Schlussbericht für das Teilprojekt „TowPreg-Luftfahrt-Leichtbaustab“ im Verbundprojekt TowPregRod

Dr.-Ing. Martin Schütze, Schütze GmbH & Co. KG, Dok.-Nr.: 2026-08-26_1

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

Projektträger DLR Luftfahrtforschung

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Firma: **Schütze GmbH & Co KG**	Förderkennzeichen: **20Q1928A**
Vorhabenbezeichnung: **TowPreg-Luftfahrt-Leichtbaustab**	
Laufzeit des Vorhabens: **01.06.2021 – 28.02.2026**	
Berichtszeitraum: **gesamte Laufzeit**	

I. Projektbeschreibung

I.1 Aufgabenstellung

Das hier beschriebene Projekt war Teil des Verbundprojekts „TowPregRod“. Das Verbundprojekt TowPregRod hatte sich zum Ziel gesetzt, ein effizientes Verfahren zur kontinuierlichen Herstellung von CFK-Leichtbaustäben mit variablem Faserwinkel aus TowPregs zu entwickeln. Ausgangspunkt waren die von der Firma Schütze entwickelten und in einem proprietären Strangziehverfahren hergestellten CFK-Luftfahrt-Leichtbaustäbe in Sandwichbauweise. Deren Herstellung erfolgte im Nassverfahren aus trockenen Carbonfasern und flüssigen Harzen. Dieses Verfahren ist bewährt und

robust, hat jedoch prinzipbedingte Einschränkungen: So lassen sich nur Faserwinkel von 0° direkt im Verfahren erzeugen, die Auswahl an Harzen ist durch das Tränkverfahren eingeschränkt und der Umgang mit flüssigen Harzen erfordert hohe Aufwände bei deren Mischung, Verarbeitung in der Anlage und Reinigung nach Abschluss der Fertigung. Das Projekt TowPregRod strebte an, die Einsatzmöglichkeiten der Stäbe zu erweitern, die Einschränkungen zu minimieren und gleichzeitig die Fertigung effizienter zu gestalten, indem die Stäbe aus vorimprägnierten Carbonfasern (TowPregs) hergestellt werden.

Während der Verbundprojektpartner, das Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen der Leibniz Universität Hannover (IFW) sich im Teilprojekt „Kontinuierliches multi-orbitales Legen von TowPregs mit variablen Faserwinkeln“ (FKZ: 20Q1928B) damit befasst hat, wie TowPregs in von 0° abweichenden Winkeln auf Stäben abgelegt werden können, hat sich dieses Teilprojekt zur Aufgabe gesetzt, Anlagen und Prozesse zu entwickeln, damit sich aus TowPregs, die signifikant andere Verarbeitungseigenschaften als Trockenfasern haben, CFK-Luftfahrtleichtbaustäbe mit unidirektionaler (UD) Faserausrichtung herstellen lassen.

Die Ziele, die mit diesem Teilprojekt erreicht werden sollten, waren:

- Neue und verbesserte technische Eigenschaften, z. B. ein höherer Faservolumengehalt, eine höhere Temperaturbeständigkeit oder ein Flammschutz
- Eine effizientere Produktion, die zu reduzierten Kosten führt
- Eine vereinfachte und damit leichter gegenüber Kunden belegbare Qualitätssicherung
- Eine umwelttechnisch optimierte Produktion mit geringen Abfallmengen und reduzierten Möglichkeiten zur versehentlichen Exposition mit dem Harz

Dazu waren die Verarbeitungseigenschaften von Carbonfasern zu untersuchen, die notwendigen Fertigungsanlagen zu erstellen, die Prozesse zur Herstellung zu entwickeln und die Erreichung der gewünschten Eigenschaften mit der Untersuchung von Mustern zu belegen.

I.2 Voraussetzungen zur Durchführung

Das Projekt TowPregRod ist ein Verbundprojekt des Verbundführers Schütze GmbH & Co. KG und dem Verbundpartner Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW) der Leibniz Universität Hannover. Dieses Teilprojekt wurde im Rahmen des zivilen Luftfahrtforschungsprogramms (LuFo VI) unter dem Förderkennzeichen 20Q1928A vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) gefördert.

Die Bearbeitung des Vorhabens bei uns erfolgte im Rahmen eigener F&E- sowie Produktionskapazitäten: die eingesetzten Stäbe sind ein originäres Produkt der Schütze GmbH & Co. KG, alle Prozessschritte und Einrichtungen wurden im Haus entwickelt, erprobt und eingesetzt. Gleichzeitig erfolgte die Bearbeitung in enger Zusammenarbeit mit dem Verbundprojektpartner IFW. Die Umgebung der Anlagenteile wurde modular und offen gestaltet, so dass sich Teile beider Projektpartner flexibel integrieren und erproben ließen.

Das IFW brachte langjährige Erfahrung bezüglich der Konzeption, Auslegung, Optimierung, Konstruktion und Realisierung innovativer Werkzeugmaschinen und Bearbeitungssysteme in das Projekt ein. Insbesondere der Standort Stade des IFW am Forschungszentrum CFK Nord verfügt über

langjährige Expertise in der Entwicklung von Systemen zur automatisierten Faserverbundverarbeitung. Hier standen dem IFW spezialisierte Versuchseinrichtungen, Prüfstände und Analytiksysteme (u. a. Rheometer, DSC, Zugprüfmaschinen, Lichtmikroskopie) zur Verfügung.

I.3 Planung und Ablauf

Das Vorhaben war zunächst auf eine Laufzeit von 51 Monaten (01.06.2021 – 31.08.2025) ausgelegt und wurde anschließend kostenneutral um 6 Monate (bis 28.02.2026) verlängert. Die Arbeitspaket- und Meilensteinplanung sah vor, dass das Teilprojekt im Wesentlichen in zwei Hauptarbeitspakete (Prozess und Anlagentechnik) gegliedert wurde. Beide Pakete wurden parallel bearbeitet. In einer ersten Phase wurde von uns die Erstellung unidirektionaler CFK-Schichten bearbeitet und erprobt. In einer zweiten Phase wurden sowohl die Ergebnisse des Projektpartners bezüglich der Erstellung von Winkellagen integriert, als auch Erkenntnisse aus der ersten Phase zur Verbesserung von Anlagen und Prozess umgesetzt. Die mit den Arbeitspaketen verbundenen Meilensteine konnten erreicht werden (Details: siehe Zielerreichung weiter unten).

