



**Einfluss von Prozessparametern des Tailored Fibre
Placement-Verfahrens auf die Drapiereigenschaften
und mechanische Performance thermoplastischer
CFK-Verbundwerkstoffe**

StudyTexter.de
Maschinenbau

Abgabe: [XX.XX.XXXX]

Inhaltsübersicht

1. Einleitung	1
2. Grundlagen des Tailored Fibre Placement-Verfahrens	2
2.1 Funktionsweise einer TFP-Anlage.....	3
2.2 Prozessparameter des TFP-Verfahrens.....	4
3. Drapiereigenschaften von CFK-Elementen	5
3.1 Definition und Mechanismen des Drapierens.....	5
3.2 Einfluss von TFP-Prozessparametern auf Drapiereigenschaften.....	7
4. Drapierbarkeit von CFK-Verbundwerkstoffen	8
4.1 Zusammenhang zwischen TFP-Prozessparametern und Drapiereigenschaften.....	9
4.2 Optimierungsansätze für gute Drapierbarkeit.....	10
5. Anwendungen im Leichtbau	12
5.1 Optimierung der Drapierbarkeit von Fertigungsprozessen durch TFP-Erkenntnisse.....	12
5.2 Praxisbeispiele für optimierte TFP-Prozesse.....	14
6. Fazit	15
Literaturverzeichnis	18
Plagiatserklärung	20

1. Einleitung

Im Angesicht des globalen Wandels und der zunehmenden Notwendigkeit, Ressourcen zu schonen und Effizienz zu steigern, rücken innovative Fertigungstechnologien im Leichtbau stärker in den Vordergrund. Eine solche Technologie ist das Tailored Fibre Placement (TFP), ein Verfahren, das es erlaubt, Faserverbundwerkstoffe gezielt zu verstärken und damit die Materialausnutzung und mechanischen Eigenschaften signifikant zu beeinflussen. Doch wie genau lassen sich durch die Manipulation von Prozessparametern im TFP-Verfahren die Drapiereigenschaften und mechanische Performance thermoplastischer CFK-Verbundwerkstoffe optimieren?

Diese Frage stellt den Kern der vorliegenden Arbeit dar und spiegelt die Schnittmenge aus Ingenieurskunst, Materialwissenschaft und Industrieerfahrung wieder – eine Synergie, die nicht nur einen wissenschaftlich innovativen Ansatz verkörpert, sondern auch praxisnahe Anwendung findet. Das Ziel dieser Studie ist es daher, ein tiefgreifendes Verständnis für den Einfluss der zahlreichen Prozessparameter auf CFK-Elemente zu entwickeln und daraus Handlungsempfehlungen für die Optimierung von Fertigungsprozessen abzuleiten.

Um diese Zielsetzung zu erreichen, basiert diese Arbeit auf einer interdisziplinären Analysemethodik. Hierzu wurden umfassende Literaturstudien durchgeführt sowie praktische Aspekte betrachtet, um die vielfältigen Effekte der Prozessparameter dezidiert zu erfassen. Der Forschungsstand reflektiert dabei aktuelle technologische Errungenschaften und Herausforderungen innerhalb des TFP-Bereichs sowie deren Auswirkungen auf die Herstellung von Verbundwerkstoffen.

Der Aufbau der Arbeit widmet sich zunächst den Grundlagen des TFP-Verfahrens, untersucht daraufhin detailliert dessen Funktionsweise und thematisiert relevante Prozessparameter. Es folgt eine Betrachtung der Definition von Drapieren und der zugrunde liegenden Mechanismen. Im Hauptteil wird dann der Einfluss dieser Parameter auf die Drapiereigenschaften und mechanische Leistung analysiert. Abgerundet wird die Arbeit durch Praxisbeispiele, welche das Potenzial des TFP-Verfahrens unterstreichen, sowie einem abschließenden Kapitel mit Zusammenfassung und Ausblick.

Untermuert wird diese Struktur durch meine persönliche Motivationslage: Als angehender Maschinenbauingenieur, kurz vor Abschluss meines Studiums mit ersten Industrieerfahrungen im Sektor Leichtbau bestückt, möchte ich beide Perspektiven - sowohl

theoretische als auch praktische Aspekte - vereinen, um zukunftsfähige Impulse für diesen hochinnovativen Bereich beisteuern zu können. Mit jeder Seite strebt diese Arbeit danach, fundierte Erkenntnisse anzubieten, welche die Bedeutung eines gründlichen Verständnisses aller variablen Komponenten innerhalb des TFP-Prozesses verdeutlichen und somit maßgeblich zur Stärkung industrieller Resilienz beitragen können.

Das Interesse für Leichtbaukonstruktion selbst entspringt einerseits meiner Faszination für komplexe Systeme im Zusammenspiel von Kraftübertragungen und materialgerechter Gestaltung; andererseits aus dem Wunsch heraus nachhaltige Technologien weiterzuentwickeln - ein Ansinnen, welches insbesondere in Zeiten ökonomischer wie ökologischer Herausforderungen nicht an Relevanz verlieren darf.

In Einklang mit dem akademischen Schreibstil beabsichtigt diese Arbeit nicht nur einen kritischen Diskurs über die relevanten Themenbereiche zu eröffnen, sondern ebenso praktikable Ansätze für eine Zukunft der Materialwissenschaft und des Maschinenbaus aufzuzeigen – immer mit dem Blick nach vorn gerichtet, auf Innovationssprünge durch sorgsame Optimierung etablierter Verfahrenstechniken.

2. Grundlagen des Tailored Fibre Placement-Verfahrens

Das Tailored Fibre Placement (TFP)-Verfahren stellt eine Schlüsseltechnologie in der Produktion moderner Leichtbaukomponenten dar und ermöglicht durch gezielte Faserorientierung maßgeschneiderte mechanische Eigenschaften von CFK-Elementen. In den folgenden Abschnitten wird beleuchtet, wie technische Innovationen und präzise Steuerungsmethoden dieser Fertigungstechnik die Effizienz und Performance kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe beeinflussen. Dabei werden sowohl die Grundprinzipien der Anlagentechnik als auch die Rolle unterschiedlicher Prozessparameter im Detail erörtert, um ein fundiertes Verständnis für die Optimierungspotenziale im Hinblick auf Drapierfähigkeit und mechanische Festigkeit zu schaffen. Diese Betrachtungen tragen somit zentral zum Gesamtverständnis der Arbeit bei, welche die Verbesserung von Fertigungsprozessen und das Potenzial im Leichtbau herausstellt.

