

Schlussbericht
des Verbundprojekts
LuFo VI-2 LaSt

**Variabelaxiale Faserarchitekturen doppelt gekrümmter Faser-
Kunststoff-Verbunde für Luftfahrtanwendungen (VaLu)**

*Variable-axial fiber architectures of double-curved fiber-reinforced
plastic composites for applications in aviation*

Förderkennzeichen:

20Q2118E

Projektlaufzeit:

01.07.2022 - 30.06.2025

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Projektpartner: Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e. V.
Hohe Str. 6
01069 Dresden

Ansprechpartner: Prof. Dr. Axel Spickenheuer

Inhaltsverzeichnis

I. Kurzdarstellung

I.1 Aufgabenstellung.....	3
I.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	3
I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	4
I.4 Stand der Wissenschaft und Technik.....	4
I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	6

II. Eingehende Darstellung

II.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	8
II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	35
II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	36
II.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses	36
II.5 Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	37
II.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses.....	38
Literaturverzeichnis	39

TEIL I: Kurzdarstellung

I.1 Aufgabenstellung

Ziel des Vorhabens VALU war die wissenschaftlich-technische Weiterentwicklung hybrider Fertigungskonzepte für gewickelte Drucktanks bzw. gekrümmte Strukturen mit lokal integrierten Tailored Fiber Placement (TFP)-Verstärkungsstrukturen. Hintergrund ist die zunehmende Bedeutung von Wasserstoffspeichern in der Luftfahrt sowie in weiteren Mobilitätsanwendungen, bei denen hohe Anforderungen an Gewichtsreduktion, strukturelle Integrität und Prozesssicherheit gestellt werden.

Konventionelle Filament-Winding-(FW)-Strukturen basieren überwiegend auf geodätischen Faserablagepfaden. Diese gewährleisten zwar eine stabile Prozessführung, stoßen jedoch bei komplexen Lastfällen, lokalen Öffnungen (z. B. an Endkappenbereichen oder Stellen für die spätere Befüllung der Tanks) und bei der Anpassung an komplexe Geometrien an Grenzen. Die Öffnungen in den Tanks führen zu Spannungsspitzen, die in der konventionellen Fertigung nicht abgefangen werden, während das geplante Hinzufügen von TFP-Patches lokale Dickeninhomogenitäten erzeugt, die bisher in marktüblicher Software zur Erzeugung von Wickelpfaden nicht berücksichtigt werden können.

Vor diesem Hintergrund bestand die Aufgabe des IPF darin, präzisere Dickenmodellierungsansätze für Wickelstrukturen zu entwickeln, nicht-geodätische Faserablagepfade softwareseitig zu generieren und TFP-Patches zur lokalen Lastpfadoptimierung in FW-Strukturen zu integrieren. Damit sollte eine verbesserte Grundlage für Auslegung und digitale Prozessketten geschaffen und die methodische Weiterentwicklung im Projekt durch die Anhebung des Technology Readiness Levels von 2 auf 4 vorangetrieben werden.

I.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Vorhaben konnte am IPF auf vorhandene fachliche und infrastrukturelle Voraussetzungen aufbauen. Dazu zählen insbesondere die langjährige Expertise in der TFP-Technologie, Erfahrungen in Drapierbarkeit und Patch-Integration sowie in der Dickenmodellierung und -auswertung. Ebenfalls verfügbar war eine für die Projektanforderungen angepasste institutseigene Labor-Wickelanlage im Forschungsmaßstab sowie etablierte Analyse- und Auswerteworkflows zur Bewertung faserverstärkter Verbundstrukturen. Darüber hinaus lagen theoretische und praktische Vorarbeiten zur Kombination von TFP-Patches mit FW-Strukturen vor, die als Ausgangsbasis für das Vorhaben dienten. Diese Grundlage erlaubte eine gezielte Erweiterung der Prozesskompetenz in Richtung hybrider TFP/FW-Strukturen.

Wesentliche Rahmenbedingungen waren zudem vorhandene Softwareumgebungen zur Pfad- und Mustergenerierung, der Zugang zu CT-Analytik für die Bauteil-/Strukturauswertung sowie Erfahrungen mit RTM-nahen Prozessketten. Ergänzend standen im Verbund weitere komplementäre Voraussetzungen zur Verfügung: EAST4D brachte eine langjährige industrielle Erfahrung in der Fertigung hochwertiger filamentgewickelter Strukturen (u. a. Druckbehälter und konische Geometrien) sowie in RTM-Prozessen auf solchen Bauteilen ein. Hightex verfügte über industrielle Erfahrung in der TFP-Fertigung und -Anwendung und unterstützte damit die praktische Überführung von TFP-Konzepten in demonstratornahe Prozessabläufe. ILK und IMA stellten zudem wesentliche Kompetenzen und Ressourcen für die Bauteilauslegung, die Herstellung/Integration von Demonstratoren sowie für die validierungsnahe Einordnung und Bewertung der Ergebnisse bereit und ermöglichten damit die Abstimmung von Randbedingungen im Verbund.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben war in mehrere Arbeitspakete gegliedert, mit Schwerpunkt am IPF auf AP2 (Dickenmodellierung und Softwareentwicklung), AP3 (TFP-Integration und Drapierkonzepte), AP4 (nicht-geodätische Wickelstrategien) sowie AP5 (Unterstützung bei Validierungsaktivitäten). Der Projektverlauf entsprach im Wesentlichen der ursprünglichen Planung und folgte über die Laufzeit einer schrittweisen Umsetzung von Methodenentwicklung und softwareseitiger Abbildung bis hin zur experimentellen Demonstration und Validierung in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern.

Im Rahmen dieses Vorgehens wurden lokale TFP-Patches als Ansatz zur Verstärkung kritischer Bereiche gewickelter Strukturen untersucht, insbesondere im Umfeld von Öffnungen. Hierzu wurden Demonstratoren mit und ohne lokal eingebrachte TFP-Patches experimentell verglichen und hinsichtlich Deformations- und Versagensverhalten ausgewertet. Parallel wurden parametrische numerische Modelle aufgebaut, welche Dickenvariationen und lokale Faserorientierungen abbilden, um TFP-Patch-Konfigurationen systematisch zu bewerten und die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf komplexere Bauteilbereiche zu unterstützen.

Methodische Anpassungen ergaben sich insbesondere im Bereich der experimentellen Umsetzung nicht-geodätischer Ablagepfade, da Reib- und Haftungseffekte stärker prozessbestimmend waren als initial angenommen. Die iterative Abstimmung zwischen Modellierung, Simulation, Software-/CAM-Entwicklung und experimentellen Versuchen diente dazu, die erzeugten Ablagepfade für die maschinelle Umsetzung unter realistischen Randbedingungen vorzubereiten.

I.4 Stand der Wissenschaft und Technik

Im Folgenden werden die relevanten Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte sowie die für das Projekt genutzte Fachliteratur und Dokumentationsquellen gemeinsam betrachtet. Die im Text referenzierte Fachliteratur ist entsprechend im Literaturverzeichnis dokumentiert.

Die Entwicklung last- und funktionsangepasster faserverstärkter Strukturen stützt sich zunehmend auf automatisierte Faserablageprozesse, da diese eine lokale Anpassung von Faserpfaden, Faserdichte und Bauteildicken ermöglichen. Etablierte Technologien für die Ablage entlang gekrümmter Bahnen sind insbesondere Automated Fiber Placement (AFP) und Automated Tape Laying (ATL), deren Anwendbarkeit jedoch durch vergleichsweise große minimale Ablageradien begrenzt ist. Für die Ermöglichung kleinerer Radien wird Fiber Patch Placement (FPP) im Stand der Technik eingeordnet, bei dem die Ablagepfade in kleine Segmente unterteilt werden, die dann in Form von ausgestanzten Patches mittels Pick-and-Place-Robotern entsprechend auf einer geometriegebenden Form platziert werden. Die damit verbundenen lokalen Unterbrechungen der Faserbänder können die mechanische Leistungsfähigkeit nachteilig beeinflussen. Vor diesem Hintergrund wird die auf Sticktechnik basierende Tailored Fiber Placement (TFP)-Technologie als besonders geeignet aus wirtschaftlichen und qualitätstechnischen Gesichtspunkten beschrieben, da sehr kleine Ablageradien realisierbar sind und die Faserablage kontinuierlich erfolgen kann. Neuere Forschungsarbeiten heben die Notwendigkeit integrierter digitaler Auslegungs- und Prozessketten hervor, um TFP-Preformen konsistent in Simulations- und Fertigungsumgebungen zu überführen [Bit19, Rap20, Rap21].

TFP beruht auf einem modifizierten Stickprozess: Ein Faserbündel (Roving) wird auf ein Basismaterial abgelegt und mittels Nähfaden fixiert. Charakteristisch ist die Herstellung einer zweidimensionalen Preform, wobei das Basismaterial je nach Anforderung später entfernt werden kann [Bit19]. Die Technologie bietet einen großen Freiheitsgrad in der variablen Anordnung und Ausrichtung der Verstärkungsfasern und ermöglicht dadurch beanspruchungsgerechte Orientierungen, beispielsweise durch mehrfaches Übersticken zur Realisierung lokaler Dickenvariationen und zur Homogenisierung von Lasten über die Fläche [Spi13]. Gleichzeitig ist der Stand der Technik stark durch die Notwendigkeit einer prozessgerechten Parametrierung geprägt: Die Ablagegenauigkeit hängt u. a. von der Verformbarkeit des Basismaterials, Stichlänge und -abstand sowie dem Nähfadenmaterial ab. Ohne geeignete Prozessparameter können deutliche Abweichungen zwischen geplantem und realem

Faserverlauf auftreten [Spi14b]. Darüber hinaus beeinflusst die Stichelänge die Faserwelligkeit, welche mit zunehmender Stichelänge zunimmt (mit potenziell negativen Effekten auf die Steifigkeit). Kürzere Stichelängen hingegen führen tendenziell zu einer geradlinigeren Faserausrichtung, erhöhen jedoch den Anteil eingebrachten Nähfadenmaterials [Spi14a, Uhl19]. Über diese makroskopischen Aspekte hinaus existieren für TFP-Strukturen auch meso-skalige Modellierungsansätze, die Faserwelligkeit und Faservolumengehalt explizit als maßgebliche Mikro- und Mesostrukturparameter für das mechanische Verhalten berücksichtigen [Uhl16].