I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Dieses Projekt basiert auf CFK-Sandwichstäben: Ausgangspunkt ist ein runder Kern aus Schaumstoff. Auf diesen Kern werden Carbonfasern unidirektional in Stablängsrichtung abgelegt. Es ergibt sich ein Stab mit sehr hoher gewichtsbezogener Biege- und Dehnsteifigkeit, der sich besonders zur Herstellung leichter Strukturen (Fachwerke) oder zur Verwendung als Steuerstange oder Abspannstange eignet. Die Fadenführung in unserer Anlage ist vergleichsweise gerade, daher können auch empfindliche Fasern mit sehr hohem E-Modul gut verarbeitet werden.

Der Stand der Technik zum Zeitpunkt der Antragsstellung war folgendermaßen: das eingesetzte Herstellungsverfahren ist proprietär, die Produkte werden unseres Wissens von keinem Mitbewerber in gleicher Form hergestellt. Eine wesentliche Erweiterung hat unser Verfahren in den LuFo-Verbundprojekten AirCarbon I und AirCarbon II erfahren: dort wurden die anlagen- und prozesstechnischen Grundlagen für die Verwendung heiß aushärtender Harze geschaffen. Die Erfahrungen aus diesen beiden Projekten sind direkt in dieses Projekt eingeflossen. Die Verwendung von TowPregs war bisher in unserem Verfahren nicht möglich, ebenso das prozessintegrierte Einbringen von Winkellagen.

Das Verfahren, das unserem am nächsten kommt, ist die Pultrusion. Pultrudierte, unidirektional verstärkte Stäbe und Hohlprofile aus Kohlenstofffaser-Rovings stellen nach dem aktuellen Stand der Technik kommerziell gut verfügbare Produkte dar. Bei duroplastischen Matrixsystemen werden diese jedoch nahezu ausschließlich im klassischen Nass-Imprägnierungsverfahren hergestellt. Dieses Verfahren bringt etablierte prozesstechnische Einschränkungen mit sich. Pultrusionsprozesse erfordern je nach Bauteilquerschnitt äußerst investitionsintensive Formwerkzeuge aus hochlegierten Stählen, weshalb sich die Fertigung meist nur für Großserien wirtschaftlich darstellen lässt und kaum Flexibilität gegenüber Geometrieänderungen bietet. Zudem bleiben die werkstoffseitigen Potenziale vorimprägnierter Materialien (wie z.B. Towpregs) in der kontinuierlichen Fertigung bislang weitgehend ungenutzt. Relativ (im Vergleich zum Durchmesser) dünne Wandstärken sind entweder schwierig zu realisieren und/oder durch den fehlenden Schaumkern weniger robust. Unser Verfahren benötigte keine komplexen, kostenintensiven Werkzeuge; die von uns angestrebte Herstellung leichter, an die Anwendung möglichst gut angepasste Stäbe gelingt aus unserer Sicht mit unserem Verfahren besser.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Wie bereits oben erwähnt, gab es eine sehr intensive, partnerschaftliche und erfolgreiche Zusammenarbeit mit dem Partner im Verbundprojekt. Wir bedanken uns daher ausdrücklich an dieser Stelle beim IFW, insbesondere bei Carsten Schmidt, Marco Bogenschütz und Simon Werner, für die ausgezeichnete Kooperation.

II. Projektdurchführung

II.1 Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse

II.1.1 Motivation

Die folgende Abbildung gibt einen Überblick über die Ausgangslage (Nassverfahren, Herstellprozess zu Ende des Projektes Air Carbon II), den gewünschten Zielzustand und damit auch die Aufgaben, die in diesem Teilprojekt zu bearbeiten waren:

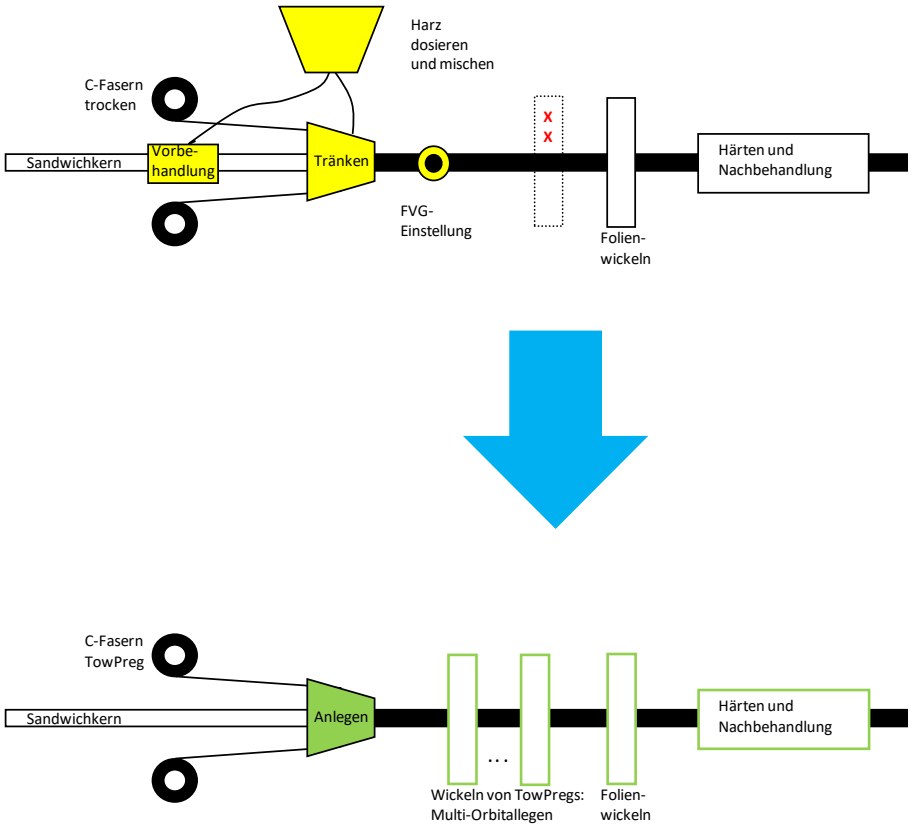

Abb. 1: Herstellverfahren

Im Nassverfahren werden dem Prozess trockene Carbonfasern von Rollen zugeführt. Sowohl die Fasern als auch der Schaumkern werden in Tränkbädern, die von einem Vorratsbehälter kontinuierlich mit Epoxidharz-Mischung versorgt werden, imprägniert. Danach erfolgt die Kontrolle des Faservolumengehaltes durch eine Blende, das Konsolidieren des unausgehärteten Materials durch eine Trennfolie und das Aushärten bei Raumtemperatur oder im Ofen. Eine Umwicklung mit C-Fasern in Winkellagen ist aufgrund der Komplexität rotierender Tränkbäder schwer darstellbar.