2.1 Funktionsweise einer TFP-Anlage

Im Kontext der Herstellung von Verbundwerkstoffen ist das Tailored Fibre Placement (TFP) ein fortgeschrittenes Verfahren, das es ermöglicht, die Faserorientierung in Verbundbauteilen gezielt einzustellen und somit deren mechanische Eigenschaften maßzuschneidern.

Die technischen Elemente einer TFP-Anlage, bestehend aus Komponenten wie der Faserablageeinheit, dem Schneidemechanismus und dem System zur Spannungskontrolle des Trägermaterials, spielen eine entscheidende Rolle bei der Realisierung präziser Verbundstrukturen. Die Herausforderungen bei der Kontrolle der Faserorientierung sind vielschichtig; sowohl Zhang et al. (2020) als auch Crothers et al. (1997) haben auf die Bedeutung eines synchronisierten Zusammenspiels dieser Komponenten für die Minimierung von Materialspannungen und die Prävention von Defekten hingewiesen. Um den TFP-Prozess zu optimieren, ist daher eine sorgfältige Abstimmung der Maschinenelemente notwendig.

Bei Untersuchungen über den Prozessablauf in einem TFP-System zeigt sich das Prinzip der Scheren-Funktionalität gemäß Mattheij et al. (2000), welches die Integration variabler Faserorientierungen ermöglicht, als besonders relevant für die Optimierung der mechanischen Leistungsfähigkeit des Endprodukts. So wird die effektive Anpassung des Ablagevorgangs an unterschiedliche Belastungsrichtungen gewährleistet, was vor allem im Hinblick auf die Lastverteilung und -ausrichtung innerhalb des Bauteils von immenser Bedeutung ist.

Die Softwareintegration stellt zudem einen Eckpfeiler moderner TFP-Anlagen dar; sie erleichtert nicht nur die Automatisierung des Prozesses, sondern ermöglicht darüber hinaus auch eine erhöhte Präzision und Reproduzierbarkeit durch CAD/CAM-Systeme. Diese erlauben stetige Anpassungen des Legemusters während des Herstellungsprozesses und können dadurch stressinduzierte Schwachstellen verringern oder gar vermeiden.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt im Rahmen des TFP-Prozesses ist die Qualitätskontrolle. Methoden zur Überwachung kritischer Parameter wie Spannungskontrolle werden immer anspruchsvoller und tragen nach Spickenheuer et al. (2014) signifikant zur Qualitätssicherung während des gesamten Prozesses bei. Automatisierte Systeme gewährleisten konstante Bedingungen beim Verlegen und tragen dazu bei, dass Fehler minimiert werden können – ein Beitrag zur dauerhaften Konsolidierung einer fehlerfreien

Produktion.

Abschließend kann festgestellt werden, dass eine umfassende Kenntnis über alle Prozessparameter und maschinellen Komponenten im Zusammenhang mit dessen Einsatzgebiet und den angestrebten Eigenschaften des Endproduktes erforderlich ist, um eine qualitativ hochwertige Faserverlegung zu gewährleisten. Eine kontinuierliche Weiterentwicklung in allen Bereichen der TFP-Technologie ist daher unabdinglich für zukünftige Innovationen im Bereich Verbundwerkstoffe und Leichtbauanwendungen.

2.2 Prozessparameter des TFP-Verfahrens

In der fortgeschrittenen Fertigungstechnologie Tailored Fibre Placement (TFP) spielen die technischen Elemente einer Anlage, wie etwa die Faserablageeinheit und der Schneidemechanismus, eine entscheidende Rolle für präzise Verbundstrukturen. Die Herausforderungen bei der Faserorientierung sind vielfältig; es gilt, Materialspannungen zu minimieren und Defekte zu verhindern. Dies erfordert ein synchronisiertes Zusammenspiel der Komponenten und stellt hohe Anforderungen an die Maschinenkonstruktion. Als essentielle Komponente dient der Schneidemechanismus zur individuellen Anpassung von Faserovings an verschiedene Konturen. Dies optimiert nicht nur die Materialausnutzung, sondern verhindert auch kostspielige Nacharbeiten und erhöht somit die Effizienz des gesamten Herstellungsprozesses.

Softwareintegration ist ein weiterer Eckpfeiler moderner TFP-Anlagen. Unterstützt durch CAD/CAM-Systeme ermöglicht sie eine erhöhte Präzision und Reproduzierbarkeit im Fertigungsprozess. Solche Systeme gestatten eine adaptive Reaktion auf Schwankungen oder Fehlermeldungen während des Produktionsprozesses und tragen maßgeblich zur Minimierung stressinduzierter Schwachstellen im Endprodukt bei. Für einen geregelten Ablauf ist insbesondere die gleichmäßige Spannung des Trägermaterials entscheidend: Unterschiedliche Spannungszustände können Drapierdefekte wie Falten oder Verwerfungen nach sich ziehen, was ultimativ die mechanischen Eigenschaften des entstehenden Verbundwerkstoffs negativ beeinflussen kann.

Die Rolle automatisierter Spannungskontrollsysteme gewinnt in diesem Zusammenhang zunehmend an Bedeutung, da sie dazu dienen, konstante Bedingungen beim Verlegen sicherzustellen und Prozesstoleranzen strikt zu überwachen. Durch den Einsatz solcher Technologien wird ein Beitrag zur langfristigen Konsolidierung einer fehlerfreien Produktion

geleistet. Die detaillierte Kenntnis der Prozessparameter und Maschinenelemente ist unerlässlich, um qualitativ hochwertige Verbundmaterialien herstellen zu können.