Der industrielle Einsatz von TFP konzentriert sich bislang vor allem auf kleine bis mittelgroße Bauteile in kleinen bis mittleren Stückzahlen (Anwendungsbeispiele reichen von Luftfahrtkomponenten bis zu Konsumgütern) [Fel12, Ric15]. Der Prozess ist weitgehend automatisiert und kann durch parallele Anordnung mehrerer Stick-/Legeköpfe in der Produktivität deutlich gesteigert werden. Für 1k- bis 50k-Rovings werden Maschinengeschwindigkeiten von bis zu etwa 1000 Stiche/min erreicht. Abhängig von der Stichelänge ergibt sich ein Faserdurchsatz in der Größenordnung von 2–5 m/min, was für eine Maschine mit einem Legekopf einer Materialablage von etwa 1 kg/h entspricht. Aktuelle Entwicklungsansätze zielen auf eine weitere Steigerung der Ablageraten ab, u. a. durch neuartige Maschinen- und Systemkonzepte, wie sie in Patenten bzw. Schutzrechten beschrieben sind [Lei19, Dig13]. Eine Einordnung dieser Entwicklungen erfolgt in der Literatur unter dem Begriff „Fibre Composite Lightweight Design 2.0“ [Bit17].

Für die Bauteilherstellung und Konsolidierung von TFP-Preformen gelten Injektionsprozesse wie Resin Transfer Molding (RTM) insbesondere bei größeren Stückzahlen als vorteilhaft. Hervorzuheben sind die hohe Oberflächenqualität auf allen Bauteilseiten durch präzise definierte Werkzeugkavitäten sowie der im Vergleich zu vakuumunterstützten Verfahren (z. B. mit Vakuummembran/-folie) reduzierte Handhabungs- und Nachbearbeitungsaufwand [Bra02]. Bei letzteren wird die werkzeugabgewandte Seite durch eine flexible Membran ausgebildet, wodurch die Oberflächenqualität stärker prozessabhängig ist und in der Regel nicht das Niveau einer geschlossenen RTM-Kavität erreicht. Eine zentrale Herausforderung besteht jedoch in der Berücksichtigung lokaler Dickenvariationen von TFP-Preformen bei der Werkzeugauslegung. Die resultierenden Geometrien lassen sich häufig nur über Freiformflächen beschreiben und müssen mit entsprechendem konstruktivem und fertigungstechnischem Aufwand in die Werkzeuggeometrie übertragen werden. Zur Berücksichtigung lokaler Dickenvariationen liegen softwaregestützte Ansätze vor, bei denen das TFP-Ablagemuster als Grundlage für eine orts aufgelöste Dickenberechnung dient. Aus der resultierenden Dickenverteilung werden entsprechende Freiformflächen abgeleitet und für die Werkzeugauslegung nutzbar gemacht. Am IPF existieren hierzu Werkzeuge zur Muster-, Prozess- und Geometriebeschreibung [Bit12, Spi14b]. Darüber hinaus existieren Schutzrechte und technische Ansätze zur Herstellung faserverstärkter Bauteile mittels Injektionsverfahren, die das verfahrenstechnische Umfeld ergänzen [Fil03]. Im weiteren Sinne gilt auch die konsistente Abbildung gekrümmter Faserpfade und ihrer strukturellen Effekte in der FEM als wesentliche Grundlage für die Auslegung und Bewertung maßgeschneiderter Verstärkungsstrukturen [Mal16].

Parallel zu Fertigungs- und Werkzeugthemen stellt die Auslegung variabelaxialer (VA) Faserverbundstrukturen einen zentralen Bereich des Standes der Technik dar. Während klassische Auslegungsmethoden für konventionelle Schichtaufbauten mit einheitlicher Faserorientierung etabliert sind, erfordern VA-Strukturen eine korrekte Modellierung realer Faserpfade und die Einbindung von Fertigungsinformationen, da VA-Fasermuster häufig Variationen der Faserdichte und damit ein ungleichmäßiges Dickenprofil erzeugen. Als Ansatz zur Bewältigung dieser Herausforderung wird Direct Fiber Path Optimization (DFPO) beschrieben, das die Optimierung des Faserverlaufs unter expliziter Berücksichtigung von Fertigungsaspekten adressiert [Bit19]. Dabei werden Orientierungs- und Dickeninformationen elementweise in die FE-Modelle übertragen, sodass der reale Faserpfad bzw. die Verteilung der Rovings als Entwurfsvariable genutzt werden kann. Verbesserungen gegenüber einfacheren Entwurfsprinzipien, etwa dem Hauptspannungsentwurf, werden ebenfalls diskutiert [Bit19]. Im breiteren Kontext werden für variabelaxiale Faserverläufe in der Literatur Optimierungsverfahren vorgestellt, die den gekrümmten Verlauf der Fasern berücksichtigen. Gezeigt werden Konzepte zur Anpassung von Faserpfaden an lokale Diskontinuitäten (z. B. Bohrungen) sowie Strategien zur lokalen

Verstärkung mittels variabelaxialer Faserbündel (Variable-Angle-Tow) und entsprechende experimentelle Validierung [Zhu17, Zhu18, Mat21].

Für rotationssymmetrische Bauteile – insbesondere Druckbehälter – ist Filament Winding (FW) ein etabliertes Fertigungsverfahren im Stand der Technik. Dabei werden die Fasern (trockene Rovings oder Prepreg-Tows) auf einen rotierenden Wickelkern oder Liner abgelegt. Der Wickelwinkel wird durch das Verhältnis aus translatorischer Geschwindigkeit des Ablagekopfs und der Winkelgeschwindigkeit des Kerns/Liners definiert. Im Stand der Technik werden Helixwicklungen (schraubenförmig), Polarwicklungen (von der Bauteilmitte zu den Endkappen) und Ringwicklungen (umfangsorientiert) unterschieden. Für Druckbehälter sind polare Wicklungen besonders relevant, da sie die Endkappen- bzw. Dombereiche abdecken [Joh98, Zu07, Dal19]. Charakteristisch für FW-Bauteile sind Musterbildungen („Mosaikformen“) auf der Oberfläche, die aus der kinematischen Kopplung von Geometrie und Ablageparametern resultieren [Dal19]. Eine Übersicht zu den Vor- und Nachteilen des Verfahrens findet sich in der Literatur [Pet11], detaillierte Aspekte zur Prozessmodellierung, Herstellung und zum mechanischen Verhalten werden u. a. in Standardwerken dargestellt [Kos04].

Ein zentrales Thema in der Digitalisierung des Filament-Winding ist die mathematische Modellierung der Wickelpfade. Um den gewünschten Überdeckungsgrad (typischerweise 100 %) zu erreichen, müssen für eine gegebene Geometrie und die Prozessparameter geschlossene, flächenfüllende Trajektorien erzeugt werden. Hierfür werden CAD- und CAM-Methoden zur Auslegung und Programmierung gewickelter Strukturen eingesetzt [Joh98]. In der Literatur werden zudem Ansätze beschrieben, die neben geodätischen auch nicht-geodätische Pfade berücksichtigen, um komplexe Geometrien und spezielle Randbedingungen besser abzubilden [Zu07]. Ein allgemeineres mathematisches Modell für gewickelte Zylinder ermöglicht es, sowohl geodätische als auch nicht-geodätische Trajektorien zu erzeugen und zeigt, dass bei identischen Prozessparametern unterschiedliche Muster resultieren können [Dal19]. Insgesamt zeigt der Stand der Technik, dass zwar robuste Standardprozesse verfügbar sind, die software- und prozesseitige Absicherung nicht-geodätischer Strategien jedoch weiterhin einen erhöhten Entwicklungs- und Validierungsaufwand erfordert [Dal19, Zu07].

Zusammenfassend ist TFP als variabelaxiales Preforming-Verfahren etabliert und besonders geeignet für komplexe Faserpfade, kleine Radien sowie die lokale Anpassung von Faserdichte und Bauteildicke. Gleichzeitig ist der Erfolg stark von einer prozessgerechten Parametrierung und einer konsistenten digitalen Abbildung von Faserverlauf und Dickenprofil abhängig [Spi14a, Spi14b, Uhl19]. Filament Winding (FW) ist ein industrielles Hochleistungsverfahren für rotationssymmetrische Strukturen, wobei die Erzeugung von Trajektorien und Mustern – insbesondere für nicht-geodätische Strategien – nach wie vor einen Schwerpunkt in der methodischen und softwareseitigen Forschung und Absicherung darstellt [Pet11, Kos04, Dal19, Zu07]. In Kombination eröffnen beide Verfahren größere Freiheitsgrade in der Bauteilauslegung und ermöglichen eine effizientere, funktionsorientierte Nutzung von Verbundwerkstoffen.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen (Instituten, Firmen, Verbundpartnern)

Das IPF arbeitete eng mit den Verbundpartnern zusammen und brachte insbesondere methodische und softwareseitige Beiträge ein, die unmittelbar mit Fertigung und Validierung verzahnt waren.

Mit EAST4D erfolgte ein intensiver Austausch zur Geometrie- und Qualitätsbewertung gewickelter Strukturen: Von EAST4D gefertigte Bauteile/Strukturen wurden am IPF mittels 3D-Scans vermessen, um u. a. Rückschlüsse auf die Kompaktierung der einzelnen Schichten im Wickelprozess zu ermöglichen und die resultierende Dickenverteilung zu quantifizieren. Diese Messdaten dienten als Grundlage, um am IPF die algorithmische Beschreibung des Dickenaufbaus im FW zu verfeinern und die Modelle auf reale Bauteilzustände abzustimmen.

Mit dem ILK erfolgte eine enge Abstimmung zur Bauteilauslegung sowie zur Übertragung der IPF-Modelle und -Methoden auf bauteilrelevante Geometrien. Das IPF unterstützte das ILK u. a. bei der Bewertung von TFP-Verstärkungskonzepten sowie durch Bereitstellung von eigenen Analyse-Tools zur Auswertung von Bauteilberechnungen mit Blick auf Festigkeits-/Versagenskriterien nach Cuntze für FW+TFP-Hybridstrukturen. Für die Drapierversuche und die Vorbereitung gewickelter Probekörper erhielt das IPF vom ILK im Gegenzug wesentliche Randbedingungen und Parameter.

Mit Hightex wurde ein kontinuierlicher Informationsaustausch zu den gefertigten TFP-Strukturen gepflegt. Dies umfasste insbesondere die Abstimmung von Preform-/Patchkonfigurationen sowie den Support bei der Definition und Auslegung von Prüfstrukturen, die im Zusammenspiel zwischen Hightex und ILK hergestellt bzw. bewertet wurden. Das IPF brachte hierbei seine Erfahrung in der TFP-Technologie ein.