Im Zielzustand werden bereits vorimprägnierte Fasern auf dem Schaumkern abgelegt. Das Mischen von Harzen, die Kontrolle von Mischung und Durchtränkung, der Umgang mit flüssigen Harzen im Prozess und die aufwändige Reinigung entfallen. Eine Herstellung zusätzlicher Lagen im Prozess (siehe Arbeiten des Projektpartners IFW) ist möglich.

Aus den ersichtlichen Unterschieden ergeben sich die in diesem Projekt angestrebten Ziele nach Abschnitt I.1.

II.1.2 Arbeitspakete

Die erforderlichen Arbeiten an Anlagentechnik, Prozessen und die Auswahl geeigneter Materialien wurden in folgende Arbeitspakete unterteilt:

AP0: Projektmanagement

AP1.1: Produktdefinition
Zusammen mit den Projektpartner wird festgelegt, welches Produktspektrum (z.B. Durchmesser, Wandstärke, Faserbelegung) für das Verbundprojekt zugrunde gelegt werden soll.

AP1.2: Prozessentwicklung
Entwicklung eines Herstellprozesses, der die Parameter (z.B. Temperaturen, Verweilzeiten, Geschwindigkeiten) für eine robuste und reproduzierbare Durchführung der Prozessschritte Ablegen, Konsolidieren und Härten festlegt.

AP1.3: Muster TowPreg-Luftfahrt-Leichtbaustäbe
Herstellung von Mustern, sowohl im Teilprojekt, als auch im Verbund mit den Anlagen des Projektpartners IFW sowie deren Bewertung.

AP2.1.1: Tow-Führung
Reibungsarme und beschädigungsfreie Führung des TowPreg-Materials für die UD-Anteile (0° Faserwinkel) von den Vorratsspulen zur Ablegestelle

AP2.1.2: Konsolidierung und Aushärten
Verteilung der UD-Faseranteile rund um den und Ablage auf dem Schaumkern. Konsolidieren (Andrücken und Fixieren) sowohl der UD-Faseranteile als auch der Fasern, die durch Multi-Orbitalwickeln (→ Projektpartner IFW) abgelegt wurden. Aushärten im Durchlaufofen.

AP2.1.3: Integration
Prozess- und anlagentechnische Integration des durch den Projektpartner IFW entwickelten Multi-Orbitallegens in unsere Fertigungseinrichtungen.

II.1.3 Ergebnisse

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt losgelöst von der AP-Struktur:

<u>Tow-Führung</u>

So lange genügend Bauraum vorhanden ist, sollten TowPregs bevorzugt mit rollenden Elementen geführt werden. Zu Beginn, bei Abnahme des Tow von der Vorratsspule, ist dies üblicherweise der Fall. Es wurden diverse Alternativen zur Tow-Führung bewertet. Die wichtigsten beiden waren:

- Ein zentrales Führungselement, dass sich mittig kurz vor der Spule befindet und das Tow in Position und Orientierung hält
- Eine Andruckrolle, die direkt auf der Tow-Spule läuft und das Tow von der Spule anführt

Die erste der beiden Alternativen hat sich als nicht sonderlich erfolgreich herausgestellt (Abb. 2):

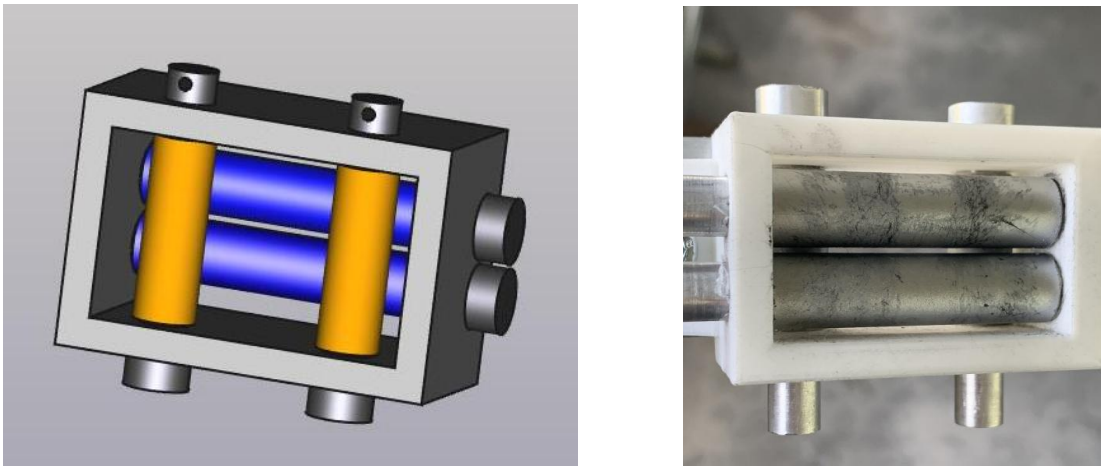

Abb. 2: zentrales Führungselement

Elemente dieser Bauart vor jeder Spule hängend zu fixieren ist aufwändig. Die Führung erlaubt trotzdem keine kontrollierte Einstellung eines bestimmten Faserwinkels und keinen kontrollierten Ausgleich der Spulenbreite, da die Tows nicht stabil genug sind: die Tow-Geometrie kollabiert, bevor eine hinreichend große Richtwirkung erzielt wird. Der größte Nachteil ist jedoch, dass das Tow in einem steilen Winkel von der Spule abgezogen wird. Dabei kann es zu Schäden am Tow und seinem Abreißen kommen.

Auf Anregung des Projektpartners wurde ein anderer Ansatz erprobt: die Spule wird mit hinreichendem Abstand von der Ablagestelle (bei uns ca. 2m) positioniert, so dass Änderungen in der Abzugsposition durch die Spulenbreite keine relevante Rolle spielen. Gleichzeitig wird durch eine mitlaufende Andruckrolle, die vom Tow umschlungen wird, sichergestellt, dass das Material nahezu tangential von der Spule abgenommen wird, siehe Abb. 3.