Eine fundierte Betrachtung zeigt jedoch auch Limitationen dieser Technologie auf. Insbesondere die Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften durch unterschiedliche Ablagegeschwindigkeiten bedarf einer kritischen Evaluierung. Forschungsarbeiten belegen Probleme bei schneller Faserverlegung, speziell in Bezug auf komplexe Geometrien (Zhang et al., 2020). Des Weiteren müssen konkurrierende Ziele wie hohe Produktionsgeschwindigkeit gegenüber einem Minimum an herstellbedingten Defekten sorgsam abgewogen werden.

Abschließend implizieren Erkenntnisse aus dem Bereich der TFP-Technologie weiterführende Möglichkeiten hinsichtlich einer kontinuierlichen Prozessoptimierung unter Berücksichtigung komplexer Materialreaktionen auf Temperaturveränderungen sowie dynamischer Last-Wechselwirkungen innerhalb des Laminats. Es bleibt zukünftigen Forschungsarbeiten vorbehalten, diese Aspekte vertieft zu untersuchen und einen Mehrwert für die industrielle Anwendung bereitzustellen.

3. Drapiereigenschaften von CFK-Elementen

In Kapitel 3 der vorliegenden Arbeit wird die Bedeutung der Drapiereigenschaften von carbonfaserverstärkten thermoplastischen Kunststoffen (CFK) im Kontext des Tailored Fibre Placement (TFP)-Verfahrens behandelt. Es werden sowohl die zugrunde liegenden Mechanismen und physikalischen Effekte, die während des Drapierprozesses auftreten, als auch deren Einfluss auf die Endqualität und Leistungsfähigkeit der hergestellten Bauteile beleuchtet. Diese Analyse ist essentiell, um das Zusammenspiel zwischen den Prozessparametern des TFP-Verfahrens und den resultierenden Drapiereigenschaften zu verstehen und optimale Fertigungsbedingungen für hochperformante Leichtbaukomponenten zu entwickeln.

3.1 Definition und Mechanismen des Drapierens

Das Phänomen des Drapierens spielt eine zentrale Rolle in der Verarbeitung und Anwendung von thermoplastischen kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK). Es beschreibt den Prozess, bei dem die Fasern und das Matrixmaterial unter Beachtung verschiedener physikalischer Effekte und Mechanismen in eine spezifische Form gebracht

werden. Hierbei ist es unumgänglich, elastische wie auch plastische Verformungen zu berücksichtigen, die beide essenziell für die endgültige Kontur des Bauteils sind. Die Reversibilität elastischer Verformungen erlaubt es, dass sich die Fasern nach einer Belastung wieder in ihren ursprünglichen Zustand zurückbewegen können. Dadurch ist es möglich, Fasern an vorgegebene Formen anzupassen, ohne bleibende Veränderungen im Gefüge zu hinterlassen. Dieses reversible Dehnungsverhalten der Fasern zeigt ihre Bedeutung für die Flexibilität während des Drapierprozesses auf.

Die plastische Verformung hingegen ist gekennzeichnet durch eine permanente Umstrukturierung innerhalb des Verbundwerkstoffes, sobald die Fließgrenze überschritten wird. Diese Eigenschaft ist entscheidend für das Erreichen einer dauerhaften Formgebung. Insbesondere bei komplexen Konturen und scharfen Winkeln innerhalb eines Bauteils spielen diese irreversiblen Materialanpassungen eine herausragende Rolle.

Eine nicht zu vernachlässigende Komponente bildet die Adhäsionskraft zwischen den Fasern und dem Matrixmaterial. Die Optimierung dieser Haftkräfte kann beispielsweise durch Oberflächenbehandlungen oder das Hinzufügen von Additiven erfolgen. Eine stärkere Bindung zwischen diesen beiden Komponenten wirkt einem möglichen Delaminieren entgegen – sowohl während des Drapierens als auch danach, was somit zur Stabilität und Langlebigkeit des fertigen Produktes beiträgt.

Folgende Einflussfaktoren auf die Drapierbarkeit sind maßgeblich: Die Ablagegeschwindigkeit muss so eingestellt sein, dass sie ein effektives Eindringen des Harzes ermöglicht und gleichzeitig genug Zeit lässt, um eine adäquate Aktivierung des Bindemittels zu gewährleisten ohne dabei strukturelle Integrität oder Endfestigkeit zu beeinträchtigen. Hohe Geschwindigkeiten könnten zu unzureichender Benetzung führen und damit negative Auswirkungen auf das Endprodukt mit sich bringen.

Auch die Viskosität des Harzes bzw. der Harzmischungen stellt einen kritischen Punkt dar, da sie direkt mit der Qualität der finalen Infiltration korreliert. Eine Abstimmung dieses Parameters kann dazu beitragen, Luftblasenbildung zu minimieren sowie sicherzustellen, dass das Matrixmaterial geeignete Fließeigenschaften aufweist, sich optimal mit den Fasern verbindet und so zum Beitrag einer homogenen CFK-Struktur beiträgt.

Beim TFP-Drapierprozess auftretende Defekte wie Faltenbildung oder On-Axis-Bias benötigen besondere Aufmerksamkeit in der präventiven Prozessführung. Durch eine angepasste Spannungskontrolle und kontinuierliche Überwachung lassen sich viele dieser

Störgrößen bereits im Vorfeld eliminieren. Außerdem hilft eine gleichmäßige Infiltrationsrate des Harzes dabei, Fehlerquoten signifikant zu reduzieren.

Abschließend verdient der Zusammenhang zwischen Struktur-Eigenschafts-Beziehungen beim TFP-Drapieren Berücksichtigung: Spezielle Untersuchungen müssen zeigen, wie das Zusammenspiel von Faseranzahl pro Quadratmeter und Textillage sich auf die mechanischen Eigenschaften und Drapiereffekte auswirken kann – dies alles im Bestreben optimale Mikrostrukturkonfigurationen für spezifische Einsatzszenarien abzuleiten.

Diese kritische Betrachtung verdeutlicht den facettenreichen Anspruch an die Verarbeitungsprozesse beim Drapieren von CFK-Elementen im TFP-Verfahren und betont sowohl Notwendigkeit als auch Chancen für innovative Weiterentwicklungen in diesem Bereich.