Die Zusammenarbeit mit der IMA konzentrierte sich auf validierungsnaher Aspekte und die Testvorbereitung. Das IPF unterstützte die Testvorbereitung durch die Bereitstellung und Einordnung von Informationen zu TFP- sowie TFP+FW-Aufbauten, um die Prüfplanung und die Interpretation der Ergebnisse im Verbund abzustimmen.

TEIL II: Eingehende Darstellung

II.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Verwendung der Zuwendung

Die Zuwendung wurde zweckentsprechend eingesetzt (vgl. auch Abschnitt II.2), um die geplanten Arbeitspakete sowohl numerisch als auch experimentell bearbeiten zu können und die hierfür erforderlichen Versuchsanordnungen und Auswertemethoden aufzubauen. Dies umfasste insbesondere den Personaleinsatz für Modellentwicklung (u. a. parametrische FE-Modelle), CAM- und Softwareentwicklung, Versuchsaufbau und -durchführung (TFP-Drapieren, Filamentwickeln) sowie Auswertung (u. a. 3D-Scannen) und Dokumentation.

Darüber hinaus wurden projektbezogen Materialien und Verbrauchsmittel für die TFP-Patch-/Preformherstellung und Wickelversuche beschafft sowie Hilfsmaterialien, die zur Infiltration und Konsolidierung der Verbundwerkstoffe erforderlich sind. Es wurden unterschiedliche Wickeldemonstratoren und Konzepte umgesetzt. Zur Realisierung der Wickelversuche dienten 3D-gedruckte Wickelkerne als Hilfsbauteile. Zur Analyse der gewickelten Strukturen wurden 3D-Scans sowie CT-Scans durchgeführt. Dienstreisen dienten der technischen Abstimmung im Verbund sowie dem Ergebnistransfer (z. B. Projekttermine/Tagungen/Messen).

Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele (TZ/MZ/SZ) und Ergebnis

Die im Vorhaben definierten Ziele gliedern sich in Technologieziele (TZ), Methodenziele (MZ) und Strukturziele (SZ). Für das Teilvorhaben des IPF sind die Ziele TZ1, TZ3 und TZ4 sowie MZ1, MZ2, MZ3 und das Strukturziel SZ3 maßgeblich.

- **TZ1 (Verbesserung der Drapierbarkeit von TFP-Preformen auf gekrümmten Oberflächen, R2500 → R100):** Im Rahmen der Arbeiten wurden verschiedene Ansätze zur Verbesserung der Drapierbarkeit untersucht und im Labormaßstab demonstriert. Als besonders geeignet stellte sich das Setzen von intelligenten Schnitten in den 2D gefertigten TFP-Preformen heraus. Die Ergebnisse verbessern die Umsetzbarkeit faserverstärkter TFP-Strukturen auf komplexen (gekrümmten) Geometrien und tragen damit zu einer effizienteren, ressourcenschonenden Fertigung bei.
- **TZ3 (Kombination von TFP und nicht-geodätischem Filamentwickeln für bauraumkonformen Tank):** Die Integration von TFP-Patches in die Filament-Winding-Strukturen wurde durch die Entwicklung gezielter Platzierungs- und Anpassungsstrategien unterstützt, insbesondere an geometrisch anspruchsvollen Stellen wie Öffnungen und Boss-Bereichen. Experimentelle und numerische Untersuchungen zeigten, dass lokale Verstärkungen die Tragfähigkeit hochbelasteter Bereiche sichern, indem Spannungsspitzen am Lochrand deutlich reduziert werden. Damit wurde die technologische Basis für die Umsetzung bauraumkonformer Hybridstrukturen geschaffen.
- **TZ4 (Befähigung der Software für den kombinierten TFP-/Filament-Winding-Prozess):** Es wurden neue Softwaretools geschaffen, die geodätische und nicht-geodätische Wickeltrajektorien erzeugen und dabei die TFP-spezifischen lokalen Dickenprofile berücksichtigen können. Die generierten Trajektorien lassen sich in maschinenlesbaren G-Code übersetzen, der vorab visualisiert werden kann, um mögliche Fehler bereits vor der Produktion zu erkennen. Außerdem kann der G-Code maschinenspezifisch exportiert werden, wodurch eine flexible Nutzung der Technologie und die Digitalisierung der Entwicklungs- und Fertigungsprozesse gewährleistet ist.
- **MZ1–MZ3 (Methoden-, Modellentwicklung und & TRL-Sprung):** Die Weiterentwicklung der Hybridprozesse von TRL 2 auf TRL 4 stützt sich auf die Kopplung von Workflow-basierten

Pfadgenerierungsmethoden, Dickenprognosen und CAM-Prozessen. Ergänzend wurde ein Tool geschaffen, das gemessene Bauteildicken (3D-Scans) mit den Vorhersagen abgleicht. Dadurch können Abweichungen frühzeitig identifiziert, die Prozessplanung effizienter gestaltet und die wissenschaftlich-technische Grundlage der Forschung an Hybridstrukturen gefestigt werden.

- **SZ3 (Leichtbaupotenzial durch lokale Patches):** Das Strukturziel wurde adressiert, indem lokale Verstärkungskonzepte (z. B. im Umfeld von Öffnungen) experimentell und numerisch abgesichert und als Auslegungsgrundlage für Ring- und Tankbereiche nutzbar gemacht wurden. Durch die gezielte Nutzung von Patchverstärkungen lassen sich Gewichtseinsparungen realisieren, ohne die Sicherheit der Struktur zu beeinträchtigen. Die Ergebnisse sind auf weitere Druckbehälter-, Ring- und angrenzende Anwendungsfelder übertragbar.

Beschreibung der Arbeiten nach Arbeitspaketen (AP)

AP2.1 (Lead IPF): Prozessgerechte Werkstoffgestaltung und -auslegung

Das Ziel dieses Arbeitspakets war die Erweiterung und Neuentwicklung von Methoden zur Modellbildung variabelaxialer (TFP-)FKV-Strukturen auf kombinierte TFP- und Wickelstrukturen (FW). Die daraus resultierenden experimentellen Untersuchungen und numerischen Modelle wurden so aufgebaut, dass sie nun direkt für die Auslegung der Ringstruktur und des H₂-Tanks genutzt werden können.

Experimentelle Untersuchungen an TFP-verstärkten Wickelstrukturen (Zylinder mit Open-Hole-Konfiguration)

Mit einem experimentellen Ansatz wurde das Konzept untersucht, ein offenes Loch in einer gewickelten Zylinderstruktur durch einen lokal aufgetragenen TFP-Patch zu verstärken. Das Loch steht dabei exemplarisch für Ein- und Ausgänge oder Verbindungselemente und ist damit direkt auf Lasteinleitungsbereiche übertragbar. Untersucht wurden fünf Probentypen mit einem Innendurchmesser von 136 mm: ein Zylinder ohne Loch als Referenz (siehe Abb. 1 und Tabelle 1), Varianten mit Lochdurchmessern von 10 mm und 20 mm ohne Verstärkung sowie entsprechende Proben, bei denen die Löcher durch TFP-Patches mit Durchmessern von 50 mm bzw. 100 mm umgeben sind. Alle Proben wurden unter axialer Kompression geprüft.

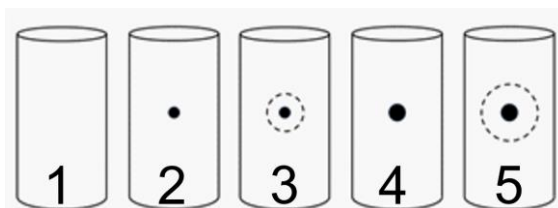


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Probentypen.

Gemäß Tabelle 1 zeigen die Messwerte, dass ein Loch von 10 mm Durchmesser ohne Patch (Probe 2) die Festigkeit im Vergleich zur Referenz deutlich reduziert und ein 20 mm Loch (Probe 4) zu einer noch stärkeren Abminderung führt; die Steifigkeit sinkt insbesondere im Fall des 20 mm Lochs spürbar (Reduktion um mehr als 24%). Werden TFP-Patches eingesetzt, so erreichen die verstärkten Proben wieder eine Festigkeit und Steifigkeit auf dem Niveau der Referenz oder sogar leicht darüber. Dies gilt sowohl für den kleineren als auch für den größeren Lochdurchmesser, obwohl der eingesetzte Patch in dieser Phase noch nicht lastpfadoptimiert ausgelegt war und nur rund ein Zehntel der Masse des gewickelten Zylinders aufweist.

Tabelle 1: Ergebnisse der Kompressionstests an den Zylindern aus Abbildung 1.

Probe	Loch- \varnothing	Patch- \varnothing	Max. Kompressionsfestigkeit		Steifigkeit	
1	-	-	61,73 kN	0.00%	13.75 kN/mm	0.00%
2	10 mm	-	53,06 kN	-14.05%	13.41 kN/mm	-2.49%
3	10 mm	60 mm	61,35 kN	-0.62%	14.66 kN/mm	6.63%
4	20 mm	-	46,75 kN	-24.27%	10.75 kN/mm	-21.82%
5	20 mm	100 mm	61,82 kN	0.15%	14.51 kN/mm	5.54%

Die Bruchbilder verdeutlichen das lokale Strukturverhalten: Bei Zylindern mit Loch ohne TFP-Verstärkung verläuft der Bruch durch die Lochregion, was die dort auftretende Spannungskonzentration widerspiegelt. Bei Proben mit TFP-Patch verlagert sich die Bruchzone dagegen in Bereiche außerhalb der verstärkten Region, sowohl beim 10 mm als auch beim 20 mm Loch. Damit wird gezeigt, dass der Patch die Beanspruchung am Lochrand deutlich reduziert und die Last wirksam auf benachbarte Zonen verteilt (siehe Abb. 2).



Abbildung 2: a) Bruchbild eines Zylinders ohne Verstärkung (Probe 2) und b) eines verstärkten Zylinders (Probe 3).