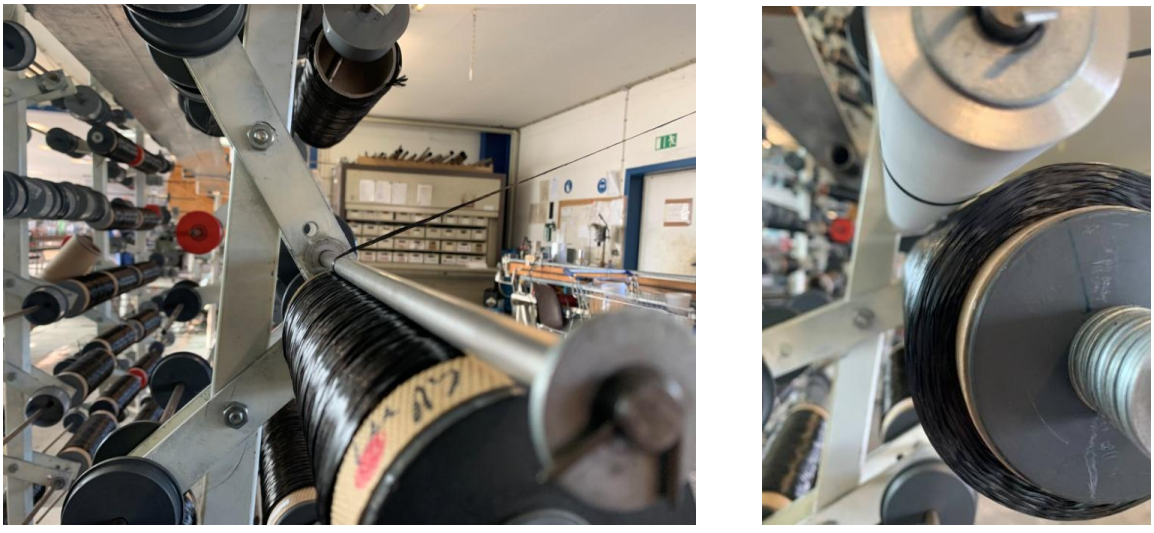

Abb. 3: Umlenkrollen

Dieses Verfahren hat sich als praktikabel und im Zusammenhang mit dem notwendigen Spulenvorrat („Spulenbaum“) effizient implementierbar herausgestellt, siehe Abb. 4.

Abb. 4: Integration in den Spulenbaum

Weiterhin wurden Verfahren betrachtet, die eine eventuell vorhandene Trennfolie unter den Tows abführen. Als effektive und gut in den räumlichen Aufbau unserer Anlage integrierbare Version hat sich dabei eine Absaugung der Trennfolie in den rückwärtigen, nicht genutzten Anlagenbereich herausgestellt.

Vor- und Endverteilung

Nachdem das Tow in die Nähe der Ablagestelle geführt wurde, muss es räumlich um den Schaumkern angeordnet werden. Dazu werden Führungen benötigt, die sehr dicht vor dem Ablageort jedes Tow seiner Winkelposition im Stabquerschnitt zuordnen. Diese Führungen können durch den geringen vorhandenen Bauraum besser als reibende Elemente ausgeführt werden.

Um den Reibungswiderstand und den Faserabrieb zu minimieren, wurden Abzugsversuche mit verschiedenen metallischen und nichtmetallischen Werkstoffen bei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt. Als bester Kompromiss aus Reibverhalten, chemischer Beständigkeit (Reinigung), Kosten und mechanischer Eigenschaften hat sich die Verwendung von POM herausgestellt.

Der Vorverteiler (Durchmesser ca. 1500mm) und der Endverteiler (Durchmesser ca. 200mm) wurden aus POM hergestellt, siehe Abb. 5.

Der Vorverteiler ist modular aus Segmenten aufgebaut und kann für Versuche zusätzlich mit Führungselementen z.B. aus Metall oder anderen Oberflächen ausgestattet werden. Die Vielzahl der Bohrungen dient dazu, zum einen viele Tows parallel zu führen (große Durchmesser und Wandstärken) und zum anderen genügend Flexibilität für eine gleichmäßige Verteilung bei variabler Tow-Anzahl zu bieten. Das gleiche gilt für den Endverteiler, der sogar eine überlappende Tow-Ablage ermöglicht. Er kann in der Anlage sehr leicht gegen Endverteiler mit abweichendem Lochbild ausgetauscht werden.

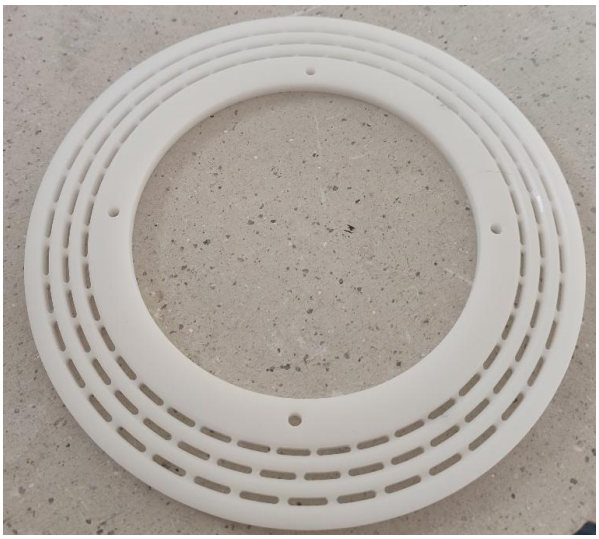

Abb. 5: Vor- und Endverteiler aus POM

Belegung, Konsolidierung und Aushärtung

Nach der Endverteilung erfolgt die Ablage der Tows auf dem Schaumkern. Dies geschieht mit Hilfe einer Andruckvorrichtung (ähnlich einer Blende, aber mit kantenfreiem Einlauf für die Fasern und einer Andruckstrecke). Es standen wieder verschiedene Werkstoffe und Temperaturen zur Auswahl. Bewährt hat sich eine Kombination aus POM mit Vorheizung.

Nach endgültiger Konfiguration des Stabes - wahlweise mit oder ohne Winkellagen - wird der Stab mit einer Shrink-Trennfolie umwickelt und dem In-Line-Aushärteofen zugeführt. Der Ofen besteht aus mehreren Segmenten, die individuell geregelt werden können. Dadurch lassen sich Temperaturprofile für verschiedene Matrixmaterialien einstellen.

Auswahl geeigneter TowPregs

Aus den gemeinsamen Überlegungen mit dem Projektpartner und dem gewünschten Produktspektrum ergab sich folgender Anforderungskatalog für TowPregs:

- Harzsystem: epoxidbasiert; stabiles Aushärten in 10min...30min bei <=160°C; Tg >=120°C
- Aufmachung: nach Möglichkeit ohne Trennfolie
- Faserqualität: mindestens gesteigerter E-Modul (IM), bevorzugt hoher E-Modul (UM oder Pitch Fiber)
- FVG: ca. 60%
- Maßhaltigkeit, insbesondere für Winkellagen

In unserem Teilprojekt wurden nach Sichtung des Marktes und der potentiellen Hersteller insgesamt acht TowPreg-Systeme bewertet. Die besten Möglichkeiten boten die TowPregs eines deutschen Herstellers, die nach Kundenwünschen aus verschiedenen Fasern und Harzsystemen kombiniert werden können.