3.2 Einfluss von TFP-Prozessparametern auf Drapiereigenschaften

Das Tailored Fibre Placement (TFP)-Verfahren ermöglicht eine gezielte Beeinflussung der Drapiereigenschaften von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK), indem es eine präzise Kontrolle der Faserorientierung und -spannung während des Verlegungsprozesses bietet. Die Forschung hebt hervor, dass durch das TFP-Prinzip die Festigkeit und die Reduktion der Anisotropie-Effekte in drapierten Verbundwerkstoffen verbessert werden können, indem Kräfte entlang der Lastpfade verteilt werden (Mattheij et al., 2000). Die Anwendung dieses Verfahrens führt zu einer Steigerung der Leistungsfähigkeit von CFK-Bauteilen, da Materialschwachstellen, die aus suboptimaler Faserausrichtung resultieren könnten, minimiert werden.

Die Ablagegeschwindigkeit im TFP-Prozess beeinflusst maßgeblich die Qualität des Drapierergebnisses. Studien verdeutlichen, dass eine erhöhte Geschwindigkeit das Auftreten von Defekten begünstigen kann und insbesondere bei komplexen Geometrien Probleme verursacht (Zhang et al., 2020; Kim et al., 2011). Daher erfordert es eine sorgfältige Abwägung, um eine Balance zwischen effizientem Fortschritt und einem defektfreien Endprodukt zu finden. Ein optimiertes Geschwindigkeitsmanagement trägt zur Homogenität des Verbundmaterials bei und steuert das Konsolidierungsverhalten des thermoplastischen Harzes innerhalb der Struktur.

Eine wesentliche Herausforderung besteht darin, die thermoplastischen Matrixeigenschaften

mit den prozesstechnischen Parametern so abzustimmen, dass ihre Potenziale voll ausgeschöpft und gleichzeitig Energie- und Ressourceneffizienz gesteigert werden können (Nägele et al., 2015). Hierbei ist ein tiefgehendes Verständnis über die Schmelzeigenschaften der verwendeten Polymere unerlässlich, um deren Infiltrationsverhalten optimal zu gestalten. Temperatureinstellungen und Kühlraten sind dabei entscheidende Variablen, die das Zusammenspiel zwischen Faser und Matrixmaterial signifikant beeinflussen.

Breuer (1998) zeigt auf, dass auch die Faseranzahl pro Flächeneinheit ein essentieller Parameter für verstärkte CFK-Strukturen im TFP-Verfahren ist. Eine geeignete Dichte an Fasern ist nötig, um sowohl Drapierbarkeit als auch mechanische Performance zu maximieren. Zu viele oder zu wenige Fasern können sich ungünstig auf Spannungen innerhalb des Bauteils auswirken und damit dessen Eigenschaften negativ beeinträchtigen.

Abschließend bedarf es eines detaillierten Verständnisses darüber, wie unterschiedliche Faserorientierungswinkel zur Steigerung der Drapierfähigkeit beitragen können. Wie Breuer (1998) feststellt, spielt hierbei unter anderem die maximale Tangenzialverbindung der Fasern eine wichtige Rolle. Verschiedene Orientierungsmuster müssen dahingehend untersucht werden, um gezielt Spannungszustände im Laminatverbund sowie externe Belastungsübertragungen positiv zu beeinflussen.

Die sorgfältige Analyse jedes einzelnen Prozessparameters offenbart das Potenzial des TFP-Verfahrens zur Erzeugung hochqualitativer thermoplastischer CFK-Bauteile mit exzellenten Drapiereigenschaften. Indem man diese Parameter genau abstimmt und kontrolliert, lässt sich ein entscheidender Wettbewerbsvorteil in der Herstellung moderner Leichtbaukomponenten realisieren.

4. Drapierbarkeit von CFK-Verbundwerkstoffen

Die Drapierbarkeit von CFK-Verbundwerkstoffen ist ein zentrales Thema im Rahmen des Tailored Fibre Placement (TFP)-Verfahrens und ein Schlüsselement für die Produktionstechnik moderner Leichtbaukomponenten. In diesem Kapitel wird untersucht, wie eine präzise Steuerung der Prozessparameter des TFP-Verfahrens die Qualität des Drapierresultats beeinflusst und damit die mechanischen Eigenschaften sowie die Performance von CFK-Bauteilen optimiert werden können. Unter Berücksichtigung der interdisziplinären Perspektive dieser Arbeit, werden sowohl technische Herausforderungen

als auch innovative Lösungsansätze vorgestellt, um das Design und die Herstellung von Verbundmaterialien effektiver zu gestalten.

4.1 Zusammenhang zwischen TFP-Prozessparametern und Drapiereigenschaften

Ein entscheidender Aspekt bei der Betrachtung des Tailored Fibre Placement-Verfahrens ist die Analyse der Faserorientierung und -spannung und deren Auswirkung auf die Drapierfähigkeit von CFK-Elementen. Die präzise Steuerung dieser Parameter im TFP-Prozess erlaubt eine maßgeschneiderte Anpassung an unterschiedlichste Belastungsrichtungen, was entscheidend für die Lastübertragung innerhalb von Verbundwerkstoffen ist (Mattheij et al., 2000). Eine nicht zu vernachlässigende Herausforderung stellt dabei das Entstehen von Falten dar, welches durch eine adäquate Spannungskontrolle verhindert werden kann. Hierbei leisten automatisierte Spannungskontrollsysteme einen wichtigen Beitrag zur Sicherstellung einer gleichbleibenden Qualität während des Verlegeprozesses (Spickenheuer et al., 2014).

Zudem ist es essentiell, den Effekt variierender Ablagegeschwindigkeiten auf die Qualität des Drapierergebnisses zu analysieren. Es wurde festgestellt, dass eine erhöhte Geschwindigkeit negative Konsequenzen für das Endprodukt haben kann, insbesondere in Bezug auf Defekte wie Risse oder Faltenbildung, vor allem bei komplexen Geometrien (Kim et al., 2011; Zhang et al., 2020). Daher muss eine Balance gefunden werden zwischen der effizienten Prozessführung und dem Erhalt einer defektfreien Bauteilqualität.

