



**Drapiereigenschaften von
thermoplastischen CFK Elementen die
im TFP-Verfahren hergestellt wurden**

Maschinenbau

Abgabe: [XX.XX.XXXX]

Inhaltsübersicht

1. Einleitung.....	1
2. Grundlagen des TFP-Verfahrens.....	2
2.1 Materialien und Verbundwerkstoffe.....	2
2.2 Prozessparameter und deren Einfluss.....	4
3. Drapiereigenschaften und mechanische Leistungsfähigkeit.	6
3.1 Bewertung der Drapiereigenschaften.....	6
3.2 Korrelation mit mechanischer Performance.....	8
4. Optimierung von Fertigungsprozessen.....	9
4.1 Anwendungserkenntnisse für Leichtbau.....	10
4.2 Fallbeispiele und Studienergebnisse.....	12
5. Fazit.....	14
Literaturverzeichnis.....	16
Plagiatserklärung.....	18

1. Einleitung

Leben wir in einer Ära, in der Innovation und technischer Fortschritt die Grenzen des Möglichen immer weiter verschieben? Im Bereich des Maschinenbaus und insbesondere im Sektor der Verbundwerkstoffe zeigt sich diese Dynamik in der stetigen Suche nach neuen Wegen zur Reduktion von Gewicht, ohne dabei Kompromisse hinsichtlich Performance und Nachhaltigkeit einzugehen. Speziell carbonfaserverstärkte thermoplastische Verbundwerkstoffe spielen in diesem Streben eine Schlüsselrolle. Sie versprechen nicht nur eine deutliche Gewichtseinsparung, sondern auch eine hohe mechanische Leistungsfähigkeit und eröffnen somit innovative Möglichkeiten im Leichtbau.

Vor diesem Hintergrund widmet sich die vorliegende Arbeit dem Tailored Fibre Placement (TFP)-Verfahren, einer Methode, die eine präzise Positionierung der Carbonfasern ermöglicht und damit gezielte Verstärkungen in Faserverbundbauteilen schafft. Dieses Verfahren steht exemplarisch für die fortschrittliche Verarbeitung von Verbundwerkstoffen, wobei insbesondere die Interaktion von Prozessparametern und ihren Auswirkungen auf die Drapiereigenschaften im Zentrum der Betrachtungen steht.

Das primäre Ziel dieser Arbeit ist es, ein tiefgreifendes Verständnis für die Beziehung zwischen den Prozessvariablen des TFP-Verfahrens und den mechanischen sowie drapiertechnischen Eigenschaften der hergestellten Verbundwerkstoffe zu entwickeln. Mit dieser Analyse strebt die Arbeit an, einen substantiellen Beitrag zur Redefinition und Verfeinerung von Herstellungsprozessen zu leisten und dadurch die Grundlagen für verbesserte Leichtbauanwendungen zu legen.

Zur Beantwortung der Forschungsfrage "Wie beeinflussen verschiedene Prozessparameter des Tailored Fibre Placement-Verfahrens die Drapiereigenschaften und mechanische Leistungsfähigkeit von carbonfaserverstärkten thermoplastischen Verbundwerkstoffen und wie können diese Erkenntnisse zur Optimierung von Fertigungsprozessen und Leichtbauanwendungen beitragen?" wird eine systematische Vorgehensweise gewählt. Diese beinhaltet eine umfangreiche Literaturrecherche sowie die Evaluierung und Synthese relevanter Studienergebnisse.

Der Aufbau der Arbeit orientiert sich an einer logischen Abfolge, die zunächst die Grundlagen des TFP-Verfahrens erläutert, im Anschluss die Drapiereigenschaften und mechanische Leistungsfähigkeit beleuchtet und abschließend die Optimierung von

Fertigungsprozessen diskutiert. Um ein aktuelles Bild des Forschungsstandes zu erhalten, werden dabei vorrangig aktuelle Publikationen herangezogen, um die Relevanz der Arbeit und ihrer Ergebnisse zu untermauern.

Indem die vorliegende Arbeit einen differenzierten Blick auf die Wechselwirkungen zwischen Fertigungsprozessen und Materialkomposition wirft, leistet sie einen wichtigen Beitrag zur weiterführenden Forschung und zur Anwendung von TFP-Technologien in der Praxis. Sie zeigt nicht nur die Komplexität der Materialeigenschaften und Fertigungstechniken auf, sondern eröffnet auch Perspektiven für die Weiterentwicklung von Leichtbaukonzepten, die in der heutigen ressourcenbewussten und umweltorientierten Industrielandschaft unverzichtbar sind.

2. Grundlagen des TFP-Verfahrens

Im Kontext der Optimierung von carbonfaserverstärkten thermoplastischen Verbundwerkstoffen für Leichtbauanwendungen richtet sich der Blick auf das Tailored Fibre Placement (TFP)-Verfahren, dessen Verständnis grundlegend für eine gezielte Material- und Prozessentwicklung ist. Dieses Kapitel widmet sich den essentiellen Grundlagen des TFP-Verfahrens und beleuchtet zentrale Aspekte wie die Auslegung der thermoplastischen Matrices, die Faser-Matrix-Haftung, die Charakteristika und Auswahl der Carbonfasern sowie die Interdependenz von Materialeigenschaften und Bauteildesign. Durch diese Betrachtungen wird die Basis für ein umfassendes Verständnis der Material- und Verfahrensparameter geschaffen, die entscheidenden Einfluss auf die Drapiereigenschaften und die mechanische Leistungsfähigkeit der Verbundwerkstoffe nehmen. Die Erörterung dieser grundlegenden Themen bildet einen integralen Bestandteil dieser wissenschaftlichen Arbeit und leitet über zu den spezifischen Prozessparametern, die für eine effektive Optimierung des TFP-Verfahrens von hoher Relevanz sind.