Numerische Modellierung (parametrisiertes FE-Modell)

Parallel zu den Versuchen wurde ein parametrisiertes Finite-Elemente-Modell aufgebaut, das die gleichen Proben typen abbildet. In diesem Modell werden sowohl die Dickenvariation der Wickelschichten als auch die lokale Faserorientierung explizit berücksichtigt. Dadurch können Geometrie- und Lay-up-Varianten – etwa unterschiedliche Patchdurchmesser, Wanddicken oder Faserwinkel – systematisch untersucht und ihre Auswirkungen auf Spannungsverteilungen und globale Steifigkeit bewertet werden. Für eine repräsentative Parameterkombination wurden die Spannungsverteilung im Bereich des Lochs und die resultierende Dickenverteilung über den Umfang des Zylinders berechnet. Die Ergebnisse zeigen, dass der Modellierungsansatz gut geeignet ist, das Verhalten TFP-verstärkter Wickelstrukturen realistisch abzubilden und damit auf komplexere Geometrien wie Ringsegmente oder Tankbereiche übertragen werden kann (siehe Abb. 3).

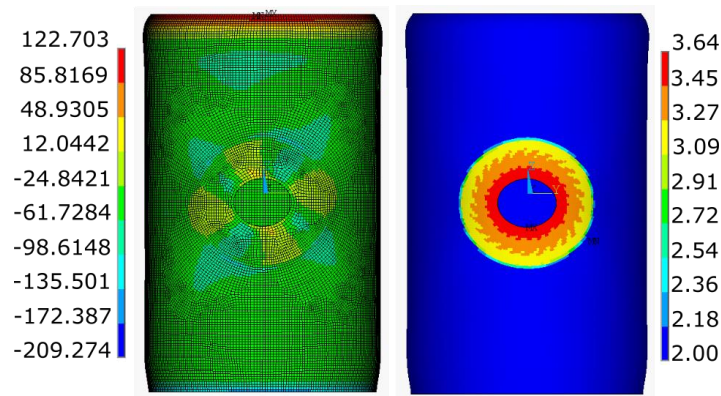


Abbildung 3: Spannungsverteilung (links, Einheit: MPa) und Dickenverteilung (rechts, Einheit: mm) eines TFP-verstärkten Zylinders mit Loch (Probe 5).

Fertigungstechnische Bewertung von FW+TFP-Strukturen (Patchanzahl/-dicke, Qualität)

Zur Bewertung fertigungstechnischer Aspekte wurden FW+TFP-Strukturen untersucht, bei denen TFP-Preformen in gewickelte Rohre integriert und unter axialer Druckbelastung geprüft wurden. Es kamen Konfigurationen mit zwei und mit drei Patches innerhalb von zwei Wickelschichten zum Einsatz; die maximalen Patchdicken lagen bei 1 mm, 3 mm und 5 mm (siehe Abb. 4). Diese Varianten ermöglichen eine gezielte Betrachtung des Einflusses von Patchanzahl und -dicke auf Laminataufbau und Qualität. Schliffbilder der hergestellten Bauteile zeigen den typischen Aufbau aus erster gewickelter Schicht, TFP-Patch inklusive Stickgrund und abschließender zweiter Wickelschicht (siehe Abb. 5).

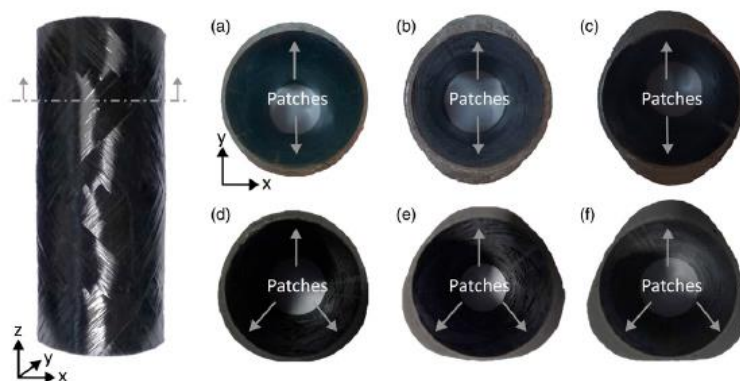


Abbildung 4: Beispiele für Patches innerhalb von zwei FW-Schichten: oben zwei Patches mit maximalen Dicken von 1 mm, 3 mm und 5 mm; unten drei Patches mit denselben Dicken.

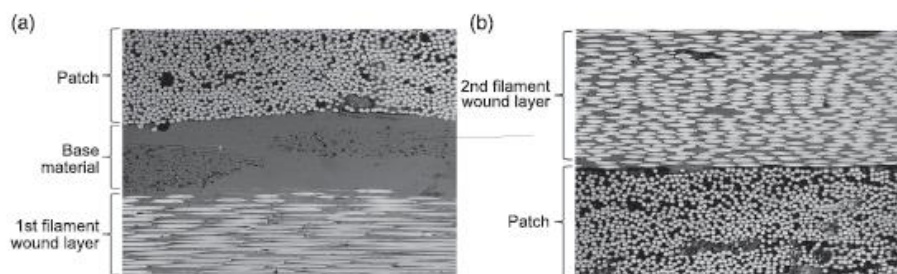


Abbildung 5: Schliffbild des FW+TFP-Bauteils, (a) erste gewickelte Schicht und TFP-Patch (inkl. Stickgrund), (b) Patch mit zweiter gewickelter Schicht.

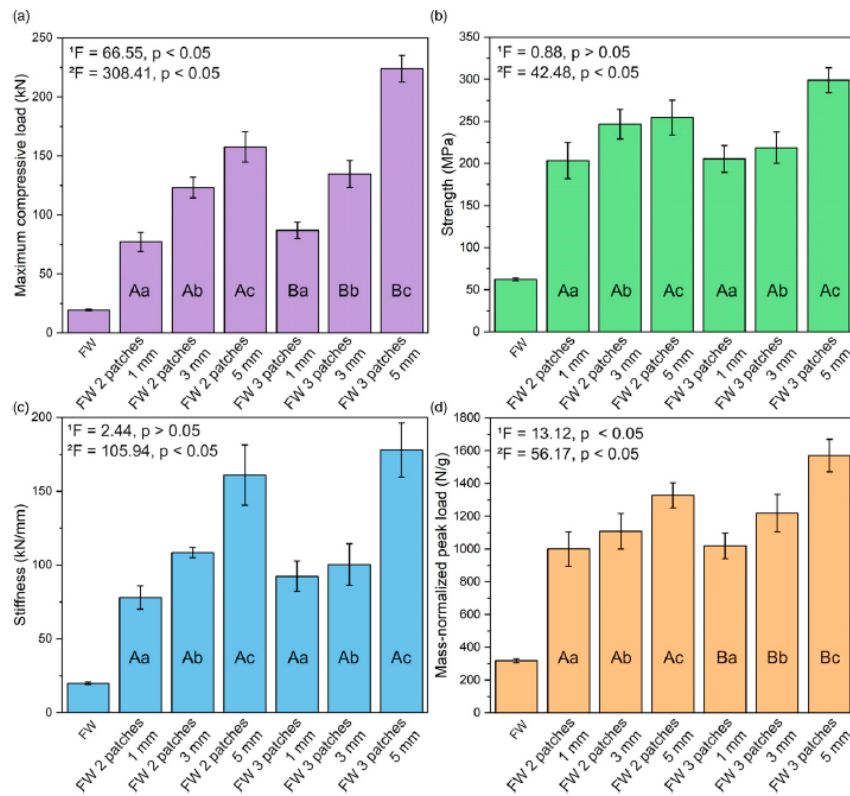


Abbildung 6: Vergleich der mechanischen Leistungsfähigkeit der geprüften Zylinder. Siehe Abb. 4 für die Konfiguration der Probekörper.

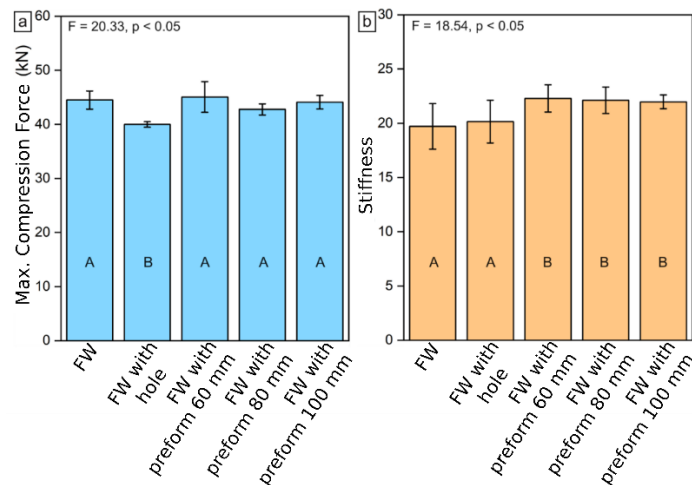


Abbildung 7: Ergebnisse von axialen Drucktests an Zylindern: (a) Druckkraft, (b) Steifigkeit; A und B (innerhalb der Balken) beziehen sich auf einen statistischen ANOVA-Test.

Mechanische Charakterisierung von FW+TFP-Zylindern

Auf Basis dieser fertigungstechnischen Untersuchungen wurde das mechanische Verhalten der FW+TFP-Strukturen detailliert charakterisiert. Die Integration von TFP-Patches führt zu einer deutlichen Erhöhung aller betrachteten Kennwerte; in einer Konfiguration konnte die Druckfestigkeit um etwa 300 % gegenüber einer ungepatchten Referenz gesteigert werden (siehe Abb. 6).

Die Versuche wurden bewusst an einfachen zylindrischen Geometrien durchgeführt, um das Strukturverhalten klar interpretieren zu können. Die gewonnenen Erkenntnisse sind jedoch direkt auf komplexere Bauteilbereiche, insbesondere die Bossregion von Druckbehältern, übertragbar. In dieser

Zone wird die Faserorientierung in einem reinen Wickelprozess primär durch die Wickelkinematik bestimmt und lässt sich mechanisch nur eingeschränkt optimieren. Durch lokal integrierte TFP-Patches können dagegen gezielt Faserorientierungen vorgegeben werden, etwa eine verstärkte axiale Ausrichtung (0° -Orientierung), die im reinen Wickelprozess nicht erreichbar ist.

TFP-Verstärkung von Einfüllöffnungen (Loch in Tankmitte) und DIC-Analyse

Für die Befüllung mit Wasserstoff ist in der Mitte des Tanks eine Öffnung vorgesehen, die in Analogie zu den ersten Voruntersuchungen experimentell durch Zylinder mit einem Loch von 40 mm Durchmesser nachgebildet wurde, einmal ohne als auch mit TFP-Patches mit den Durchmessern 60 mm, 80 mm und 100 mm. Die Ergebnisse der axialen Druckversuche zeigen, dass Zylinder mit patchverstärktem 40 mm Loch Festigkeiten erreichen, die statistisch auf dem Niveau von Zylindern ohne Loch liegen, während Zylinder mit Loch ohne Patch deutlich geringere Festigkeiten aufweisen (siehe Abb. 7).

