist diese noch wechselhaft. Mit weiterer Material- und Prozessoptimierung wird erwartet, dass sich die mechanischen Kennwerte der in-situ gefertigten Bauteile weiter verbessern.

5.8. Nachverfolgbarkeit, Qualitätsprüfung

Für eine Zertifizierung nach EASA-Kriterien ist eine Nachverfolgbarkeit des Herstellungsprozesses unerlässlich. Geeignete Methoden zum Nachweisen einer ausreichenden Qualität sind daher Teil der Zulassung.

Beim TS-AFP kann während der Ablage eine Kamera oder ein Laserlichtschnittsensor die Ablagequalität messen.

Auch beim DFP kann während der Ablage eine Kamera oder ein Laserlichtschnittsensor die Ablagequalität messen.

Auch beim TP-AFP kann mit einer Kamera oder einem Laserlichtschnittsensor erfasst werden, wie die Bänder bei der Ablage liegen. Vor allem in der Vergangenheit war die Faser-Matrix-Verteilung in den thermoplastischen Prepreg-Tapes teilweise inhomogen, sodass nie gewährleistet war, dass in allen Bereichen des Bauteils eine homogene Qualität vorliegt. Die Materialqualität hat sich jedoch in den letzten Jahren stark verbessert. Da es beim In-situ-Prozess keinen nachgeschalteten Aushärtungszyklus gibt, können zudem eventuelle Fertigungsimperfectionen nicht „ausgeheilt“ werden.

6. AUSWERTUNG

Die im letzten Kapitel vorgestellten qualitativen Eigenschaften werden nun quantifiziert. Dafür wird für jeden Prozess und jede Eigenschaft ein Wert auf einer Skala zwischen 1 und 6 abgeschätzt. Dieser ist in TAB. 5 in der Spalte „Bewertung“ aufgeführt. Multipliziert mit der Gewichtung, die aus TAB. 1 übernommen wurde, ergibt sich die gewichtete Bewertung.

Aus der Bewertungsmatrix ergibt sich, dass sich der TS-AFP-Prozess am besten dafür eignet, den geforderten Anforderungen zu entsprechen. Der DFP-Prozess ist am zweitbesten geeignet, der TP-AFP-Prozess am drittbesten.

Vorteilhaft am TS-AFP-Prozess ist vor allem die Etabliertheit. Dadurch, dass der Prozess so oft in der Luft- und Raumfahrtindustrie angewendet wird, sind auch die Materialien entsprechend qualifiziert und konstant in ihrer sehr guten Qualität. Nachteilig wirkt sich das notwendige Equipment aus: Eine Kühlkammer und ein Autoklav müssen vorhanden sein.

Der DFP-Prozess birgt hohes Potenzial, wenn es um einen möglichst günstigen Prozess geht. Nicht nur können die meisten Harz-Materialien bei Raumtemperatur gelagert werden, auch wird die Infusion in-house durchgeführt, sodass kein externes Prepregging-Unternehmen zwischengeschaltet werden muss.

Der TP-AFP-Prozess ist aktuell noch in der Entwicklung. Schrittweise wird der Prozess immer weiter industrialisiert, sodass hier in den nächsten Jahren voraussichtlich einige Fortschritte gemacht werden. Die Vorteile des bei Raumtemperatur gelagerten Materials, die Eigenschaften von Thermoplasten, die Schmelzbarkeit und Recyclingfähigkeit, die geringe Zykluszeit und die hohe Automatisierbarkeit geben diesem Prozess ein herausragendes Zukunftspotenzial.