2.1 Materialien und Verbundwerkstoffe

In der Betrachtung thermoplastischer Matrices rücken diverse Kunststoffe ins Blickfeld, die für die Verstärkung mit Carbonfasern in Frage kommen. Polyetheretherketon (PEEK) zeichnet sich dabei durch eine herausragende Kombination von Eigenschaften aus, die es für Hochleistungsanwendungen prädestinieren. Die Verarbeitbarkeit und die Performance des finalen Verbundwerkstoffes werden maßgeblich von der Wahl des Thermoplasts

beeinflusst. Insbesondere die Verarbeitungstemperaturen von PEEK eröffnen Möglichkeiten zur Optimierung der Prozesssicherheit und Energieeffizienz. Die chemische Resistenz von PEEK übertrifft die vieler anderer Thermoplaste, was die langfristige Stabilität von CFK-Bauteilen unterstreicht (vgl. Bostan und Schiebel, 2014). Darüber hinaus ist die Schmelzviskosität von zentraler Bedeutung für die Durchtränkung der Faser-Preforms und beeinflusst damit direkt die resultierenden mechanischen Eigenschaften des Verbundes. Nicht außer Acht zu lassen ist die Recyclierbarkeit thermoplastischer Matrices, die zur Nachhaltigkeit von CFK-Strukturen beiträgt und in umweltzentrierten Industriezweigen von hoher Relevanz ist.

Die Faser-Matrix-Haftung ist ein kritischer Faktor für die Übertragung von Lasten innerhalb des Verbundwerkstoffes und somit entscheidend für seine mechanische Belastbarkeit. Die Haftung zwischen Carbonfasern und Thermoplasten determiniert Festigkeiten und das Bruchverhalten des Materials. Oberflächenbehandlungsmethoden von Carbonfasern können die Adhäsion verbessern und resultieren in erhöhten Zug- und Biegefestigkeiten. Des Weiteren eröffnet die Mikrofibrillenbildung Potenziale für die Energiedissipation bei mechanischer Belastung. Das Ermüdungsverhalten, ein wichtiger Aspekt für Anwendungen mit zyklischen Lasten, und die Interlaminar-Scherfestigkeit werden ebenfalls durch die Faser-Matrix-Haftung beeinflusst, eine Thematik, die in der Forschung weiterhin Beachtung finden muss (vgl. El-Dessouky et al., 2019).

Auch die Auswahl und Einsatzfähigkeit der Carbonfasern sind relevant für das TFP-Verfahren. Gefordert sind spezielle Eigenschaften, die eine optimale Drapierbarkeit und Integration in das thermoplastische Matrixsystem gewährleisten. Es besteht ein Bedarf an Vergleichsstudien zwischen verschiedenen Carbonfaserarten, um die Eignung für das TFP-Verfahren fundiert zu bewerten. Die Oberflächenmodifikation durch Sizing und der Einfluss von Faserlänge sowie Faservolumengehalt auf die mechanische Integrität und Dichte sind hierbei Kernpunkte der Analyse. Hybride Garnsysteme könnten einen innovativen Weg darstellen, um die mechanische Festigkeit und die Drapierbarkeit in Balance zu bringen und die Eigenschaften der Verbundwerkstoffe gezielt zu steuern (vgl. Koch, 2020).

Abschließend gilt es, die Materialeigenschaften in Bezug auf die Bauteildesignoptimierung zu erörtern. Die Interdependenz zwischen Material und Bauteilgeometrie ist von zentraler Bedeutung für eine effiziente Auslegung von TFP gefertigten Strukturen. Materialeigenschaften wie Wandstärke und Faservolumenanteil müssen in der Designphase berücksichtigt werden, um das Potential thermoplastischer Verbundwerkstoffe voll

ausschöpfen zu können. Simulationsverfahren können hier zur Vorhersage des mechanischen Verhaltens beitragen und sollten in Kombination mit experimentellen Methoden verwendet werden, um die Zuverlässigkeit der Simulationsergebnisse zu gewährleisten (vgl. Fischer et al., 2017).

Mit der Diskussion über die Wahl der Materialien und die Gestaltung von Verbundwerkstoffen im Rahmen des TFP-Verfahrens, wurde ein fundiertes Verständnis geschaffen, das für die anschließende Betrachtung spezifischer Prozessparameter und deren Einfluss unerlässlich ist.

2.2 Prozessparameter und deren Einfluss

Die Stickdichte nimmt eine zentrale Rolle bei der Bestimmung mechanischer Eigenschaften und Drapiereigenschaften thermoplastischer CFK ein. Die Forschung hebt hervor, dass eine Erhöhung der Stickdichte mit einer Verstärkung der Biegesteifigkeit von TFP-Preforms korreliert (vgl. Nezami, 2015). Indessen wirkt sich eine zu hohe Stickdichte potenziell nachteilig auf die Flexibilität und Schlagzähigkeit des Materials aus. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass mit der Erhöhung der Stickdichte auch die Wahrscheinlichkeit von Materialversprödungen steigt, was die Gefahr eines spröden Bruchs unter Schlagbelastung erhöht. Die Konfiguration einer variablen Stickdichte bietet darüber hinaus die Möglichkeit, spezifische Bereiche eines Bauteils mit differenzierten mechanischen Eigenschaften zu versehen und somit eine Funktionsintegration zu erreichen. Hier offenbart sich der Bedarf an einer ausgeklügelten Balance zwischen ausreichender Steifigkeit und der Bewahrung einer guten Energieabsorptionseigenschaft, um das volle Leistungsspektrum der Verbundwerkstoffe zu nutzen.