Die Versuche wurden mittels digitaler Bildkorrelation ausgewertet. Für Proben mit 40 mm Loch ohne Patch zeigt das Dehnungsfeld eine klare Konzentration unmittelbar am Lochrand, was mit den reduzierten Festigkeiten korrespondiert (siehe Abb. 8). In Proben mit 40 mm Loch und 100 mm Patch verschiebt sich das Dehnungsmaximum in den Verstärkungsbereich, und das lokale Spannungsniveau am Lochrand sinkt deutlich (siehe Abb. 9).

Die Kombination aus Kraft-Dehnungs-Kurven, Bruchbildern und DIC-Auswertung zeigt damit, dass die TFP-Verstärkung nicht nur die globalen Kennwerte verbessert, sondern insbesondere die lokale Lastumlagerung im Bereich der Öffnung wirksam beeinflusst. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden zur Veröffentlichung in einem wissenschaftlichen Journal eingereicht.

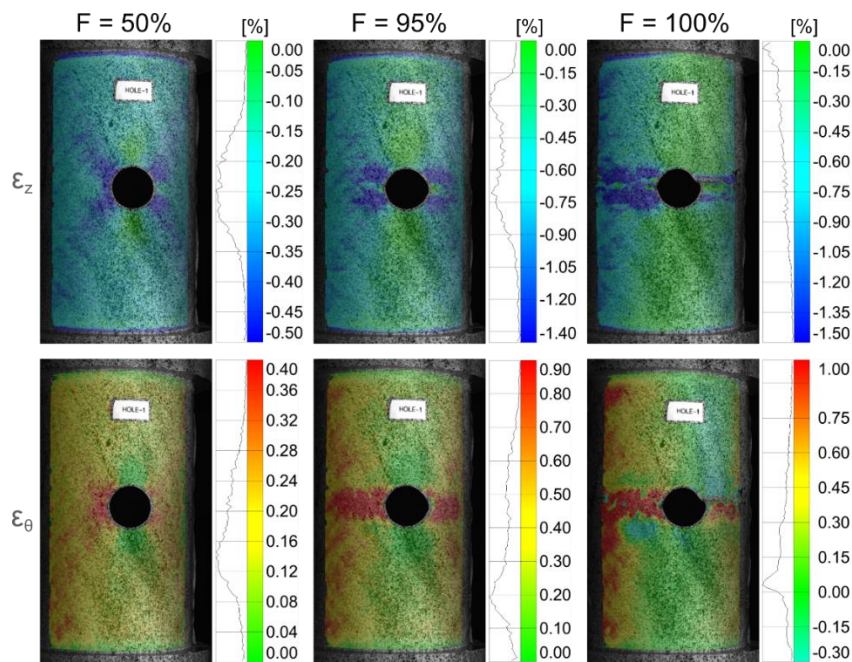


Abbildung 8: Druckversuch an einem Probekörper mit 40-mm-Loch.

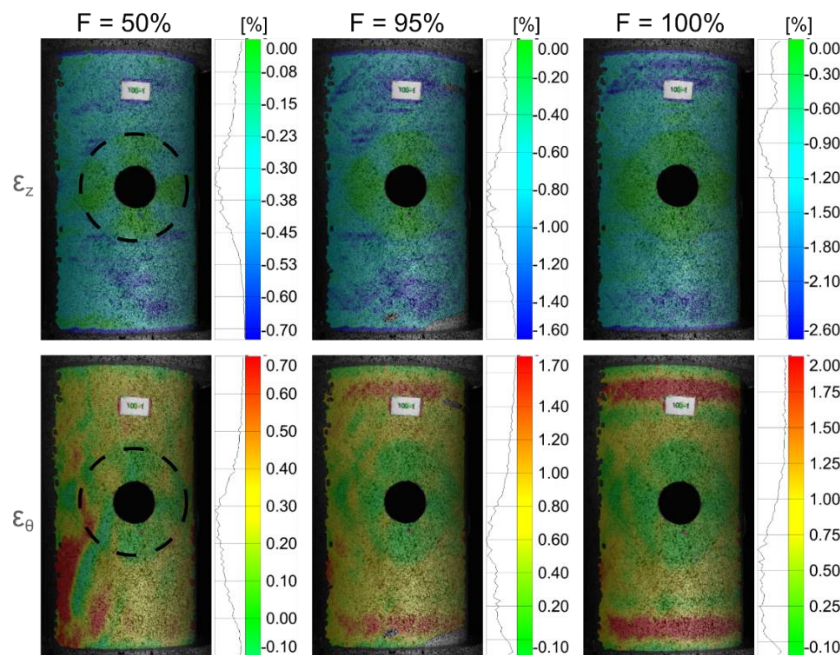


Abbildung 9: Druckversuche an einem Probekörper mit 40 mm Loch und 100 mm Patch (gestrichelte Linie).

AP2.2 (Lead ILK): Gestaltung und Auslegung einer neuartigen TFP-Ringstruktur

Das Ziel dieses Arbeitspakets war die Entwicklung einer Gesamtmethodik zur Gestaltung und Auslegung einer neuartigen TFP-Ringstruktur. Aufbauend auf den in AP2.1 entwickelten Modellierungsansätzen wurden geeignete Auslegungsstrategien definiert, mit denen sich die Vorteile variabelaxialer TFP-Verstärkungen auf die Ringgeometrie übertragen ließen.

Der in AP2.1 erarbeitete Modellierungsansatz ist prinzipiell unabhängig von der Bauteilgeometrie und konnte daher direkt für die Auslegung der Ringstruktur genutzt werden. Im Rahmen von AP2.2 wurde der Projektpartner ILK bei der Festlegung der Faserorientierungen in den TFP-Patches unterstützt, um die mechanische Leistungsfähigkeit der gewickelten Struktur im Ringbereich zu verbessern. Die experimentellen und numerischen Ergebnisse aus AP2.1 flossen in die Auswahl und Bewertung der TFP-Verstärkungsmuster für die Ringstruktur ein und wurden in den vom ILK entwickelten Ringkonzepten berücksichtigt.

AP2.3 (Lead E4D): Gestaltung und Auslegung eines bauraumkonformen H₂-Tanks

Ziel dieses Arbeitspakets war die Auslegung eines bauraumkonformen H₂-Tanks mit kombinierter TFP-/FW-Struktur. Die in AP2.1 entwickelten Methoden zur Modellierung TFP-verstärkter Zylinder sowie die dort gewonnenen experimentellen Ergebnisse wurden hierzu auf die Tankstruktur übertragen, sodass sowohl globale Lastpfade als auch lokale Verstärkungsbereiche konsistent berücksichtigt werden konnten.

Ein zentraler Aspekt war die Übernahme des in AP2.1 entwickelten Lochkonzepts. Dieses Konzept wurde in AP2.3 auf eine Öffnung in der Tankmitte angewandt (siehe Abb. 10), die der Aufnahme eines Verbindungselements dient. In diesem Bereich ist die Krümmung des Tanks in axialer Richtung gering, sodass die dortigen Spannungszustände gut mit den im Zylinder untersuchten Fällen vergleichbar sind. Auf diese Weise konnte die in AP2.1 ermittelte Wirksamkeit der TFP-Verstärkung – insbesondere die Reduktion der Spannungskonzentration am Lochrand – direkt genutzt werden.



Abbildung 10: Schematischer Aufbau des Wasserstofftanks mit Lochstruktur für ein Verbindungselement in der Mitte des Tanks (Abbildung vom Projektpartner ILK).

Darüber hinaus wurde die Form des Druckbehälters unter Berücksichtigung des mechanischen Einflusses der TFP-Patches optimiert. Dies betraf sowohl den Bereich der Tankmitte als auch angrenzende Zonen, in denen die Wickeltrajektorien durch die lokale Aufdickung und die veränderte Geometrie beeinflusst werden. Die aus diesen Untersuchungen abgeleiteten Informationen wurden den Projektpartnern zur Verfügung gestellt und zur Unterstützung der weiteren Tankauslegung, der Anpassung der Wickeltechnologie sowie der nachfolgenden Arbeitspakete genutzt.

AP3.2 (Lead HGT): Anlagen- und Softwareanpassung TFP-Automat

Ziel dieses Arbeitspakets war es, das Verständnis über die Drapierbarkeit von TFP-Preformen zu vertiefen und darauf aufbauend einen Drapier-Algorithmus für die CAM-Software zu entwickeln. Hierfür stellte das IPF eine CAM-Software zur Verfügung, die die Herstellung von TFP-Preformen unterstützt, und führte begleitende Versuche durch, in denen die beim Drapieren auftretenden Dehnungen erfasst und gezielt verringert wurden.

Die Software EDOstructure bietet zwei grundsätzliche Möglichkeiten zur Verbesserung der Drapierbarkeit: Das Setzen von Schnitten in Preformen sowie das Drapieren ohne Schnitte. Innerhalb von AP3.2 wurde der Einsatz intelligenter Schnitte untersucht, während der Ansatz ohne Schnitte in AP3.3 verfolgt wurde. Ziel war es, ein Schnittkonzept zu entwickeln, mit dem sich gestickte Preformen an stark gekrümmte Geometrien anpassen lassen, ohne die gewünschte Faserorientierung zu verlieren.

Für die Bossregion des Wasserstofftanks wurde ein spezifisches Schnittverfahren entwickelt (siehe Abb. 11). Ausgangspunkt war die dreidimensionale Geometrie der Bossregion, aus der zunächst eine ebene projizierte Fläche abgeleitet wurde. Auf dieser Ebene wurden Schnittlinien definiert und das TFP-Muster so angeordnet, dass nach dem Zuschneiden und Fügen der Bereiche eine drapierfähige Preform entstand, die an die gekrümmte Bossgeometrie angepasst werden konnte und gleichzeitig die vorgesehene Faserorientierung abbildete.