Weiterhin spielt die Korrelation zwischen den thermoplastischen Matriceigenschaften und der Justierung der TFP-Prozessparameter eine signifikante Rolle. Die Auswahl von Materialien mit angepassten Schmelzeigenschaften ermöglicht eine optimale Benetzung der Fasern und verbessert dadurch die Infiltration des Harzes sowie dessen Verbund mit den Verstärkungsfasern (Nägele et al., 2015). Dies hat unmittelbare Auswirkungen sowohl auf energetische Aspekte als auch auf die mechanische Leistungsfähigkeit von CFK-Elementen.

Des Weiteren muss die optimale Faseranzahl pro Flächeneinheit sorgfältig bestimmt werden, um die besten drapierbaren Eigenschaften erzielen zu können. Breuer (1998) zeigt auf, dass es eine maximale Tangenzialverbindung gibt, bei der sich mechanische Eigenschaften wie Festigkeit und Steifigkeit optimieren lassen. Ein Über- oder Unterschreiten dieser Dichte führt zu suboptimaler Spannungsverteilung innerhalb des

Materials.

Die Analyse optimaler Faserverlegewinkel zielt darauf ab, sowohl interne Spannungszustände positiv zu beeinflussen als auch externe Lastübertragungen effizient zu gestalten. Wie Breuer (1998) darlegt, müssen verschiedene Orientierungsmuster untersucht werden, um entsprechende Materialeigenschaften gezielt einstellen zu können.

Abschließend stellt die regulierte Ablagegeschwindigkeit einen Schlüsselparameter dar, um Defekentstehungen im TFP-Prozess zu minimieren (Kim et al., 2011). Nicht zuletzt garantieren automatisierte Spannungskontrollsysteme, unterstützt durch Erkenntnisse aus Spickenheuer et al. (2008), einen hohen Gleichmäßigkeitsgrad und unterstützen damit den Qualitätsanspruch im Produktionsprozess entscheidend.

Eine eingehende Untersuchung jeder einzelnen dieser Variablen ist zentral für das Verständnis der Zusammenhänge zwischen den TFP-Prozessparametern und den Drapiereigenschaften von CFK-Bauteilen. Indem man diese Prozessparameter genau überwacht und kontrolliert, lässt sich ein hochwertiges Endprodukt sicherstellen.

4.2 Optimierungsansätze für gute Drapierbarkeit

Die Optimierung der Drapierfähigkeit kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe stellt eine fundamentale Herausforderung für die effiziente Anwendung des Tailored Fibre Placement (TFP)-Verfahrens dar. Eine Schlüsselrolle nimmt hierbei die präzise Faserorientierung ein, welche mittels TFP realisiert werden kann und unmittelbar die mechanischen Eigenschaften sowie das Dehnverhalten von CFK-Bauteilen beeinflusst. Das Prinzip der Scheren-Funktionalität ermöglicht es, Fasern so im Verbundmaterial zu platzieren, dass sie optimal an Belastungsrichtungen adaptiert sind. Diese Art von maßgeschneiderter Faserausrichtung trägt erheblich zur Homogenisierung der Spannungsverteilung im Bauteil bei und reduziert dadurch die Entstehung von faltenbedingten Schwachstellen (Mattheij et al., 2000). Insbesondere computergestützte Algorithmen wie jene, die im TFPT-Optimierungstool vorgeschlagen wurden (Temmen et al., 2006), können dazu beitragen, optimale Spannungsprofile vorherzubestimmen und somit den Drapiervorgang signifikant zu verbessern.

Die Geschwindigkeit der Faserablage ist ebenfalls ein kritischer Parameter für die Qualität des Drapiererergebnisses. Die Diskrepanz zwischen erhöhter Ablagegeschwindigkeit und dem

Auftreten von Defekten erfordert eine sorgfältige Balance, um Effizienz nicht auf Kosten der Endproduktqualität zu steigern (Zhang et al., 2020; Kim et al., 2011). Automatisierte Regeltechniken könnten daher entwickelt werden, um basierend auf Echtzeitdaten von Sensoren die Ablagegeschwindigkeit situationsabhängig anzupassen, wodurch Materialhomogenität und Defektfreiheit auch bei variablen Geschwindigkeitsprofilen gewährleistet würden.

In Bezug auf thermoplastische Matriceigenschaften ist eine gezielte Anpassung der Prozessparameter entscheidend für die Ausnutzung ihrer Potenziale hinsichtlich Energieeffizienz und mechanischer Leistungsfähigkeit. Nägele et al. (2015) identifizieren in ihren Forschungen thermoplastische Kohlenstofffasern als besonders geeignet für energieeffiziente Produktionsprozesse. Die Beachtung spezifischer Schmelzeigenschaften ist dabei unerlässlich, um ideale Prozesstemperaturen festzulegen, welche maximale Infiltrationserfolge sicherstellen.

Die Wahl der Faseranzahl pro Flächeneinheit ist ebenfalls ausschlaggebend für das Erreichen einer optimal drapierbaren Struktur. Breuer (1998) zeigt eine direkte Korrelation zwischen der Faserdichte und mechanischen Performancesteigerungen aufgrund maximaler Tangenzialverbindungen auf. Zukünftige Studien sollten sich darauf konzentrieren, diesen Zusammenhang weiter zu untersuchen und durch modellgestützte Analysen zu validieren.

Beim TFP-verfahren gilt es darüber hinaus auch den Faserwinkel als einen zentralen Parameter zur Steigerung der Drapierfähigkeit zu hinterfragen. Hierbei müssen verschiedene Orientierungsmuster analysiert werden mit dem Ziel, intern induzierte Spannungszustände positiv zu beeinflussen sowie eine effiziente Belastungsübertragung zu gewährleisten (Breuer, 1998).

Zusammenfassend bedarf es einer ganzheitlichen Betrachtung aller Optimierungsansätze unter Berücksichtigung erstklassiger Software-Tools zum Designmanagement, automatisierten Kontrollsysteme zur Qualitätssicherung und rigiden Untersuchungen relevanter Materialparameter. Nur durch diese integrierte Herangehensweise können tiefere Einblicke in die komplexen Zusammenhänge zwischen TFP-Prozessparametern und den daraus resultierenden Drapiereigenschaften gewonnen werden.