Zwei Aspekte erschweren die Auswahl:

- Es ist schwierig, TowPregs auf Basis von UM-Fasern zu erhalten. UM-Fasern sind für unsere Produkte aber sehr wünschenswert.
- Seit 2019, als die Vorüberlegungen für diese Projekt begannen, hat sich der Markt sehr stark verändert: lag früher der Schwerpunkt auf den Ersatz von geschlitzten Prepregs für Luft- und Raumfahrt, scheint uns der Schwerpunkt nun auf Tows für die Massenherstellung von z.B. H2-Tanks zu liegen. Das führt zum einen zwar zur guten Verfügbarkeit günstiger Systeme, zum anderen erschwert es aber den Zugang zu Tows mit besonderen Eigenschaften.

Aus diesem Grund ist unsere Auswahl noch nicht endgültig.

Modularisierung

Die gesamte Anlage ist modular aufgebaut und besteht aus einzelnen Stationen (Spulenbäume, Verteilung und Auflegen, Orbitalwickeln (→ Projektpartner IFW), Konsolidierung und Aushärten), die auf einem Schienensystem am Boden angeordnet sind und flexibel arrangiert werde können. Dadurch werden Versuche mit verschiedenen Modulen oder nachträgliche Erweiterungen ermöglicht.

Prozessführung

Zur Entwicklung des Herstellprozesses wurden zunächst die Datenblätter verschiedener TowPreg-Harzsysteme analysiert. Zusätzlich wurden kleine Materialproben verarbeitet, um z.B. das Aushärteverhalten qualitativ zu bewerten. Unser Projektpartner IFW hat parallel ähnliche Versuche mit quantitativer Bewertung durchgeführt. Aus diesen Versuchen ergab sich ein initiales Aushärteprofil.

Im nächsten Schritt wurde der Durchlaufofen zur Aushärtung charakterisiert, siehe Abb. 6. Dabei wurde der Ofen zum einen statisch über die Länge vermessen, zum anderen wurde mit Hilfe einer geschleppten Probe bei realistischen Dimensionen und Vorschubgeschwindigkeiten die Temperatur im Stab unter der CFK-Schicht an verschiedenen Höhenprofilen des Ofens gemessen.

Begleitend wurden im Rahmen einer Projektarbeit Simulationen der Ofenstrecke implementiert und durchgeführt.

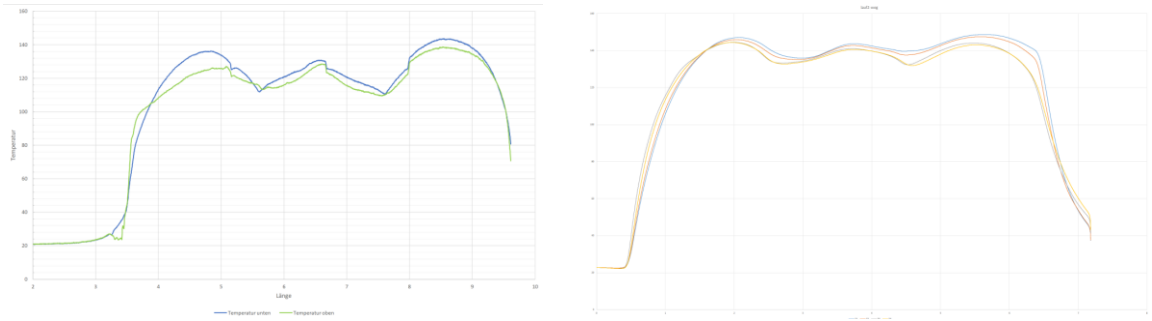

Abb. 6: statische Temperaturmessung und Ergebnisse der Schleppsonde

Mit diesen Ergebnissen war es möglich, eine integrierte Regelung für den Durchlaufofen zu erstellen. Die Umsetzung erfolgte zunächst mit diskreten Einzelreglern, später dann mit einer SPS, die parallel auch die Wickeleinheiten für das Multi-Orbitallegen steuern kann, siehe Abb. 7. Die Regelparameter wurden dabei mit Hilfe der Simulation optimiert und in der Praxis erfolgreich erprobt.

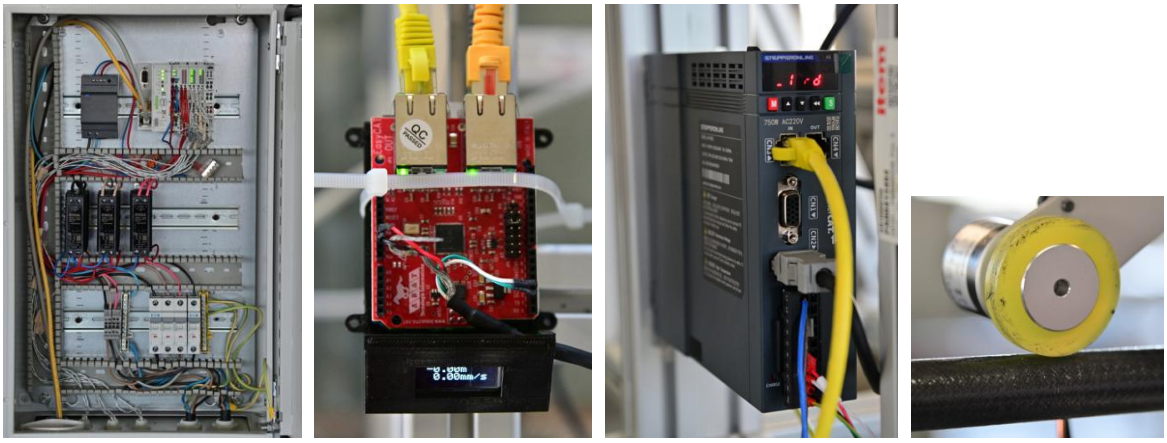

Abb. 7: SPS zur Steuerung der Gesamtanlage

Integration der Ergebnisse des Projektpartners

Ein wesentliches Element in diesem Teilprojekt war die Integration der Arbeitsergebnisse unseres Projektpartners IFW in die Gesamtanlage und die Durchführung gemeinsamer Musterfertigungen. Die Integration erfolgte in zwei Schritten:

- Zunächst wurden die Anlagen des IFW (die Abmessungen wurden im Vorfeld abgestimmt) direkt in die Anlage eingesetzt. Dabei wurde eine Hilfskonstruktion verwendet, um die Einrichtungen in ihrer Position zu fixieren. So wurden erfolgreich Produktionsversuche durchgeführt. Bereits die erste Produktion war technisch erfolgreich.