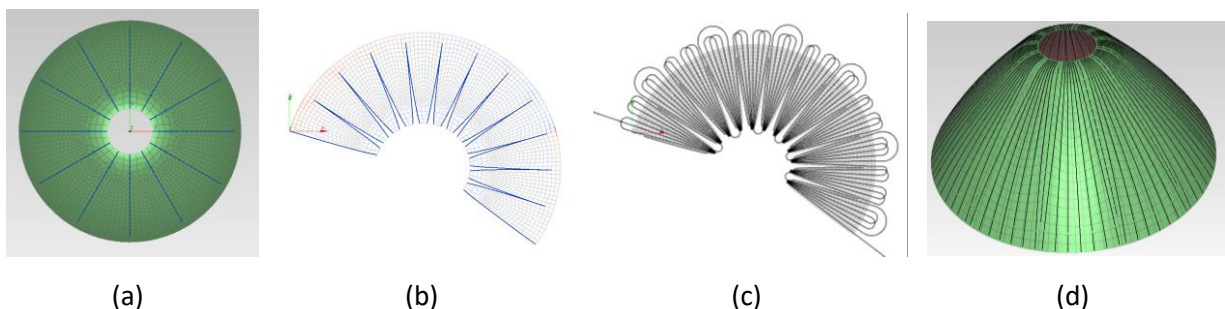


Abbildung 11: Intelligentes Schnittverfahren, wobei (a) die Schnittbereiche, (b) die abgewickelte Fläche, (c) das Muster der TFP-Preformen und (d) die Faserorientierung auf der ursprünglichen Oberfläche darstellt.

Das Ergebnis des Schnittverfahrens war eine maßstabsgetreue Abbildung des Druckbehälters, in der sowohl die Positionierung des Patches als auch die ebene und die dreidimensional verformte Geometrie der Preform sichtbar wurden. Dies wurde an einem skalierten H_2 -Tank demonstriert, bei dem die Lage des Patches auf der Tankoberfläche und die drapierte Form der Preform miteinander verglichen wurden (siehe Abb. 12). Die virtuelle Umsetzung in der Software wurde dadurch gleichzeitig vereinfacht

und präzisiert, sodass sich die Anwendbarkeit des Verfahrens am skalierten Demonstrator klar nachweisen ließ.

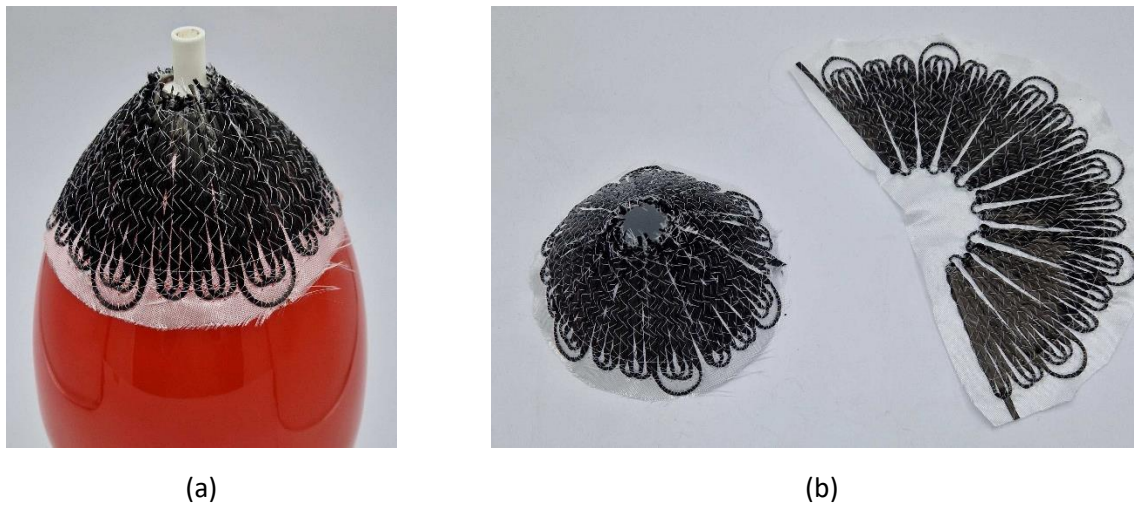


Abbildung 12: Das Schnittverfahren führt zu einer maßstabsgetreuen Abbildung des Druckbehälters und zeigt (a) die Positionierung des Patches und (b) den Patch mit seiner ebenen und drapierten Geometrie.

Die in AP3.2 erzielten Ergebnisse zu den intelligenten Schnitten führten zu deutlich verbesserten Drapier-Ergebnissen im Vergleich zu Versuchen ohne Schnitte und wurden daher als Grundlage für die Auslegung der Patches am H₂-Tank genutzt. Gleichzeitig lieferten sie wesentliche Erkenntnisse für die Gestaltung von TFP-Preformen auf komplex gekrümmten Oberflächen und bereiteten die weitergehenden Untersuchungen in AP3.3 vor.

AP3.3 (Lead HGT): Technologieversuche der erweiterten TFP-Technologie

Ziel dieses Arbeitspakets war die Weiterentwicklung der TFP-Technologie hinsichtlich der Ablage von Preformen auf stark gekrümmten Oberflächen. Der Fokus lag dabei auf der Drapierbarkeit von TFP-Preformen im Bossbereich des Wasserstofftanks mit einem Radius von ca. 40 mm, um den Einsatz von TFP-Patches in diesem Bereich experimentell zu untermauern. Als erster Schritt wurde eine TFP-Preform mit einem $\pm 54^\circ$ -Lay-up und einer Dicke von ca. 2 mm auf einem Glasfaser-Stickgrundgewebe mit 102 g/m² untersucht (siehe Abb. 13). Die $\pm 54^\circ$ -Orientierung entspricht in der Praxis näherungsweise dem klassischen Helixwinkel für filamentgewickelte Druckbehälter und stellt damit eine zentrale Verstärkungsrichtung für die Tankstruktur dar. Die Versuche zeigten jedoch, dass die Kombination aus Stickgrundgewebe und Rovings in dieser Konfiguration zu steif war, um eine fehlerfreie Drapierung auf der kugelförmigen Geometrie zu ermöglichen: Es traten ausgeprägte Falten und Faserverwerfungen auf. Damit wurde deutlich, dass eine grundlegendere Betrachtung des Drapierverhaltens auf Ebene des Basistextils erforderlich ist.

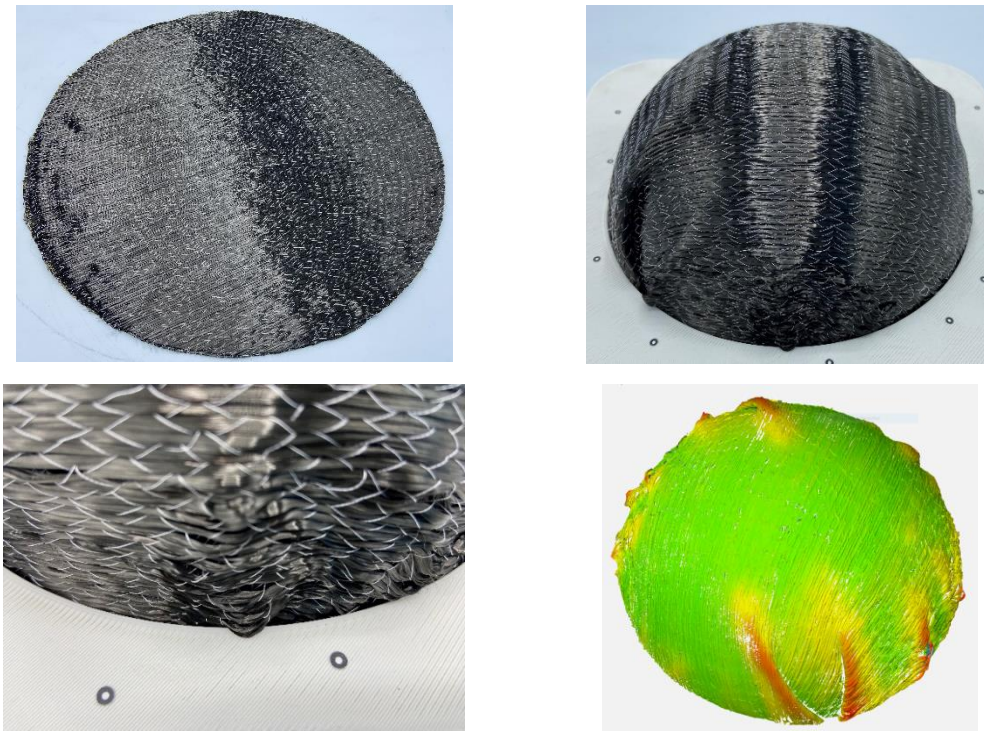


Abbildung 13: Beispiel einer drapierten Probe mit $\pm 54^\circ$ -Orientierung (2 mm dick).

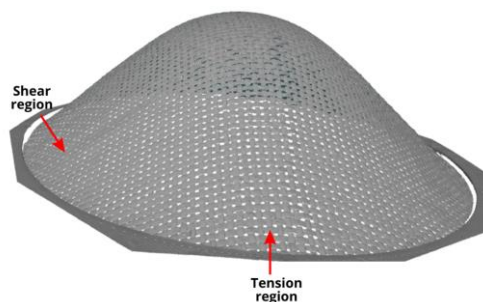


Abbildung 14: Scher- und Zugbereiche des auf der Halbkugel drapierten Gewebes aus Glasfasern.

Grundlagenversuche zur Drapierbarkeit von Stickgrundgeweben

Im nächsten Schritt wurden halbkugelförmige Drapierversuche mit einem Glasfaser-Stickgrundgewebe durchgeführt. Die Auswertung der 3D-Scans zeigte eine typische Aufteilung in Scher- und Zugbereiche: Bereiche mit einer Orientierung von etwa $\pm 45^\circ$ zur Hauptzugrichtung deformierten überwiegend durch Scherung, während im $0^\circ/90^\circ$ -Orientierungsbereich Zugdehnungen dominierten und eine weitere Formanpassung deutlich behinderten (siehe Abb. 14). Diese zonale Aufteilung bildete die Basis für die Beurteilung der Drapierfähigkeit.

Um die Drapierung zu verbessern, wurden die Ränder des Stickgrundgewebes mit einem Klemmsystem fixiert (siehe Abb. 15). Dieses System hält die Geweberänder mit definiertem Anpressdruck und erlaubt gleichzeitig ein kontrolliertes Gleiten innerhalb des Rahmens, sodass eine Grundspannung erhalten bleibt.