Die Geschwindigkeit der Faserablage steht in direktem Zusammenhang mit der Konsolidierungsqualität und den interlaminaren Scherfestigkeiten (vgl. Janssen, 2020). Eine zu hohe Ablagegeschwindigkeit kann zu unzureichender Konsolidierung führen und somit die Scherfestigkeiten mindern, während eine zu niedrige Geschwindigkeit den Produktionsprozess ineffizient gestaltet. Die Temperaturführung spielt hierbei eine wichtige Rolle; sie muss adäquat auf die Ablagegeschwindigkeit abgestimmt sein, um Delaminationen zu verhindern und eine gleichbleibend hohe Qualität zu gewährleisten. Studien zeigen zudem, dass eine optimierte Ablagegeschwindigkeit das Ermüdungsverhalten der Verbundwerkstoffe positiv beeinflussen kann, was für langfristige Belastungen in der Luftfahrt und Automobilindustrie von essentieller Bedeutung ist.

Die Thermofixierungstemperatur wirkt sich signifikant auf die Kristallinität der thermoplastischen Matrix und somit auf die mechanischen Charakteristika des resultierenden Verbundwerkstoffs aus. Eine angemessene Temperatur während der Thermofixierung verhindert interne Spannungen und Schrumpfungen, welche die Maßhaltigkeit und strukturelle Integrität des Bauteils kompromittieren könnten (vgl. Bostan und Schiebel, 2014). Zudem spielt die Thermofixierungstemperatur bei der dynamischen Belastung eine Rolle, da sie die Langzeitbeständigkeit der Verbundstrukturen beeinflusst. Die Kontrolle dieser Prozesstemperaturen ist daher entscheidend für die Produktion von TFP-Verbundwerkstoffen mit konsistent hoher Qualität.

Mit dem Einzug der Cobots in die Produktionsumgebung ergeben sich neue Möglichkeiten zur Steigerung der Prozessgenauigkeit und Qualitätssicherung im TFP-Verfahren. Sie ermöglichen die präzise Steuerung der Prozessparameter und können durch ihre Echtzeit-Überwachungsfähigkeiten zur Reduzierung von Ausschuss und zur Erhöhung der Prozesseffizienz beitragen (vgl. Fischer et al., 2017). Die Integration von Sensoren ermöglicht es, Verarbeitungsfehler frühzeitig zu erkennen und adaptiv auf Material- und Umgebungsbedingungen zu reagieren. Diese Technologien bieten das Potential, die Zuverlässigkeit und Konsistenz von TFP-Produkten weiter zu erhöhen und den Prozess schließlich auch für komplexere und qualitativ höherwertige Anwendungen zu qualifizieren.

Die Garnspannung spielt bei der Steuerung der Preformqualität eine nicht zu unterschätzende Rolle. Sie beeinflusst direkt die Faserwellung sowie die Homogenität der Preforms und damit verbunden auch die Drapierbarkeit. Zu hohe Spannungen können zu On-Wave- und In-Plane-Distortions führen, welche die mechanische Performance der Verbundwerkstoffe negativ beeinflussen (vgl. Passauer, 2015). Es bedarf daher einer sorgfältigen Abstimmung der Garnspannung, um eine optimale Faseranordnung und somit eine maximale Durchtränkung und Haftung während der Konsolidierung zu gewährleisten. Die Herausforderung besteht darin, diese Spannungskontrolle dynamisch an die verschiedenen Bauteilgeometrien anzupassen, um die mechanischen Eigenschaften des finalen Bauteils zu verbessern.

3. Drapiereigenschaften und mechanische Leistungsfähigkeit

Die Drapiereigenschaften und die mechanische Leistungsfähigkeit von carbonfaserverstärkten Thermoplasten sind entscheidende Charakteristika für die adäquate Umsetzung komplexer Bauteilgeometrien sowie für die strukturelle Integrität und Performance der daraus resultierenden Produkte. Dieses Kapitel widmet sich der detaillierten Untersuchung dieser Eigenschaften, die im Kontext des Tailored Fibre Placement-Verfahrens von fundamentaler Bedeutung sind. Es werden die Zusammenhänge zwischen der Anordnung der Fasern, der Prozessparameter und der resultierenden Drapierbarkeit und mechanischen Festigkeit beleuchtet. Ferner wird der Einfluss von Prozessbedingungen auf das Verhalten der Thermoplaste näher betrachtet, um eine optimale Bauteilqualität zu gewährleisten. Überdies adressiert das Kapitel die Wechselwirkungen zwischen Drapiereigenschaften, interlaminarer Scherfestigkeit und Energieabsorptionsvermögen. Diese Analyse liefert Erkenntnisse darüber, wie die TFP-Technologie zielgerichtet für die Produktion von Leichtbauelementen mit geforderten mechanischen Eigenschaften eingesetzt werden kann.

3.1 Bewertung der Drapiereigenschaften

Die Drapiereigenschaften von carbonfaserverstärkten Thermoplasten sind eine entscheidende Komponente bei der Herstellung komplexer Bauteilgeometrien. Sie bestimmen maßgeblich die finale Bauteilqualität und damit die strukturelle Integrität sowie die Performance der daraus gefertigten Produkte. Eine Quantifizierung der Drapierbarkeit ermöglicht es, die Anpassungsfähigkeit dieser Werkstoffe an die Form von Werkzeugen präzise zu bestimmen. Hierbei spielen Faserorientierung und Bindungsmuster eine zentrale Rolle. Standardisierte Drapiertests, wie sie unter anderem von Härtel (2007) beschrieben werden, sind essenziell für eine objektive Bewertung der Drapierfähigkeit und der Identifikation kritischer Winkel, die eine optimale Formanpassungsfähigkeit ermöglichen. Die Faltenbildung muss hierbei besondere Beachtung finden, da sie die mechanischen Eigenschaften der gefertigten Bauteile negativ beeinträchtigen kann. Daher ist es von Bedeutung, nicht nur die Faserorientierung zu optimieren, sondern auch Bindungsmuster zu wählen, die sowohl die Drapierbarkeit als auch die mechanische Endverstärkungseffekte verbessern.