- In einem zweiten Schritt wurden Teile der Einrichtungen von uns neu konstruiert und aufgebaut. Dabei wurden Optimierungen, die sich aus der ersten Integration ergeben hatten, in die Konstruktion einbezogen. Die elektrische und mechanische Schnittstelle zu den Ablegeeinheiten des IFW ist identisch, so dass Module zwischen beiden Implementierungen ausgetauscht werden können.

Einen Eindruck von der integrierten Anlage gibt Abb. 8.

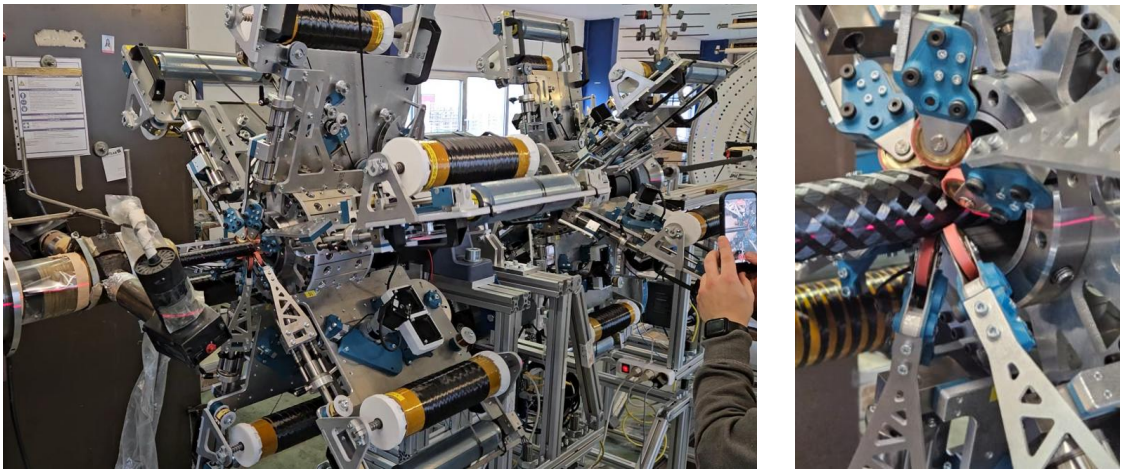

Abb. 8: voll integrierte Einheiten des IFW zum Multi-Orbitallegen

Ergebnisse der gefertigten Muster

Währen der Projektlaufzeit wurden immer wieder Produktionsversuche in verschiedenen Ausbaustufen der Anlage und mit diversen Materialien durchgeführt. Einen Überblick über die Ergebnisse mit TowPregs, die auf der Faser T700 basieren, gibt Abb. 9.

	Air Carbon	TowPregRod I	TowPregRod II	TowPregRod III	TowPregRod IV
Typ	A25 x 0,6	A25 x 0,6	A25 x 0,6	A25 x 0,6/75°	A25 x 0,6/45° Heavy
Datum		25.04.24	10.09.24	20.09.24	14.01.25
Faser	T700 12k, 55	T700 24k, 27	T700 24k,**32**	T700 24k,32 + T700 24k, 2x4	T700 24k,32 + TP50 3070tex, 2x4
Harz	LR160/LH163	System A	System B	System B	System B
Durchmesser	24,9	24,3mm	24,8mm	25,9mm	25,7mm
Masse	119g/m	88g/m	100g/m	163g/m	146g/m
E-Modul (UD-Schicht)*	105GPa	104GPa	130GPa		
Druckfestigkeit*	29,7kN / 603N/mm²	23,5kN / ~~477N/mm²~~	36,2kN / 734N/mm²	43,6kN/ ~~885N/mm²~~	35,2kN/ ~~713N/mm²~~

Abb. 9: Ergebnisse T700

Es lässt sich erkennen, dass unter Nutzung des TowPregs statt trockener Fasern und Harz die Masse eines Stabes bei gleicher Steifigkeit rund 30% geringer ausfällt (Spalten AirCarbon und TowPregRod I). Der Massenunterschied liegt sowohl an dem höheren FVG (ca. 60% gegenüber ca. 50%) als auch am geringeren Anteil von Überschussharz im Schaumkern und in einer umhüllenden Glasflechtlage. Die Festigkeit ist etwas geringer – wir führen das auf die geringere effektive Wandstärke durch den höheren FVG zurück, die lokales Beulen begünstigt.

Bei einer Auslegung mit vergleichbarer Wandstärke (32 Fasern statt 27 Fasern, Spalte TowPregRod II) ergibt sich bei immer noch geringerer Masse eine höhere Steifigkeit des Stabes sowie eine verbesserte Festigkeit.

Eine Winkellage kann die Festigkeit (bei erhöhter Masse) weiter steigern (Spalte TowPregRod III). Gleichzeitig ergeben sich neue Eigenschaften wir z.B. eine verbesserte Druckfestigkeit oder Torsionssteifigkeit. Das Teilprojekt unserer Partners IFW hat sich damit im Detail auseinandergesetzt, Ergebnisse finden sich im dortigen Abschlussbericht.

Mit Hilfe von TowPregs lassen sich also wahlweise ähnliche Eigenschaften bei geringerer Masse oder deutlich bessere Eigenschaften bei vergleichbarer Masse erzielen. Damit ist ein wesentliches Ziel des Projektes, nämlich mindestens gleichwertige Leistungen wie im bisherigen Verfahren zu erreichen, erfüllt.

Ein ähnliches Bild zeigt sich, wenn eine UM-Faser (Tenax UMS40), die für unsere Anwendungen besonders relevant ist, eingesetzt wird, siehe Abb. 10.

	Air Carbon	TowPregRod 8	Luftfahrt Kunde 2	TowPregRod 11
Typ	A25 x 0,6	A25 x 0,6	A40 x 0,6	A40 x 0,6/6 x 45°
Datum	16.05.11	20.08.25	12.12.24	18.12.25
Faser	Tenax UMS 24k, 55	Tenax UMS 24k, 66	Tenax UMS 24k, 88	UMS 24k,104 + T700 24k, 2x6
Harz	LR160/LH163	System B	L20/H960	System B
Durchmesser	24,9mm	24,6mm	39,9mm	39.9mm ohne W.
Masse	115g/m	106g/m	192g/m	203g/m (~190 o.W.)
E-Modul (UD-Schicht)*	170GPa	203GPa	169GPa	198GPa
Druckfestigkeit*	~32kN / 650N/mm²	34,7kN / 710N/mm²		

Abb. 10: Ergebnisse UMS

Auch hier kann man erkennen, dass insbesondere die Steifigkeit um 15% bis 20% bei vergleichbarer Masse zunimmt, wenn ein Stab aus TowPregs hergestellt wird.