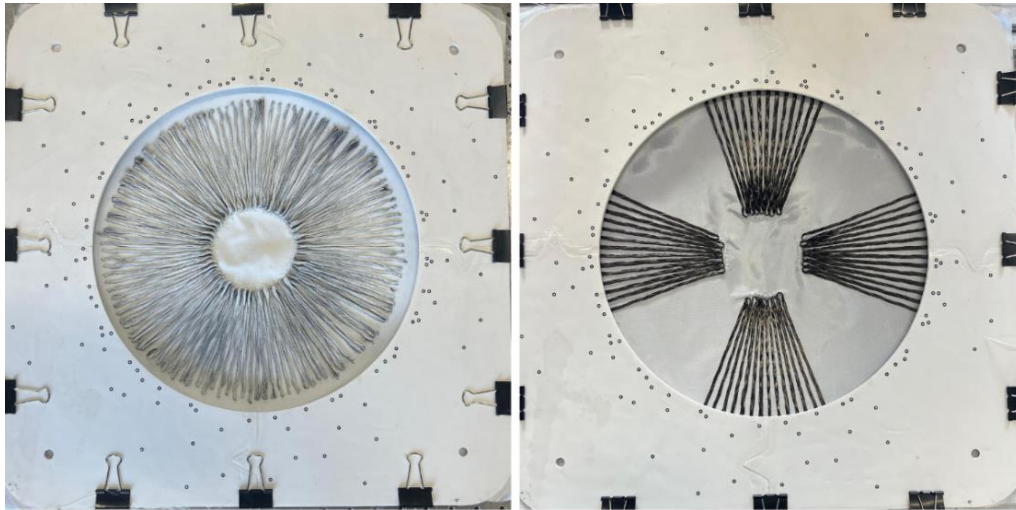


Abbildung 15: Klemmsystem mit einer Vielzahl aufgebrachter Marker für den späteren 3D-Scan des drapierten Textils.

Die 3D-Scans zeigen, dass sich Falten und nicht-radialsymmetrische Verwerfungen deutlich reduzieren, wenn das Klemmsystem eingesetzt wird. Ohne Randfixierung treten ausgeprägte Wellen auf; mit Klemmsystem ergeben sich deutlich gleichmäßigere, annähernd ringförmige Muster, was auf ein verbessertes Drapierverhalten hinweist (siehe Abb. 16).

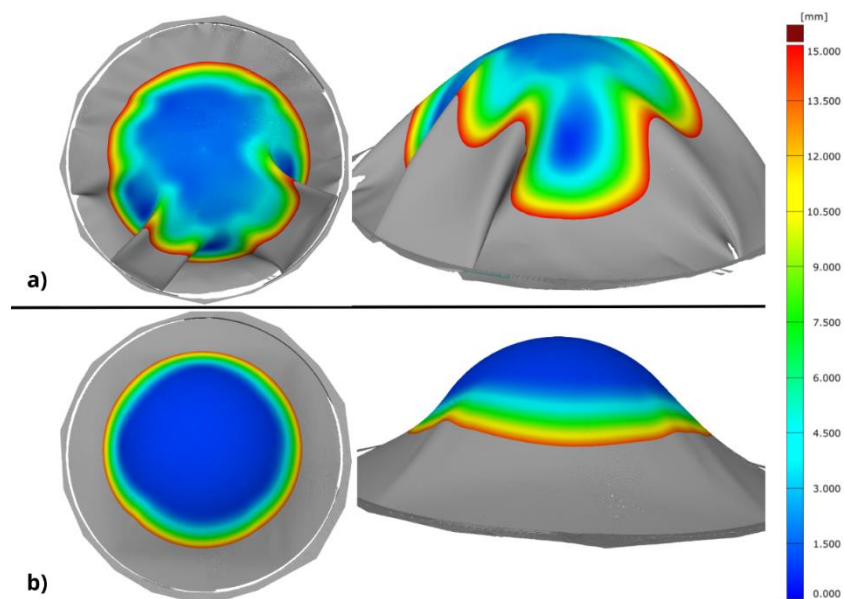


Abbildung 16: Drauf- und Seitenansicht der 3D-gescannten Drapierversuche mit Glasfaser-Stickgrundgewebe: (a) ohne und (b) mit Klemmsystem. Die Farben geben den Abstand des Gewebes von der kugelförmigen Oberfläche (Radius 100 mm) an. Nicht-radialsymmetrische Farbverteilungen deuten auf Wellen- oder Faltenbildung hin, wohingegen ein gutes Drapierergebnis sich demnach in der Draufsicht durch ringförmige Farbverläufe äußert.

Die Versuche wurden anschließend mit einem Kohlenstofffaser-Körper-Textil wiederholt. Aufgrund seiner hohen Flexibilität und Gleitfähigkeit passte sich dieses Material sehr gut an die kugelförmige Geometrie an und zeigte bereits ohne zusätzliche Randfixierung ein gutes Drapierverhalten. Gleichzeitig erlaubten die leicht verschiebbaren Fasern jedoch relativ große Lageänderungen, was aus Sicht der TFP-Prozessgenauigkeit nachteilig ist. Im Vergleich dazu bot das Glasfaser-Stickgrundgewebe in Kombination mit dem Klemmsystem einen ausgewogeneren Kompromiss aus Drapierbarkeit und Positionstreuung (siehe Abb. 17).

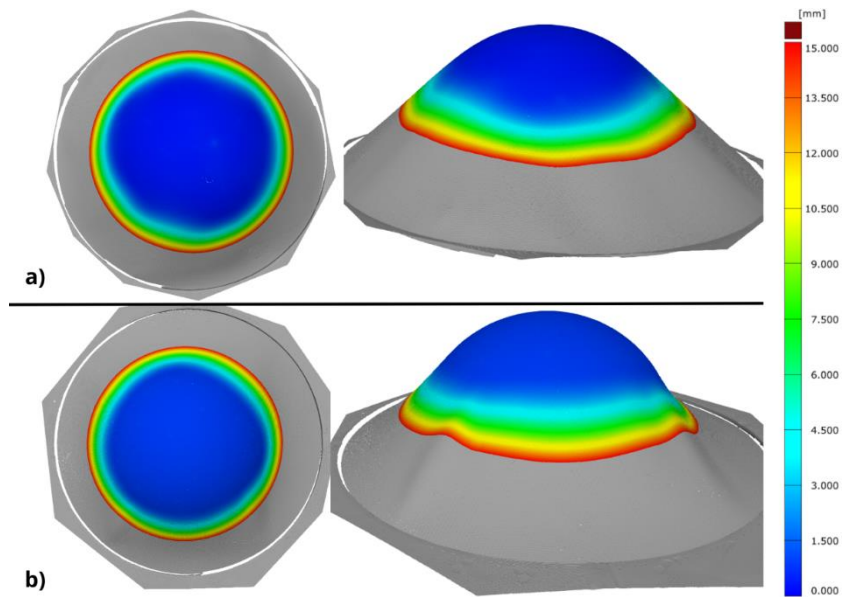


Abbildung 17: Drauf- und Seitenansicht der 3D-gescannten Drapiertests mit Kohlenstofffaser-Körper-Textil: (a) ohne und (b) mit Klemmsystem.

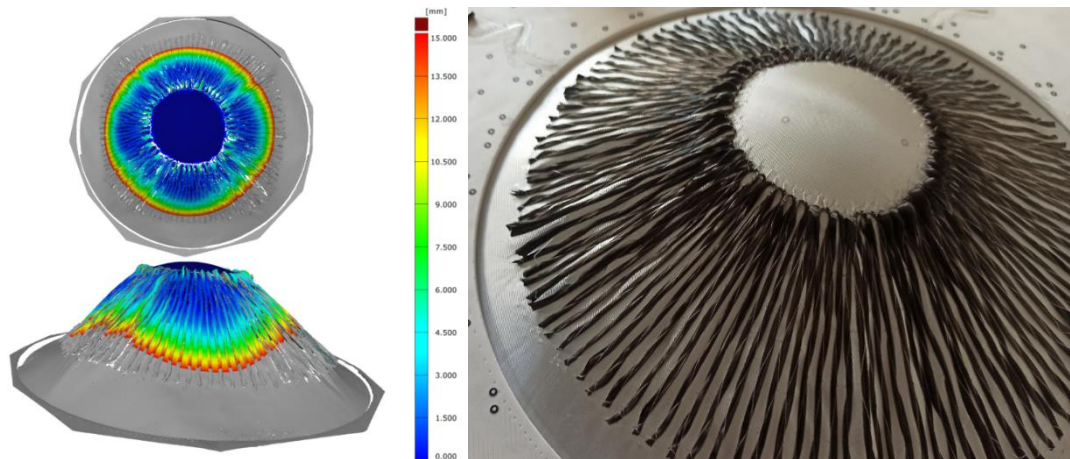


Abbildung 18: Drauf- und Seitenansicht der TFP-Preform mit radialem Ablagemuster: In den Scherbereichen ($\pm 45^\circ$ -Orientierung des Rovings relativ zur $0^\circ/90^\circ$ -Orientierung des Stickgrunds) ist eine Wellenbildung des Stickgrunds zu erkennen (links).

Drapiierbarkeit von TFP-Preformen

Aufbauend auf den reinen Gewebeversuchen wurden TFP-Preformen untersucht, bei denen Verstärkungsrovings auf den Stickgrund gestickt wurden. Ein Beispiel ist eine radiale Preform, bei der die Rovings auf den Mittelpunkt zulaufen. Ohne Modifikationen schränkt ein solches Muster die Drapiierbarkeit stark ein, da die radial orientierten Rovings nur begrenzte Verschiebungen in ihrer Längsrichtung zuließen. Zur Verbesserung wurden die Umlenkpunkte der Rovings aufgetrennt, sodass sich die Fasern innerhalb der durch das Stickgarn definierten Kanäle bewegen konnten. Dieser manuelle Schritt ließe sich in einem industriellen Prozess durch geeignete Stanzwerkzeuge automatisieren.

Trotz dieser Maßnahme blieb in den Scherbereichen weiterhin eine Wellenbildung erkennbar, was auf verbleibende Verformungsspannungen hinweist (siehe Abb. 18). Zur weiteren Verbesserung wurde ein zweiteiliges Preformkonzept entwickelt: Anstelle einer einzigen, zirkulär geschlossenen Preform kamen zwei um 45° -gedreht-überlappende Teilpreformen vorgesehen, die jeweils in den starken scherverzerrten Bereichen des Stickgrunds, die eine Wellenbildung begünstigen, ohne TFP-Faserverstärkung versehen sind und somit die Drapierung verbessern (siehe Abb. 19).