In der weiterführenden Analyse stellt sich die Frage nach dem Verhalten unterschiedlicher Thermoplaste unter variierenden Prozessbedingungen. Ein Vergleich von PEEK- und PP-basierten Preforms, wie er von Wright et al. (2019) thematisiert wurde, kann aufschlussreich sein, um Unterschiede in der Elastizität und Biegesteifigkeit, sowie in der Rückstellkraft nach dem Drapieren zu erfassen. Dies ist relevant, um kritische Temperaturbereiche für die Thermofixierung zu identifizieren, die eine ideale Anpassungsfähigkeit garantieren ohne die Materialintegrität negativ zu beeinflussen.

Ein weiterer Aspekt, der die Endqualität der drapierten Preforms beeinflusst, ist deren Konfiguration. Die Anordnung der Fasern bestimmt maßgeblich, wie gut sich das Material an vorgegebene Konturen anpassen kann, ohne Spannungsspitzen und somit potentielle Schwachstellen in den Bauteilen zu verursachen. Die Herausforderungen und Möglichkeiten, die sich aus der Interaktion von Faserwinkel und -abstand ergeben, sind durch sorgfältige Analyse und experimentelle Überprüfung anzugehen, um praxisnahe Empfehlungen für die Konstruktion und Herstellung von TFP-Verstärkungen zu liefern.

Die thermische Prozessführung ist ein weiterer wesentlicher Punkt, der Einfluss auf das Drape-Verhalten von TFP-Materialien nimmt. Lahr (2007) illustriert den Einfluss von Thermofixierungstemperaturen auf das Schrumpfverhalten und demzufolge auf die Anpassungsfähigkeit der Preforms. Eine sorgfältige Bewertung verschiedener Temperaturführungen ist notwendig, um eine Homogenität der Preforms ohne Materialverzug und -schädigung sicherzustellen. Empfehlungen für eine optimierte Temperaturführung sind auszuarbeiten, die eine gleichmäßige Drapierbarkeit gewährleisten, ohne die mechanischen Eigenschaften zu kompromittieren.

Die Stickdichte im TFP-Verfahren korreliert direkt mit der Flexibilität der Preforms. Die Auswirkungen von unterschiedlichen Stickdichten auf die mechanischen Eigenschaften wie Biege- und Zugsteifigkeit sind zu untersuchen und in Bezug auf die Drapierbarkeit zu bewerten. Nezami (2015) betont, dass die Stickdichte auch die Neigung zur Faltenbildung beeinflusst. Das Entwickeln von optimierten Stickdichte-Strategien für spezifische Anwendungen unter Berücksichtigung der Drapierbarkeit ist daher unerlässlich, um eine bestmögliche Bauteilqualität sicherzustellen.

Insgesamt zeigt sich, dass eine detaillierte Untersuchung der Drapiereigenschaften von TFP-verstärkten Thermoplasten für die effiziente und qualitativ hochwertige Bauteilproduktion essentiell ist. Nur durch das Verständnis der zugrundeliegenden

Mechanismen und Interaktionen innerhalb des Materials können Prozesse optimiert und innovative Anwendungen realisiert werden.

3.2 Korrelation mit mechanischer Performance

Die Drapiereigenschaften eines Verbundwerkstoffes stehen in enger Wechselwirkung mit seinen interlaminaren Scherfestigkeiten, was sich insbesondere in der Prävalenz von Faltenbildungen manifestiert. Suboptimale Drapiereigenschaften können Falten verursachen, die die interlaminare Scherfestigkeit und damit die Belastbarkeit des Werkstoffs beeinträchtigen. Basierend auf den Forschungsergebnissen von El-Dessouky et al. (2019) und Wright et al. (2019) wird der Einfluss von Falten auf die interlaminare Scherfestigkeit als reduzierend auf die Belastbarkeit von TFP-verstärkten Thermoplasten dargestellt. Es erscheint unerlässlich, die Mechanismen der Faltenbildung zu verstehen und Strategien zu entwickeln, welche die Entstehung dieser Defekte minimieren. Hierzu sind die Ergebnisse von Fallstudien einzubeziehen, die die Korrelation zwischen Faltenbildung und abnehmender interlaminarer Scherfestigkeit dokumentieren und Wege zur Minderung dieser Schwachstellen aufzeigen.

Die Stickdichte übt ebenfalls einen maßgeblichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften von TFP-Verbundwerkstoffen aus, speziell auf deren Schlagzähigkeit und Dämpfungseigenschaften. Unterschiedliche Stickdichten können divergierende Auswirkungen auf das Energieabsorptionsvermögen und die Dämpfungsfähigkeit haben, was besonders in der Automobil- und Luftfahrtindustrie von Bedeutung ist. Die Arbeiten von Härtel (2007) und Passauer (2015) bieten wichtige Einblicke in die Beeinflussung der Schlagzähigkeit durch modifizierte Stickdichten. Um optimale Einsatzbedingungen zu ermitteln, sind vergleichende Studien unabdingbar, die die Schlagzähigkeit bei verschiedenen Stickdichten quantifizieren und somit eine solide Basis für die Auslegung von crashrelevanten Bauteilen liefern.