Erste Untersuchungen der Faserlage ergaben eine gute Laminatqualität, siehe Abb. 11.

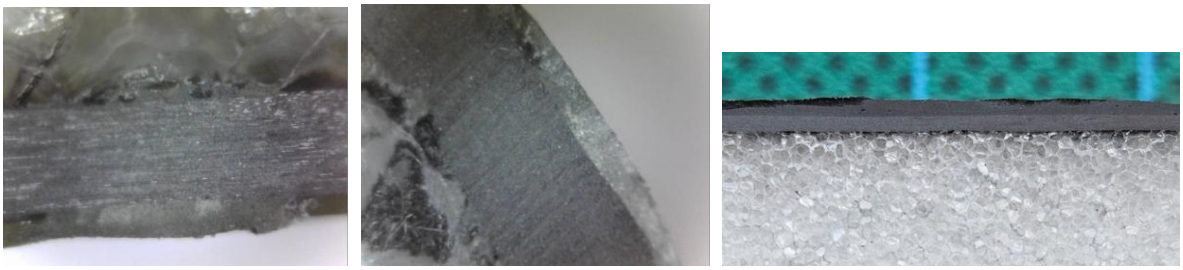

Abb. 11: Porosität und Faserlage

Die Porosität war in den untersuchten Proben gering, die Lage der UD-Fasern hinreichend gerade. Hier sind aber noch weitere Untersuchungen unter Einbeziehung verschiedener Fertigungsparameter angezeigt. Wir planen solche Untersuchungen im Rahmen der Verwertung der Ergebnisse, z.B. bei der Qualifikation eines Produktes für Referenzkunden.

Bezüglich der Herstellungskosten ist eine abschließende Aussage aufgrund der kleinen Produktionsmengen noch nicht möglich. Eine erste Auswertung zeigt aber:

- Die eingesetzten Fasern haben trocken und im TowPreg den gleichen Preis. Durch den Prepreg-Prozess steigen aber die effektiven Kosten in etwa so stark, dass es dem zwei- bis dreifachen Harzpreis entspricht. Gleichzeitig entfallen die (gerade bei kleineren Durchmessern und Wandstärken) relativ großen Abfallmengen des Nassverfahrens. Im Endeffekt ergibt sich damit ein fast vergleichbarer, ggf. etwas höherer Preis für das effektiv aufgewendete Material

- Bei einem einzelnen Produktionstag spart man in etwa 20% der Produktionskosten durch Entfall der Reinigung. Bei mehreren Produktionstagen steigt die Einsparung, da die im Nassverfahren notwendige, täglich Neueinrüstung durch die lange Offenzeit der Harzsysteme entfällt. Die Ersparnis beziffern wir insgesamt auf bis zu 50%.

- Bei der Herstellung von Winkellagen entfallen gleich mehrere nachträgliche, manuelle Produktionsschritte, die im bisherigen Verfahren notwendig gewesen wären, um Winkellagen aus z.B. Flechtschläuchen aufzubringen. Eine Einsparung kann hier noch nicht aus den Musterfertigungen abgeleitet werden. Sie ist aber auf jeden Fall bedeutend. Dazu kommt die deutlich größere Flexibilität, die sich nicht in Produktionskosten ausdrücken lässt.

Die angestrebte Kosteneinsparung („mindestens 20%“ bei unidirektionaler Faserablage, etwa 50% bei Winkellagen“) ist somit zumindest realistisch erreichbar.

Zielerreichung

Zusammengefasst hat das Teilprojekt seine Ziele folgendermaßen erreicht:

- Anlagentechnik zur prototypischen Darstellung der Serienherstellung von CFK-Luftfahrt-Leichtbaustäben
    - Tow-Abnahme von der Rolle: **erreicht**
    - Tow-Führung zur Ablagestelle: **erreicht**
    - Tow-Ablage auf dem Schaumkern: **erreicht**
    - Konsolidieren und Aushärten: **erreicht**
    - Modularer Aufbau: **erreicht**
- Herstellprozess
    - Auswahl von Faser-Harz-Kombinationen: **überwiegend erreicht**
      Es wurden Anforderungen an Materialien definiert, Hersteller identifiziert und auch geeignete Materialen ausgewählt. Es können erfolgreich Stäbe mit guten Leistungsdaten hergestellt werden. Unsere bevorzugte Kombination aus Faser-und Harzeigenschaften konnte aber noch nicht gefunden werden.
    - Evaluierung von Hilfsstoffen: **erreicht**
    - Prozess „In-situ-Aushärtung“: **erreicht**
    - Festlegung wichtiger Arbeitspunkte: **erreicht**
- Effizienz
    - Reduktion der Herstellkosten um 20%..50%: **voraussichtlich erreicht**
      Es fehlt der endgültige Nachweis in Form größerer Produktionschargen.
    - Reduktion des Abfalls: **erreicht**
- Integration des Multi-Orbitallegens: **erreicht**
- Demonstration der Produkteigenschaften an einer prototypischen Luftfahrtanwendung
    - Im Vergleich zum aktuellen Verfahren soll ein Stab mit ausschließlicher UD-Belegung mindestens die gleichen Eigenschaften aufweisen: **erreicht**

- Die durch das Multi-Orbitallegen eingebrachten, neuen Eigenschaften sollen mindestens die Eigenschaften von nachträglich aufgebrachten Geflechtlagen im jetzigen Verfahren erreichen: **noch nicht demonstriert,** aber die dafür erforderlichen Parameter der Muster wurden vom Projektpartner IFW gemessen

Neben den genannten Zielen wurden folgende Leistungen erbracht:

- Verarbeitung von Thermoplast-Matrix-TowPregs
    - Ein erste Prototyp-Fertigung verlief erfolgreich
    - Es zeigt sich ein Potential für sehr hohe Prozessgeschwindigkeiten
- Verbesserung existierender Prozesse durch verbesserte Prozesskontrolle: die Erkenntnisse zur Prozesssteuerung kommen auch dem Nassverfahren zu Gute
- Ausbildung von Studenten – es entstanden:
    - Eine Masterarbeit
    - Eine Studienarbeit
    - Mehrere Studenten haben Teile ihres Betriebspraktikums in diesem Teilprojekt absolviert