5. Anwendungen im Leichtbau

Die Optimierung von Fertigungsprozessen durch das Tailored Fibre Placement (TFP)-Verfahren stellt einen Wendepunkt in der Produktionstechnik von Leichtbaukomponenten dar. Im Kontext dieser Arbeit bildet das fünfte Kapitel die Schnittstelle zwischen Prozessparametern und deren Anwendungspotenzial, wobei signifikante Auswirkungen auf Effizienzsteigerung und Qualitätssicherung im Vordergrund stehen. Es werden innovative Ansätze vorgestellt, die TFP-optimierte Materialien in diversen Industriebereichen, wie Luftfahrt und Automobilindustrie, wirksam einsetzen. Dabei steht insbesondere die Reduktion von Gewicht bei gleichzeitiger Wahrung hoher Qualitätsstandards im Fokus der folgenden Betrachtungen.

5.1 Optimierung der Drapierbarkeit von Fertigungsprozessen durch TFP-Erkenntnisse

Die Optimierung der Drapierbarkeit von Fertigungsprozessen durch das Tailored Fibre Placement-Verfahren bietet ein signifikantes Potenzial, um die Effizienz und Qualität in der Produktion von Leichtbaukomponenten zu steigern. Eine Schlüsselrolle spielen hierbei Prozessparameter wie die Ablagegeschwindigkeit und Faserspannung, die wesentlich zur Reduktion von Produktionszeiten beitragen können, ohne dabei die hohe Anforderung an die Produktqualität zu vernachlässigen.

Eine detaillierte Analyse des Einflusses variabler Ablagegeschwindigkeiten zeigt auf, dass mit zunehmender Geschwindigkeit zwar eine Effizienzsteigerung erzielt werden kann, dies jedoch gleichzeitig das Risiko für Faltenbildung oder andere Defekte erhöht (Spickenheuer et al., 2014). Es bedarf daher einer ausgereiften Steuerungstechnologie, um diesen Parameter dynamisch anpassen zu können und somit ein Gleichgewicht zwischen Geschwindigkeit und Genauigkeit im Produktionsablauf herzustellen. Automatisierte Spannungskontrollsysteme erweisen sich als essenziell, um eine konstante Materialspannung während des TFP-Prozesses zu gewährleisten. Sie minimieren das Auftreten struktureller Schwächen, indem sie Inhomogenitäten im Verbundaufbau verhindern und so zur Langlebigkeit des Endproduktes beitragen (Spickenheuer et al., 2014).

Empirische Fallstudien bestätigen die Möglichkeit einer verbesserten Durchlaufzeit bei Aufrechterhaltung der Qualitätsstandards mithilfe optimierter TFP-Prozessparameter (Mattheij et al., 2000). Zusätzlich zeigen Untersuchungen den Kosten-Nutzen-Trade-off zwischen der effizienten Ablagegeschwindigkeit und der erforderlichen Präzision für

hochwertige Bauteile auf. Die systematische Erfassung quantitativer Daten ermöglicht es Herstellenden, gut informierte Entscheidungen über geeignete Prozessanpassungen zu treffen, um Kosteneffizienz und Wettbewerbsfähigkeit gleichermaßen zu erhöhen.

Die Implementierung von CAD/CAM-gestützter Vorausberechnung spielt eine entscheidende Rolle bei der stressoptimierten Gestaltung von Verbundstrukturen durch gezielte Faserorientierung. Computergestützte Konstruktionsmethoden sind unverzichtbar für die Planung stark belasteter Bauteile (Crothers et al., 1997). Hierbei werden mittels präziser Simulationssoftware kritische Spannungsverteilungen im Bauteil analysiert und optimiert. Dieses Verfahren reduziert nicht nur Materialeinsatz und Herstellungskosten, sondern trägt parallel dazu bei, Stresskonzentrationen in tragenden Strukturen deutlich zu verringern.

Moderne Softwarelösungen bieten zudem Möglichkeiten zur Simulation optimaler Schnittmuster und Layup-Sequenzen, was insbesondere hinsichtlich einer nachhaltigen Materialnutzung sowohl in ökologischer als auch ökonomischer Hinsicht Vorteile bringt (Breuer, 1998). Parametrische Designwerkzeuge unterstützen individuelle Kundenwünsche ohne erheblichen Mehraufwand in Entwicklung und Prototypenfertigung. Diese Technologien sind revolutionär für den Sektor der angepassten Massenproduktion, da sie Größe und Formgebung maßgeschneiderter Produkte vereinfachen.

Die Bedeutung thermoplastischer Harze stellt einen weiteren Schwerpunkt innerhalb des TFP-Prozesses dar. Thermoplastische Matrixmaterialien bieten je nach Zusammensetzung spezielle Eigenschaften wie etwa niedrige Schmelzeigenschaften oder hohe Festigkeiten (Nägele et al., 2015). Die Abstimmung dieser thermoplastischen Eigenschaften mit den prozesstechnischen Anforderungen ist ausschlaggebend für eine optimale Ausformung des finalen Produktes sowie für Energieeffizienzaspekte innerhalb des Fertigungsprozesses.

In diesem Kapitel wurde ferner die herausragende Relevanz verschiedener Prozesstemperaturen zur Realisierung maximaler Interaktionspotenziale zwischen Faser und Matrix beleuchtet. Der Einsatz recycelbarer Harze könnte neue Dimensionen betriebswirtschaftlicher und ökologischer Nachhaltigkeit erschließen und somit einen positiven Beitrag zum Lebenszyklus ganzer Produkte liefern.

Zurückblickend zeigt dieses Kapitel klar auf, welche Chancen sich durch eine intelligente Steuerung relevanter Prozessparameter bieten. Das gezielte Management dieser Variablen kann somit als Grundstein für Innovationen in der modernen Leichtbautechnologie betrachtet werden.