Des Weiteren ist die gezielte Faserorientierung im TFP-Prozess ein entscheidender Faktor für die Zug-Druck-Festigkeit der Verbundwerkstoffe. Hierbei bedarf es einer Verknüpfung zwischen der bewussten Ausrichtung der Fasern und den Festigkeitseigenschaften, wie sie beispielsweise Koch (2020) in seinem Eigenschaftsprofil von Carbonfasergelegen thematisiert. Die Ermittlung der optimalen Faserorientierung ist anhand von Zug-Druck-Tests zu validieren, um das mechanische Verhalten entsprechend der anisotropen Eigenschaften zu verstehen und die Materialauslegung für spezifische Anforderungen zu optimieren.

Zudem sollten numerische Simulationsmodelle genutzt werden, um die Validität von experimentellen Daten zu überprüfen und daraus Strategien für die Materialgestaltung zu entwickeln.

Eine gezielte Temperaturführung während des TFP-Prozesses ist ein Schlüsselfaktor für die Vermeidung von Delaminationen. Die Arbeiten von Lahr (2007) und Bostan und Schiebel (2014) stellen die Auswirkung der Temperatur auf die Langzeitbeständigkeit und die Vermeidung von Delaminationen dar. In diesem Zusammenhang ist eine sorgfältige Analyse erforderlich, um die optimalen Prozesstemperaturen zu definieren und eine konsistente Qualität der TFP-Verbundwerkstoffe sicherzustellen. Thermografische Analysen können dabei helfen, die thermische Verteilung während des Fertigungsprozesses zu visualisieren und mögliche Risikobereiche für Delamination frühzeitig zu identifizieren.

Schließlich rücken materialintegrierte Sensoren ins Zentrum des Interesses, wenn es um die Vorhersage der mechanischen Leistungsfähigkeit von TFP-Verbundwerkstoffen geht. Moderne Ansätze, wie sie von Fischer et al. (2017) und Janssen (2020) beschrieben werden, zeigen das Potenzial von Sensoren zur Bewertung der Struktureigenschaften in Echtzeit. Die Integration von Fasersensoren in TFP-Preforms kann einen erheblichen Mehrwert für die kontinuierliche Überwachung von Dehnungen und Spannungen bieten und so zur Früherkennung von Materialschäden beitragen. Für die Verlässlichkeit solcher Sensornetzwerke ist es von Bedeutung, die Korrelation zwischen Sensordaten und mechanischer Belastbarkeit anhand von Standardtests zu bestätigen und entsprechende Einsatzfelder sowie Optimierungsmöglichkeiten zu identifizieren.

Die vorangegangenen Analysen bestärken das Verständnis für die komplexen Wechselbeziehungen zwischen den Drapiereigenschaften und der mechanischen Performance von carbonfaserverstärkten Thermoplasten im Kontext des TFP-Verfahrens. Sie sind grundlegend für die weitere Optimierung von Fertigungsverfahren und die Erweiterung des Anwendungsspektrums dieser innovativen Werkstoffklasse.

4. Optimierung von Fertigungsprozessen

Die vorangegangenen Kapitel der vorliegenden Arbeit haben ein umfassendes Verständnis für die Drapiereigenschaften und mechanische Leistungsfähigkeit von carbonfaserverstärkten Thermoplasten im Rahmen des Tailored Fibre Placement (TFP)-Verfahrens geschaffen. Basierend auf diesen Erkenntnissen widmet sich das aktive

Kapitel der Optimierung von Fertigungsprozessen. Im Zentrum steht die Überführung der gewonnenen wissenschaftlichen Einblicke in praktisch anwendbare Verfahrensweisen, die zur Effizienzsteigerung und Kostenreduktion beitragen. Untersucht wird die Anpassung von TFP-Technologien in etablierten Industriezweigen, wie der Automobilindustrie und der Luft- und Raumfahrt, sowie ihr Potenzial in neuen Anwendungsfeldern, beispielsweise im Sportgerätesektor. Des Weiteren ist die Nachhaltigkeit von TFP-Strukturen in Betracht zu ziehen, insbesondere unter Aspekten des Life-Cycle-Managements und der Kreislaufwirtschaft. Ein weiterer Fokus liegt auf der Erforschung der Automatisierungsmöglichkeiten im TFP-Fertigungsprozess, um Großserienproduktionen hinsichtlich der Produktionsgeschwindigkeit und Kosteneffizienz zu optimieren. Somit bietet dieses Kapitel einen kritischen Ausblick auf die zukünftigen Möglichkeiten, mit denen die innovative TFP-Technologie die Herstellung von Leichtbaukomponenten revolutionieren und somit einen entscheidenden Beitrag zur Ressourcenschonung und zur ökologischen Nachhaltigkeit leisten kann.

4.1 Anwendungserkenntnisse für Leichtbau

Die konsequente Verbesserung der Energieeffizienz stellt einen Kernaspekt in der Automobilindustrie dar. Hierbei spielt die Gewichtsreduzierung durch den Einsatz innovativer Materialien und Fertigungsmethoden eine zentrale Rolle. Tailored Fibre Placement (TFP)-Technologien haben das Potenzial, durch die Integration von thermoplastischen CFK-Elementen eine signifikante Reduktion des Fahrzeuggewichts zu erzielen und dadurch einen entscheidenden Beitrag zur Steigerung der Effizienz zu leisten. Die Übertragung von Forschungsergebnissen auf die Produktion von Automobilkomponenten zeigt, dass durch den gezielten Einsatz von verstärkten Thermoplasten strukturelle Elemente, wie Unterbodenstrukturen oder Sitzrahmen, nicht nur leichter, sondern auch kosten- und energieeffizient hergestellt werden können. Dabei ist zu beachten, dass die Implementierung von TFP-Prozessen in bestehende Produktionslinien Herausforderungen mit sich bringt, etwa bei der Anpassung von Prozessketten oder der Schulung des Personals (vgl. Fischer et al., 2017). Die Kosteneffizienz dieser Technologie im Vergleich zu herkömmlichen Konstruktionen sollte unter Berücksichtigung von Materialverbrauch und Automatisierungsgrad eruiert werden, um langfristig wettbewerbsfähig zu bleiben (vgl. Janssen, 2020). Aus Sicht der Fahrzeugperformance lassen sich durch die Gewichtseinsparung Vorteile in der Fahrdynamik und Kraftstoffeffizienz erwarten.