II.2 Wesentliche Positionen der Abrechnung

Der geplante Kostenrahmen wurde minimal überschritten (<1%). Es zeigte sich, dass die Materialkosten geringer als geschätzt (-40%) und die Personalkosten etwas höher als geschätzt (+10%) ausfielen, weil viele prototypischen Anlagenteile entgegen der ursprünglichen Annahmen mit einem höheren Anteil an Eigenleistung und damit einhergehend einem geringeren Zukaufvolumen erstellt wurden. Insgesamt hat sich die Vorkalkulation aber als gut zutreffend erwiesen – insbesondere vor den Hintergrund, dass vor Projektbeginn der Umfang der erforderlichen Einrichtungen nur sehr schlecht einschätzbar war.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die bewilligten Fördermittel wurden ausschließlich zur Durchführung des im Zuwendungsbescheid genehmigten Vorhabens TowPregRod und entsprechend den geltenden Nebenbestimmungen verwendet. Die Mittel flossen in die im Antrag dargestellten Arbeitspakete und dienten der Erreichung der Projektziele (siehe I.1)

Die Ausgabe der Mittel erfolgte wirtschaftlich, sparsam und zweckgebunden. Abweichungen vom ursprünglichen Arbeits- und Kostenplan bewegten sich innerhalb des genehmigten Rahmens und waren für die erfolgreiche Durchführung des Vorhabens erforderlich. Die Einhaltung der Kosten- und Zeitplanung wurde kontinuierlich überwacht und dokumentiert. Die geleisteten Arbeiten waren zudem angemessen im Hinblick auf den angestrebten Innovationsgrad und das technische Risiko des Vorhabens: Das in diesem Projekt entwickelte Verfahren weicht signifikant vom bisherigen Verfahren der Firma Schütze ab. Die Entwicklung der notwendigen Anlagen und Prozesse erforderten einen

interdisziplinären Entwicklungsansatz unter enger Beteiligung des Verbundpartners IFW. Ohne den durch die Förderung ermöglichten Ressourceneinsatz hätten diese Arbeiten aufgrund des hohen finanziellen und technologischen Risikos nicht in dieser Tiefe und Breite durchgeführt werden können.

Mit den erzielten Ergebnissen wurde die Grundlage für eine Steigerung der Leistungsfähigkeit von CFK-Leichtbaustäben geschaffen und Möglichkeiten zur Optimierung des Ressourceneinsatzes bei deren Herstellung eröffnet. Daher waren die durchgeführten Arbeiten auch im Verhältnis zum zu erwartenden Nutzen angemessen.

Die durchgeführten Arbeiten waren somit sowohl notwendig als auch angemessen, um die technischen, wirtschaftlichen und förderpolitischen Ziele des Vorhabens TowPregRod zu erreichen.

II.4 Nutzen und Verwertbarkeit

Die aus diesem Projekt gewonnenen Erkenntnisse dienen der Erweiterung unserer Produktpalette. Da die im hier entwickelten Verfahren erstellten Stäbe verbesserte Eigenschaften bei reduziertem Fertigungsaufwand zeigen, gehen wir generell von einer guten Verwertbarkeit aus. Die im Projekt entwickelten Anlagen und Fertigungsprozesse dienen dabei als Ausgangspunkt für alle künftigen Weiterentwicklungs- und Verwertungsaktivitäten.

Im Luft- und Raumfahrtbereich ist es auf Grund der aufwändigen Qualifikationsmaßnahmen und der individuellen Kundenanforderungen erforderlich, die Serienreifmachung und anschließende Verwertung zusammen mit Referenzkunden und am Beispiel konkreter Anwendungen durchzuführen. Die im Projekt ermittelten Leistungsdaten, insbesondere die gewichtsbezogene Steifigkeit und Festigkeit, helfen dabei, Kunden die Vorteile der Verwendung von Towpregs zu vermitteln. Der Verwertungshorizont liegt bei einigen Jahren

Neben der Verwertung in Luft- und Raumfahrt planen wir auch die Nutzung im industriellen Bereich: hier gibt es ebenfalls Anwendungen, die von den verbesserten Kenndaten profitieren könnten. Gleichzeitig ist der Qualifikationsaufwand meist deutlich geringer. Wir gehen daher davon aus, dass sich die Ergebnisse schneller serienreif machen und verwenden lassen.

Darüber hinaus haben wir während der Arbeit an diesem Projekt weitere Potentiale des neuen Verfahrens identifiziert. Beispielsweise wir gehen davon aus, dass mit der Verwendung von Fasern mit thermoplastischer Matrix die Effizienz des Verfahrens nochmals gesteigert werden kann. Dies könnte insbesondere sehr kostensensitiven Produkten zugutekommen. Wir halten hier ein an die Ergebnisse anschließendes Forschungsprogramm für sinnvoll.

Insgesamt werden die Ergebisse dieses Projektes dazu beitragen, unsere Wettbewerbssituation zu verbessern und damit Arbeitsplätze am Standort Deutschland zu sichern.

II.5 Fortschritt bei anderen Stellen

Unsere Produkte werden in einem proprietären Prozess hergestellt. Uns ist kein Wettbewerber bekannt, der mit dem gleichen Verfahren arbeitet oder identische Produkte herstellt. Daher ist uns auch kein Wettbewerber bekannt, der ähnliche Entwicklungen parallel zu diesem Projekt gemacht hat. Der Sachstand ist damit im Vergleich zum Projektbeginn unverändert.

II.6 Veröffentlichungen

Die Firma Schütze hat allein keine Berichte veröffentlicht. Viele Aspekte unserer Arbeit sind aber in die folgenden Veröffentlichungen des Projektpartners eingegangen, die wir hier der einfacheren Auffindbarkeit halber aufführen:

Veröffentlichungen mit Review:

- Manufacturing Letters: „Multi-orbital placement of towpregs on cylindrical foam cores in continuous CFRP rod production". Status: Veröffentlicht 2024
- Production Engineering: „Material-dependent deformation mechanisms of CF Prepregs in continuos filament winding: From initial state characterization to In-process Geometry evolution". Status: In Ausarbeitung

Veröffentlichungen ohne Review:

- VDI-Z: „Automatisierte Prozesskette zur kontinuierlichen Herstellung von CFK-Sandwichstäben". Status: Veröffentlicht 2025
- Jahrbuch der Leichtbau-Inspirationen. Status: Veröffentlicht 2024

Dorsten, August 2026

Martin Schütze
Schütze GmbH & Co. KG
Email: martin.schuetze@schuetze-staebe.de
Internet: https://www.schuetze-staebe.de/