5.2 Praxisbeispiele für optimierte TFP-Prozesse

Im Bereich der Luft- und Raumfahrt ist Leichtbau eine *conditio sine qua non*, denn jedes eingesparte Kilogramm bedeutet eine umso effizientere Nutzung von Ressourcen und Energie. Das Tailored Fibre Placement (TFP) nimmt hier eine Schlüsselposition ein, da es ermöglicht, Faserorientierungen für maximale Steifigkeit und Schlagzähigkeit in den kritischen Zonen von Rumpf- und Flügelstrukturen zu optimieren. Beispielsweise verdeutlicht die Verwendung einer lokal verstärkten "Open-Hole" Spannplatte, wie durch gezielte TFP-Verstärkung Bruchzähigkeiten gesteigert werden können (Gliesche et al., 2003). Eine genaue Untersuchung dieser Methode zeigt auf, dass neben der erhöhten mechanischen Performance auch Material- und Kosteneffizienzen möglich sind, da weniger Harz und Kohlenstofffasern benötigt werden, ohne dabei strukturelle Eigenschaften zu beeinträchtigen.

Die industrielle Anwendung von TFP-optimierten Komponenten lässt eine Verbesserung der interlaminaren Scherfestigkeit erwarten, die gerade bei wechselnden dynamischen Lasten in der Luftfahrt entscheidend zur Erhaltung der Strukturintegrität beitragen kann. Die Eliminierung schwachstellenbehafteter Bereiche steigert außerdem die Zuverlässigkeit und Sicherheit des Gesamtsystems. Durch den gezielten Materialeinsatz lassen sich nicht nur Produktionskosten senken, sondern auch die Umweltbelastungen reduzieren; dies wird erreicht indem Energieaufwand im Herstellungsprozess verringert wird, was in Zeiten strenger werdender ökologischer Vorgaben ein wichtiger Erfolgsfaktor sein kann.

Ein weiteres Beispiel für die praktische Relevanz des TFP-Prozesses ist dessen Einsatz bei der Herstellung von Turbomolekularpumpenrotoren. Hierbei erlaubt die präzise Faserverlegung mittels TFP erhebliche Energieeinsparungen durch Balanceverbesserung der Rotoren, wie in den Arbeiten von Uhlig (2018) beschrieben. Eine effektive Gewichtsverteilung minimiert Unwucht und resultiert in verminderten Betriebsenergiebedarfen sowie einer gesteigerten Lebensdauer des Bauteils. Wartungsintervalle können so verlängert werden und Einspareffekte hinsichtlich Zeit und Kosten entstehen - sowohl für Produzierende als auch Nutzende.

Auch im Automobilsektor bietet das TFP Verfahren vielversprechende Möglichkeiten zur Weiterentwicklung. Unter anderem spielen hierbei Gewichtsreduktion und Kostensenkung eine zentrale Rolle. Die Forschungen von Wright et al. (2019) zeigen auf, dass

Polypropylen-Infiltration in kohlenstofffaserverstärkte Komponenten zu Teilen führen kann, die sowohl stabiler als auch leichter sind. Solche Innovationen unterstützen nicht nur das Ziel nach emissionsarmem Fahren durch geringeres Fahrzeuggewicht, sondern eröffnen zudem neue Designoptionen im Hinblick auf individuelle Kundenanforderungen.

Des Weiteren können Sportgeräte durch das Tailored Fibre Placement optimierte Eigenschaftsprofile erhalten. Bei Sportgeräten wie Fahrradrahmen oder Tennisschlägern kann dadurch eine spezifisch angepasste Manipulation mechanischer Eigenschaften erfolgen, was deren Performance deutlich verbessert (Mattheij et al., 2000). Fortschritte im ergonomischen Design könnten dazu beitragen, dass Spieler vermehrt personalisierte Ausrüstungen wählen – ein Trend hin zur Individualisierung von High-End-Sportequipment mit konkretem Mehrwert für den Benutzenden.

Die dargestellten Praxisbeispiele unterstreichen das transformative Potenzial des TFP-Verfahrens über verschiedenste Industrien hinweg. Sie repräsentieren lediglich einen Ausschnitt aus dem Spektrum möglicher Anwendungen; weitere Bereiche könnten ebenso profitieren von den maßgeschneiderten Lösungen dieses innovativen Fertigungsverfahrens.

6. Fazit

Das Ziel dieser Arbeit war es, den Einfluss verschiedener Prozessparameter des Tailored Fibre Placement (TFP)-Verfahrens auf die Drapiereigenschaften und mechanische Leistungsfähigkeit von carbonfaserverstärkten thermoplastischen Verbundwerkstoffen zu untersuchen. Die zentrale Forschungsfrage lautete, wie diese Prozessparameter zu einer Optimierung von Fertigungsprozessen und Leichtbauanwendungen beitragen können. Dieses Ziel wurde durch eine interdisziplinäre Analyse erreicht, die theoretische Überlegungen mit praktischen Erkenntnissen verbindet. Durch die systematische Bewertung der Funktionsweise einer TFP-Anlage und der stark variierenden Prozessparameter konnte verdeutlicht werden, dass sowohl die Ablagegeschwindigkeit als auch das Spannungsmanagement bei der Faserplatzierung entscheidende Faktoren für das Ergebnis des Drapierens sind. Es wurde gezeigt, dass ein sorgsam reguliertes Geschwindigkeitsmanagement sowie die Implementierung von automatisierten Spannungskontrollsystemen maßgeblich zur Qualitätserhaltung der hergestellten Bauteile beitragen.

Im Hauptteil dieser Arbeit wurden wesentliche Ergebnisse dargelegt, welche die Relevanz

präziser Kontrollmechanismen im TFP-Prozess herausstellen. Dabei wurde besonders auf die Notwendigkeit hingewiesen, ein Gleichgewicht zwischen Geschwindigkeit und Akkuratheit zu gewährleisten, um Faltenbildung und andere Defekte zu minimieren. Ebenso haben empirische Studien bestätigt, dass optimierte TFP-Prozessparameter entscheidend für eine verbesserte Durchlaufzeit sein können, ohne dabei Kompromisse bei der Qualität einzugehen. Darüber hinaus wurde die Bedeutsamkeit einer abgestimmten Faseranzahl pro Flächeneinheit erörtert sowie die richtige Wahl des Harzes und dessen Viskosität, um Infiltrationseffekte zu optimieren und Luftblasenbildung zu verhindern.