Im Luft- und Raumfahrtsektor stellt sich die Frage nach den spezifischen Anforderungen, die an Leichtbaustrukturen gestellt werden. Hierbei ist der Einsatz von TFP-Technologien aufgrund ihrer hohen Anpassungsfähigkeit und Effizienz besonders interessant. Der Einsatz von TFP-verstärkten Thermoplasten in Luftfahrzeugkonstruktionen, wie Flügelrippen oder Rumpfsegmenten, verspricht Treibstoffeinsparungen und eine Reduktion der CO₂-Emissionen. Innovative Konstruktionen für den Raumfahrtsektor, beispielsweise bei Satellitenschalen oder Trägerraketenelementen, lassen sich dank der Flexibilität des TFP-Verfahrens realisieren, wodurch technologische Vorteile generiert werden können (vgl. Spitzer et al., 2021). Die Langzeitbeständigkeit und Wartungsfreundlichkeit dieser Materialien in einem so anspruchsvollen Umfeld sind von besonderer Bedeutung und müssen im Vergleich mit konventionellen Verbundwerkstoffen hinsichtlich Eignung für Cleanroom-Bedingungen und Qualitätssicherung bewertet werden.

Die Effizienzsteigerung im Sportgerätesektor durch optimierte Materialauswahl und Design zeigt sich beispielsweise in der Anwendung von Hochleistungssportgeräten, wo TFP-verstärkte Bauteile zu einer verbesserten Performance führen. Dieses Phänomen wird durch Innovationen wie BiKo-PEEK Tow Placement untermauert, das eine gezielte Anpassung der Materialien an verschiedene sportliche Anforderungen ermöglicht (vgl. Bostan und Schiebel, 2014). Eine sorgfältige Diskussion der funktionalen Vorteile, wie Flexibilität und Stoßfestigkeit, ist vonnöten, insbesondere im Radsport oder bei Wintersportausrüstungen. Gleichzeitig ist der Einfluss von TFP-Technologien auf die Personalisierung und die Ansprache von zielgerichteten Nutzergruppen zu untersuchen. Darüber hinaus sind Vergleiche zur Langlebigkeit und Robustheit von TFP-basierten Sportgeräten notwendig, um den Mehrwert gegenüber traditionellen Verbundmaterialien hervorzuheben.

Nicht weniger wichtig ist es, im Kontext des Leichtbaus die Sustainability zu bewerten. Die Integration von TFP-Strukturen muss unter Berücksichtigung von Umweltaspekten, Life-Cycle-Analysen und Recyclingkonzepten erfolgen, um die nachhaltige Nutzung von carbonfaserverstärkten Verbundwerkstoffen zu gewährleisten. Die Aufstellung von Life-Cycle-Assessment-Studien ist notwendig, um den ökologischen Fußabdruck transparent zu machen, während die Herausforderungen und Chancen des Recyclings, unter Einbeziehung der Trennung von Fasern und Matrix, kritisch zu bewerten sind. Design-for-Disassembly-Konzepte tragen dazu bei, eine umweltschonende Demontage am Ende des Lebenszyklus sicherzustellen und sollten in Vergleich zu anderen Leichtbaumaterialien hinsichtlich umweltpolitischer Vorgaben untersucht werden (vgl. Heinrich, 2020).

Die Automatisierung von TFP-Fertigungsprozessen bietet die Möglichkeit zur Kostensenkung und Effizienzsteigerung in der Großserienproduktion. Durch die Verringerung von Material- und Personalkosten sowie die Erhöhung der Produktionsgeschwindigkeit lässt sich das Kostensenkungspotenzial dieser Technologie umfassend nutzen. Eine systematische Bewertung der Kosteneinsparungen und Flexibilität der Produktionsplanung ist vonnöten und sollte die Schnelligkeit der Umsetzung von kundenspezifischen Anforderungen berücksichtigen (vgl. Koch, 2020; Härtel, 2007).

Somit stellt die Nutzung von Tailored Fibre Placement-Technologien einen zukunftssträchtigen und flexiblen Ansatz dar, der in verschiedenen Industrien zur Gewichtsreduktion und Effizienzsteigerung führen kann. Die spezifischen Potenziale und Herausforderungen in der Automobilindustrie, Luft- und Raumfahrt, im Sportgerätesektor sowie unter Nachhaltigkeitsaspekten müssen weiter untersucht und optimiert werden, um die Vorteile dieser innovativen Materialklasse voll ausschöpfen zu können.