TAB. 5. Bewertungsmatrix der AFP-Technologien

Anforderung	Gewichtung der Anforderung	TS-AFP		DFP		TP-AFP	
	(1 = unwichtig, 10 = sehr wichtig)	Bewertung Skala 1-6 (1 = schlecht, 6 = gut)	Gewichtete Bewertung	Bewertung Skala 1-6 (1 = schlecht, 6 = gut)	Gewichtete Bewertung	Bewertung Skala 1-6 (1 = schlecht, 6 = gut)	Gewichtete Bewertung
Hohe Robustheit	5	4	20	4	20	6	30
Hohes TRL	5	6	30	6	30	3	15
Hohe Automatisierbarkeit	7	5	35	4	28	6	42
Geringe Zykluszeit	8	4	32	2	16	6	48
Geringe Investitionskosten	9	3	27	4	36	5	45
Geringe laufende Kosten	9	5	45	6	54	4	36
Hohe Qualität des Resultats	9	6	54	5	45	3	27
Nachverfolgbarkeit, Qualitätsprüfung gegeben	10	6	60	6	60	4	40
SUMME			303		289		283

DANKSAGUNG

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Projekts KEPLER durch das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie gefördert.

Gefördert durch



**Bayerisches Staatsministerium für
Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie**

7. QUELLENVERZEICHNIS

- [1] T. Siebel, „Druck im Wasserstofftank,“ *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, 2021.
- [2] D. Nguyen und C. Kromholz, „Influence of process parameters an material aging on the adhesion of prepreg in AFP processes,“ in *ECCM17*, München, 2016.
- [3] O. Dubois, J. L. Cam und A. Beakou, „Experimental Analysis of Prepreg Tack,“ *Experimental Mechanics*, 2010.
- [4] B. Kim, K. Potter und P. Weaver, „Continuous tow shearing for manufacturing variable angle tow composites,“ *Composites: Part A*, 2012.
- [5] D. Deden, F. Bruckner, L. Brandt und F. Fischer, „Comparison of Heat Sources for Automated Dry Fiber Placement: Xenon Flashlamp vs. Infrared Heating,“ in *ICCM22*, Melbourne, Australien, 2019.
- [6] K. Yassin und M. Hojjati, „Processing of thermoplastic matrix composites through automated fiber Placement and tape laying methods: A review,“ *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2018.
- [7] D. Williams und M. Brown, „Xenon Flashlamp Heating for Automated Fibre Placement,“ 2017.
- [8] A. Brasington, C. Sacco, J. Halbritter, R. Wehbe und R. Harik, „Automated fiber placement: A review of history, current technologies, and future paths forward,“ *Composites Part C: Open Access*, 2021.
- [9] P. Zwerger, „Hier entstehen die Kohlefaser-Flügel der MS-21,“ April 2023. [Online]. Available: <https://www.flugrevue.de/zivil/aerokomposit-in-uljanowsk-hier-backt-russland-neue-fluegel-fuer-die-ms-21/>.
- [10] D. Deden, L. Brandt, M. Mayer, D. Henning, O. Hellbach und F. Fischer, „Full-Scale Application of in-situ Automated Fiber Placement for the Production of a Fuselage Skin Segment,“ in *SAMPE Europe Conference 2023*, Madrid, 2023.
- [11] F. Fischer, „Production of the thermoplastic composite upper shell for the MFFD,“ in *DLRK*, Stuttgart, 2023.
- [12] HexPly M21 Product Data Sheet, „https://hexcel.com/user_area/content_media/raw/H

exPly_M21_global_DataSheet.pdf," [Online].

- [13] M. Assadi und T. Field, „AFP Processing of Dry Fiber Carbon Materials (DFP) for Improved Rates and Reliability,“ *SAE Int. J. Adv. & Curr. Prac. in Mobility* 2, 2020.
- [14] C. Stokes-Griffin und P. Compston, „The effect of processing temperature and placement rate on the short beam strength of carbon fibre–PEEK manufactured using a laser tape placement process,“ *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015.
- [15] L. Raps, A. Chadwick, I. Mössinger, M. Vinot, T. Behling und Y. Schäfer, „Characteristics of in-situ automated Fiber placement carbon-fiber-reinforced low-melt polyaryl ether ketone laminates part 2: Effect of prepreg composition,“ *Journal of composite materials*, 2024.
- [16] D. Deden, L. Brandt und L. Larsen, „Closing the Quality Gap of thermoplastic AFP: Insights from the Production of the Multifunctional Fuselage Demonstrators Upper Shell,“ in *ITHEC*, Bremen, 2024.