Die vorliegende Arbeit leistet einen Beitrag zum aktuellen Forschungsstand, indem sie aufzeigt, dass eine detailgenaue Steuerung der Prozessparameter innerhalb des TFP-Verfahrens direkt die Drapierfähigkeit und somit auch die mechanischen Eigenschaften der CFK-Bauteile beeinflusst. Diese Erkenntnisse unterstützen nicht nur eine Steigerung der Effizienz in produktionstechnischer Hinsicht, sondern tragen auch dazu bei, qualitative Aspekte wie Materialhomogenität und strukturelle Integrität zu verbessern. Weiterhin wird deutlich gemacht, dass computergestützte Simulationstools essentiell für den Innovationsfortschritt innerhalb dieses Bereichs sind.

Obwohl in dieser Studie bedeutende Fortschritte erzielt wurden, gibt es noch zahlreiche Bereiche innerhalb des TFP-Prozesses, die weitaus tiefergehend erforscht werden müssen. Zukünftige Studien sollten sich insbesondere mit dem Einfluss unterschiedlicher thermoplastischer Harzmischungen auseinandersetzen sowie deren Auswirkungen auf das endgültige Produktdesign im Hinblick auf thermische Expansion und Schrumpfverhalten bewerten. Zusätzlich könnte weiterführende Forschung innovative Ansätze zur Integration von Sensortechnologie erforschen, um Echtzeitkorrekturen während der Produktion zu ermöglichen.

Abschließend schließt sich ausgehend von meinen Industrieerfahrungen im Leichtbau und dem persönlichen Interesse an innovativen Herstellungsprozessen ein Kreis durch diese wissenschaftliche Arbeit: Die technologischen Potenziale des TFP-Verfahrens konnten erfolgreich herausgearbeitet werden und bieten vielfältige Ansatzpunkte für Innovationen in der modernen Materialwissenschaft sowie im Maschinenbau. Es ist evident geworden, dass durch kontinuierliche Forschung und Entwicklung sowie durch den Einsatz geeigneter Technologien erhebliche Verbesserungen in Bezug auf Energieeffizienz und materialwissenschaftliche Leistungsfähigkeit erreicht werden können – dies stets mit einem Blick in Richtung Zukunft für nachhaltige und ressourcenschonende Produktionstechniken im globalen Wettbewerbsumfeld der Leichtbauindustrie.

 StudyTexter.de

Literaturverzeichnis

Breuer, U. P. (1998). Reinforcement of CFRP structures by tailored fibre placement. *Polymers and Polymer Composites*, 6(8), 499-504.

Crothers, P. J., Drechsler, K., Feltin, D., Herszberg, I., & Kruckenberg, T. (1997). Tailored fibre placement to minimise stress concentrations. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 28(7), 619-625.

Gliesche, K., Hübner, T., & Orawetz, H. (2003). Application of the tailored fibre placement (TFP) process for a local reinforcement on an "open-hole" tension plate from carbon/epoxy laminates. *Composites Science and Technology*, 63(1), 81-88.

Kim, B. C., Hazra, K., Weaver, P., & Potter, K. (2011, August). Limitations of fibre placement techniques for variable angle tow composites and their process-induced defects. In *Proceedings of the 18th International Conference on Composite Materials (ICCM18)*, Jeju, Korea, 21-26.

Mattheij, P., Gliesche, K., & Feltin, D. (1998). Tailored fiber placement-mechanical properties and applications. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 17(9), 774-786.

Mattheij, P., Gliesche, K., & Feltin, D. (2000). 3D reinforced stitched carbon/epoxy laminates made by tailored fibre placement. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 31(6), 571-581.

Nägele, J., Graf, J., & Reinhart, G. (2015). Bewertung von Prozessketten der thermoplastischen CFK-Fertigung. *Lightweight Design*, 8(6), 50-55.

Spickenheuer, A., Leipprand, A., Bittrich, L., Uhlig, K., Richter, E., & Heinrich, G. (2014, Juni). Process-dependent material properties for structural simulation of composites made by tailored fibre placement. In *Proceedings of the ECCM16-16th European Conference on Composite Materials*, Sevilla, Spanien, 22-26 Juni. 1-8.

Spickenheuer, A., Schulz, M., Gliesche, K., & Heinrich, G. (2008). Using tailored fibre placement technology for stress adapted design of composite structures. *Plastics, Rubber and Composites*, 37(5), 227-232.

Temmen, H., Degenhardt, R., & Raible, T. (2006). Tailored fibre placement optimization tool.

Uhlig, K. (2018). Beitrag zur Anwendung der Tailored Fiber Placement Technologie am Beispiel von Rotoren aus kohlenstofffaserverstärktem Epoxidharz für den Einsatz in Turbomolekularpumpen.

Wright, T., Bechtold, T., Bernhard, A., Manian, A. P., & Scheiderbauer, M. (2019). Tailored fibre placement of carbon fibre rovings for reinforced polypropylene composite part 1: PP infusion of carbon reinforcement. *Composites Part B: Engineering*, 162, 703-711.

Zhang, L., Wang, X., Pei, J., & Zhou, Y. (2020). Review of automated fibre placement and its prospects for advanced composites. *Journal of Materials Science*, 55(17), 7121-7155.



Plagiatserklärung

Ich versichere, dass ich diese Arbeit selbständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.

Alle Stellen, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen sind, habe ich in jedem einzelnen Fall unter genauer Angabe der Quelle (einschließlich des World Wide Web sowie anderer elektronischer Datensammlungen) deutlich als Entlehnung kenntlich gemacht. Dies gilt auch für angefügte Zeichnungen, bildliche Darstellungen, Skizzen und dergleichen.

Die vorliegende Arbeit wurde hinsichtlich Titel, Fragestellung, Aufbau und Inhalt, oder in umfangreichen Teilen und Auszügen daraus, noch nicht in einem Studiengang an dieser, oder einer anderen Hochschule, zur Anrechnung von Leistungspunkten vorgelegt.

Ich nehme zur Kenntnis, dass die nachgewiesene Unterlassung der Herkunftsangabe als versuchte Täuschung bzw. als Plagiat gewertet wird.

XXXX, den XX.XX.XXX