4.2 Fallbeispiele und Studienergebnisse

Die Leichtbauweise ist nicht nur ein Konzept der Ingenieurwissenschaften, sondern auch ein bedeutender Faktor im Hochleistungssport, insbesondere im Radsport. Hierbei spielt das Verhältnis von Gewicht zu Stabilität eine essentielle Rolle für die Performance. Der Einsatz von TFP-verstärkten Thermoplasten bietet eine signifikante Gewichtsreduktion bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung oder sogar Verbesserung der strukturellen Integrität (vgl. Spitzer et al., 2021). Untersuchungen belegen, dass TFP-verstärkte Elemente aufgrund ihrer präzisen Faserplatzierung und geringen Masse zu einer messbaren Verbesserung der Beschleunigung und Aerodynamik von Wettkampfrädern führen. In einer Fallstudie zeigte sich, dass durch die Verwendung dieser Leichtbaukomponenten, Fahrer*innen bei äquivalenter Kraftaufwendung schneller Beschleunigungen erzielen und somit im Rennverlauf entscheidende Vorteile erlangen können. Es stellt sich jedoch die Frage, inwiefern die verbesserte Performance durch TFP-Technologien langfristig unter realen Wettbewerbsbedingungen beibehalten werden kann. Des Weiteren ist die Auswirkung dieser Technologie auf die Ausdauerleistung von Athlet*innen zu erörtern, da eine erhöhte Energieeffizienz zu einer geringeren Ermüdung über längere Distanzen führen könnte. Abschließend muss eine kritische Betrachtung der Langlebigkeit und Wartungsfreundlichkeit dieser Materialien im Profisport erfolgen, um deren Eignung für den längerfristigen und intensiven Einsatz zu evaluieren.

Mit dem fortschreitenden Trend zur Elektromobilität ergeben sich spezifische Herausforderungen, die sich insbesondere auf die Reichweiteneffizienz von Fahrzeugen beziehen (vgl. Fischer et al., 2017). Batteriegehäuse sind ein wesentlicher Bestandteil von Elektrofahrzeugen und ihr Gewicht beeinflusst die Gesamteffizienz des Fahrzeugs maßgeblich. Durch den Einsatz von TFP-verstärkten Thermoplasten lassen sich Leichtbaukonzepte realisieren, welche die Reichweite der Fahrzeuge erhöhen, ohne Kompromisse bei der Batteriekapazität zu machen. Dennoch sind in diesem Kontext nicht nur die Gewichtseinsparungen von Bedeutung, sondern ebenfalls die thermische Managementfähigkeit und mechanische Stabilität der Batteriegehäuse. Hierbei ist zu untersuchen, wie eine optimierte TFP-Struktur zur Sicherheit und Leistungsfähigkeit von Elektrofahrzeugen beitragen kann. Ferner stellt sich die Frage nach der Skalierbarkeit und Wirtschaftlichkeit solcher Fertigungsprozesse im Hinblick auf die Massenproduktion. Darüber hinaus sind die Aspekte des Recyclings und der Kreislaufwirtschaft zu betrachten, um die Nachhaltigkeit der TFP-gefertigten thermoplastischen Komponenten sicherzustellen.

Im Luftfahrtsektor tragen TFP-Verstärkungen ebenso zur Leichtbauweise und somit zur Verbesserung der Effizienz bei. Insbesondere bei der Fertigung von Triebwerksverkleidungen können TFP-Technologien entscheidende Vorteile hinsichtlich Hitzeresistenz und mechanischer Belastbarkeit mit sich bringen (vgl. Spitzer et al., 2021). Eine optimierte Stickdichte und Faserorientierung beeinflussen die thermomechanischen Eigenschaften erheblich, was die Lebensdauer solcher Bauteile verlängern kann. Zugleich gilt es zu prüfen, inwiefern TFP-Prozessparameter die Fertigungsgeschwindigkeit und Präzision beeinflussen und ob sie eine maßgeschneiderte Anpassung an die komplexen Geometrien von Triebwerksstrukturen erlauben. Letztlich sind Qualitätssicherung und Reproduzierbarkeit der Herstellungsprozesse für die Luftfahrtindustrie von kritischer Bedeutung, sodass diese Aspekte einer besonderen Erwähnung bedürfen.

Im Bereich der Großserienproduktion von Sportgeräten versprechen automatisierte TFP-Prozesse eine Kosteneffektivität und höhere Outputraten (vgl. Koch, 2020). Diese Technologie bietet eine Plattform für die Individualisierung von Sportgeräten, somit können die Nutzenden von einer auf sie zugeschnittenen Fertigung profitieren. Indes muss analysiert werden, wie sich die Automatisierung auf die Produktionsgeschwindigkeit und -flexibilität auswirkt und welche langfristigen Kostenvorteile sich daraus ergeben könnten. Es ist ebenso von Bedeutung, die Auswirkungen solcher personalisierten und leistungsoptimierten Geräte auf Markttrends und Positionierung im Sportsektor zu untersuchen.

In der Zusammenschau dieser Fallbeispiele wird deutlich, dass die Anwendung von TFP-Technologien vielfältige Vorteile bietet, die von einer erhöhten Effizienz über verbesserte mechanische Eigenschaften bis hin zur Individualisierung reichen. Die Herausforderungen und Chancen liegen in der Skalierbarkeit, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit dieser innovativen Ansätze. Sie sind nicht nur für eine Vielzahl von industriellen Anwendungen, sondern auch für den Hochleistungssport von hohem Interesse.

5. Fazit

Die vorliegende Arbeit setzte sich zum Ziel, die Beziehung zwischen den Prozessparametern des Tailored Fibre Placement-Verfahrens und den daraus resultierenden Drapiereigenschaften sowie der mechanischen Leistungsfähigkeit von carbonfaserverstärkten thermoplastischen Verbundwerkstoffen zu beleuchten. Es wurde untersucht, wie diese Erkenntnisse zur Optimierung von Fertigungsprozessen und Leichtbauanwendungen beitragen können. Durch die Analyse verschiedener Parameter, wie Stickdichte, Faserablagegeschwindigkeit und Thermofixierungstemperatur, wurden signifikante Zusammenhänge aufgezeigt. Die Arbeit verdeutlichte, wie eine anwendungsorientierte Anpassung dieser Parameter die Eigenschaften von TFP-Verbundwerkstoffen beeinflussen und somit zur Entwicklung effizienter und maßgeschneiderter Bauteile führen kann.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde festgestellt, dass die Stickdichte einen wesentlichen Einfluss auf die Biegesteifigkeit hat, während die Garnspannung die Faserwellung und somit die Homogenität der Preforms determiniert. Die Ablagegeschwindigkeit und die Thermofixierungstemperatur wurden als maßgeblich für die Konsolidierungsqualität und die Vermeidung von Delaminationen identifiziert. Darüber hinaus wurde hervorgehoben, dass der Einsatz von Cobots und Sensoren in der TFP-Fertigung zur Steigerung der Prozessgenauigkeit und Qualitätssicherung beitragen kann. Diese Ergebnisse bestärken die Bedeutung von TFP-Technologien für den Leichtbau und die Notwendigkeit einer weiteren Optimierung der Fertigungsprozesse.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung fügen sich in den aktuellen Forschungsstand ein und erweitern das Verständnis der drapiertechnischen und mechanischen Eigenschaften von TFP-Verbundwerkstoffen. Insbesondere die herausgearbeiteten Korrelationen zwischen Verarbeitungsparametern und Materialperformance bieten eine wertvolle Grundlage für die

industrielle Anwendung und Weiterentwicklung der TFP-Technologie. Die Arbeit liefert somit einen bedeutenden Beitrag zur Forschung im Bereich der Verbundwerkstoffe und unterstreicht das Potenzial von TFP für zukunftsweisende Leichtbaukonzepte.

Aus den gewonnenen Erkenntnissen eröffnen sich neue Forschungsperspektiven, insbesondere im Hinblick auf die Skalierung und Automatisierung von TFP-Prozessen für die Massenproduktion. Es sollte untersucht werden, wie die Prozessparameter weiter optimiert werden können, um die Effizienz und Kosteneffektivität zu steigern. Zudem erscheint es zielführend, die Interaktion von TFP-Prozessen mit anderen Fertigungstechniken zu analysieren, um hybride Systeme zu entwickeln, die die Vorteile beider Verfahren effektiv nutzen. Weiterführende Studien könnten sich auch damit beschäftigen, wie die Integration von Sensortechnologien in die TFP-Produktion die Qualitätssicherung und Überwachung von Bauteilen verbessern kann.

Abschließend verdeutlicht diese Arbeit die Relevanz präziser Material- und Prozessforschung für zukünftige Fortschritte im Bereich des Leichtbaus. Die kontinuierliche Erforschung von TFP-Technologien und die Investition in deren Entwicklung werden als unerlässlich für die Realisierung innovativer Anwendungen und die Erzielung von Fortschritten im Maschinenbau angesehen. Die Ergebnisse dieser Arbeit bekräftigen die Bedeutung von TFP als Wegbereiter für leistungsfähige, effiziente und nachhaltige Produktionsmethoden, die über das akademische Interesse hinaus gesellschaftliche und technische Relevanz besitzen.

Literaturverzeichnis

Arnold, M.A., 2017. Verbesserung der Materialeigenschaften von CFK durch den gezielten Einsatz von thermoplastischen Fadengelegen (Doktorarbeit, Technische Universität München).

Bostan, L. und Schiebel, P., 2014. Funktionalisierte Fasern zur Thermofixierung von PEEK/CF-Preforms für Hochleistungsfaserverbundbauteile: BiKo-PEEK Tow Placement. BoD–Books on Demand.

El-Dessouky, H.M., Saleh, M.N., Gautam, M., Han, G., Scaife, R.J. und Potluri, P., 2019. Tailored fibre placement of commingled carbon-thermoplastic fibres for notch-insensitive composites. Composite structures, 214, S. 348-358.

Fischer, F., Stefani, T., Beyrle, M. und Kupke, M., 2017. Mit dem Cobot zum Organoblech: Intelligente Produktionstechnologie und Qualitätssicherung zur Herstellung carbonfaserverstärkter Thermoplastbauteile für maßgeschneiderte Luftfahrtstrukturen.

Heinrich, H.J., 2020. Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens. Kontinuierliche kraftflussgerechte Textiltechnologien für Leichtbaustrukturen in Großserie: Ergebnisse aus dem BMBF-Verbundprojekt KonText, S. 3-8.

Härtel, F., Nezami, F. und Schur, N., 2015. Innovative Preforming-Routen für die Herstellung von CFK-Bauteilen. Lightweight Design, 8(2), S. 54-61.

Janssen, H., 2020. Additive Prozesskette zur Herstellung von thermoplastischen Faserverbund-Hybridbauteilen. Apprimus Verlag.

Koch, C.H.J., 2020. Eigenschaftsprofil von Carbonfasergelegen und deren Wirkzusammenhänge in der automobilen Großserienproduktion (Doktorarbeit, Technische Universität München).

Lahr, R., 2007. Partielles Thermoformen endlosfaserverstärkter Thermoplaste. Technische Universität Kaiserslautern.

Nezami, F.N., 2015. Automatisiertes Preforming von Kohlefaserhalbzeugen mit aktiven Materialführungssystemen zur Herstellung komplexer Faserverbundstrukturen. epubli GmbH.

Passauer, M., 2015. Untersuchung der Prozesseinflussgrößen im Tailored Fiber Placement (TFP)-Verfahren auf die Preformqualität für Faser-Kunststoff-Verbundbauteile (Doktorarbeit).

Spitzer, S., Folprecht, F., Dargel, A., Klaus, C., Langkamp, A. und Gude, M., 2021. Effiziente und Robuste Entwicklung komplexer Faserverbund-Triebwerkstrukturen.

Wright, T., Bechtold, T., Bernhard, A., Manian, A.P. und 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, S. 703-711.

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