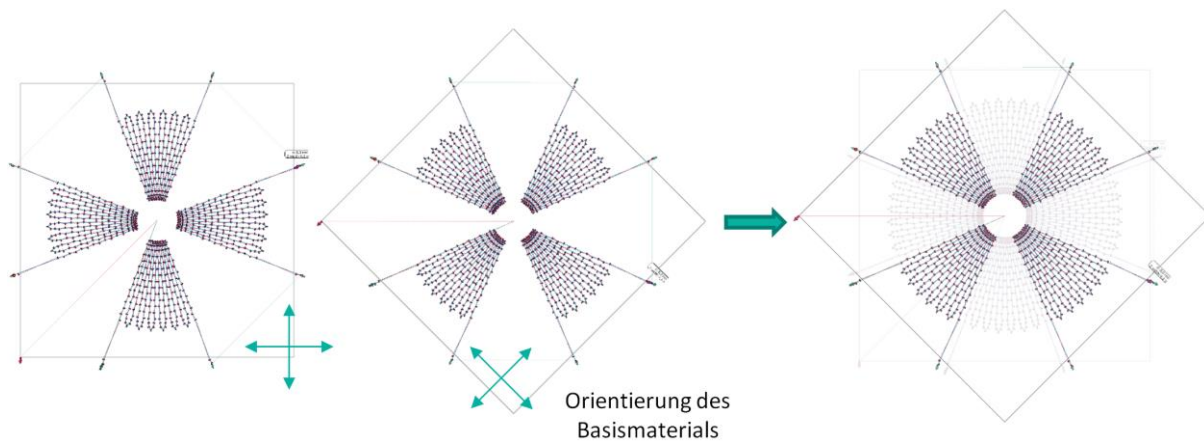


Abbildung 19: Zweiteiliges Preformkonzept zur Vermeidung von Wellen-/Faltenbildung.

Beitrag zu Patch- und Tankkonzepten

Die in AP3.3 gewonnenen Erkenntnisse zur Drapierbarkeit von Stickgrundgeweben und TFP-Preformen wurden so aufbereitet, dass sie nicht nur für den H₂-Tank, sondern allgemein für TFP-Anwendungen auf doppelt gekrümmten Oberflächen nutzbar sind. Sie flossen in die Auslegung der Patches in den Endkappen- und Bossbereichen ein und ergänzten die in AP3.2 entwickelten Konzepte des intelligenten Zuschnitts. Im Vergleich zu Versuchen ohne Zuschnitt zeigte sich, dass eine Kombination aus geeigneter Textilauswahl, Randfixierung, Segmentierung der Preform und – wo sinnvoll – dem Entfernen des Stickgrunds die Drapierbarkeit deutlich verbessert und damit die Grundlage für eine verlässliche Umsetzung der TFP-Patches auf der Tankstruktur bildet.

AP3.4 (Lead HGT): TFP-Preformherstellung eines gekrümmten Ringsegments

Ziel dieses Arbeitspakets war die Herstellung von TFP-Preformen für ein gekrümmtes Ringsegment, basierend auf der in AP2.2 entwickelten Ringstruktur und den erweiterten CAM-Algorithmen aus AP3.2. Die Preformen sollten sich durch Drapieren an die Krümmung des Ringsegments anpassen und gleichzeitig die angestrebte lastgerechte Faserorientierung bereitstellen.

Im ersten Projektabschnitt wurden die vom IPF bereitgestellten Softwarewerkzeuge EDOpath und EDOstructure in die Arbeitsabläufe der Projektpartner integriert. Auf Basis der Ringauslegung wurden Patchlayouts definiert und mit EDOpath/EDOstructure in konkrete Preform-Designs überführt. EDOstructure wurde um Funktionen erweitert, die einen „intelligenten Schnitt“ der Preformen ermöglichen und in der virtuellen Umgebung anzeigen, welche Verformungen beim Drapieren auf das gekrümmte Ringsegment zu erwarten sind. Auf diese Weise konnten kritische Bereiche und ungünstige Schnittlinien bereits in der Auslegungsphase erkannt und angepasst werden.

Im weiteren Projektverlauf verlagerte sich der Schwerpunkt von der rein virtuellen Auslegung auf die praktische Umsetzung der TFP-Preformen durch die Industriepartner. Hightex fertigte die Preformen auf dem TFP-Automaten, während das ILK für die anschließende Konsolidierung der Ringsegmente verantwortlich war. Das IPF begleitete diese Arbeiten technisch, sowohl im Austausch in gemeinsamen Projekttreffen als auch durch bilaterale Abstimmungen zu Layout, Zuschnittsstrategie und Drapieransätzen. Erkenntnisse aus den Drapieruntersuchungen und Patchkonzepten anderer Arbeitspakete wurden gezielt eingebunden, um alternative Umsetzungsvarianten für Aufbau und Handhabung der Patches im Ringsegment zu identifizieren.

Damit wurde in AP3.4 eine durchgängige Prozesskette von der virtuellen Auslegung bis hin zu gefertigten TFP-Preformen für das gekrümmte Ringsegment etabliert und die Grundlage für eine nachfolgende strukturelle Validierung im Gesamttankkonzept geschaffen.

AP4.2 (Lead E4D): Anlagen- und Softwareanpassung Wickelmaschine

Ziel dieses Arbeitspakets war die Anpassung von Hard- und Software der Wickelmaschinen, sodass explizit **nicht-geodätische** Faserablagen ermöglicht wurden und gewickelte Bauteile mit integrierten TFP-Patches konsistent abgebildet werden konnten. Kommerzielle Wickelsoftware zur Bahn- und Maschinencode-Generierung (z. B. CADWIND®) bietet bislang keine Möglichkeit, (TFP-)Patches direkt in die Wickeltrajektorien zu integrieren. Die Einführung lokaler TFP-Verstärkungspatches verändert jedoch die lokale Oberflächengeometrie des Wickeldorns, sodass das Wickelmuster angepasst werden muss und der mechanisch optimale Wickelwinkel mit Standardsoftware nicht mehr zuverlässig erreicht werden kann.

Auf der Anlagenseite war es daher erforderlich, nicht-geodätische Trajektorien über den gesamten Dorn fahren zu können und nicht nur in den Umkehrzonen an den Polen. Hierzu wurden Anpassungen in der Maschinensteuerung umgesetzt, ergänzt durch kleinere mechanische Modifikationen, die die Rovingablage am Dorn erleichtern und reproduzierbare Ablagebedingungen schaffen.

Auf der Softwareseite wurde die Beschreibung der Wickeltrajektorien von rein geodätischen hin zu nicht-geodätischen Bahnen erweitert. Die nicht-geodätischen Trajektorien werden durch eine verallgemeinerte Bahnbeschreibung erfasst, in der neben Faserwinkel, Wickelachse und Dornradius explizit auch der Reibungskoeffizient (λ) eingeht. Im Gegensatz dazu lassen sich geodätische Trajektorien allein über den letzten Term der Gleichung beschreiben. Erste Validierungsstudien der erzeugten Trajektorien wurden bewusst im zylindrischen Umkehrbereich durchgeführt, da sich die Gleichung dort deutlich vereinfacht und damit einen gut kontrollierbaren Referenzfall für die Softwareentwicklung bietet. Für unterschiedliche Reibungswerte wurden die Umkehrzonen experimentell untersucht; die Auswertung zeigte, dass eine Verringerung des Reibungskoeffizienten zu deutlich größeren Umkehrzonen führt und somit einen ausgeprägten Einfluss auf den erreichbaren Faserverlauf hat (siehe Abb. 20).

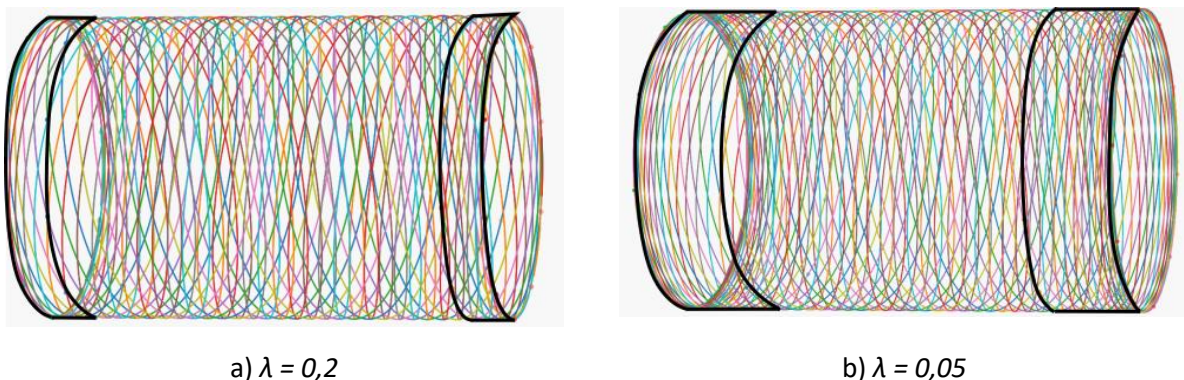


Abbildung 20: Einfluss des Reibungsfaktors λ auf die Größe der (hier schwarz markierten) Umkehrzone. Die Umkehrzone in (b) ist viermal größer als in (a).

Auf dieser Grundlage wurde schrittweise eine CAM-Lösung zur nicht-geodätischen Faserablage entwickelt. In einem ersten Schritt wurden nicht- bzw. teil-geodätische helikale Wicklungen auf Zylindern ohne Patches betrachtet. Hierzu wurde ein am IPF entwickelter Algorithmus („IPF-Ansatz“) direkt mit der kommerziellen Software CADWIND® verglichen. Die Ablagegenauigkeit wurde experimentell sowohl an der Laborwickelmaschine des IPF als auch an der industriellen Wickelanlage bei EAST-4D validiert. In Kooperation mit EAST-4D wurden zwei Wickelversuche mit jeweils drei Schichten durchgeführt: ein Versuch mit einem einzelnen Roving, um Ablagegenauigkeit und Dickenverteilung für eine Einzelfaser zu bewerten, und ein Versuch mit drei parallel geführten Rovings zur Steigerung der Produktivität. Die parallele Ablage erhöht die Komplexität sowohl der Faserablage als auch der Dickenmodellierung, da drei Rovings sich nicht einfach wie ein breiter Roving verhalten; insbesondere in den Umkehrzonen führen unterschiedliche lokale Faserneigungen und lokale Aufsplittungen zu deutlich veränderten Laminataufbauten. Nach jeder Lage wurde die gewickelte Oberfläche mittels 3D-Scan vermessen; die Maschinencode-Generierung erfolgte gemeinsam durch EAST-4D und IPF (siehe Abb. 21).

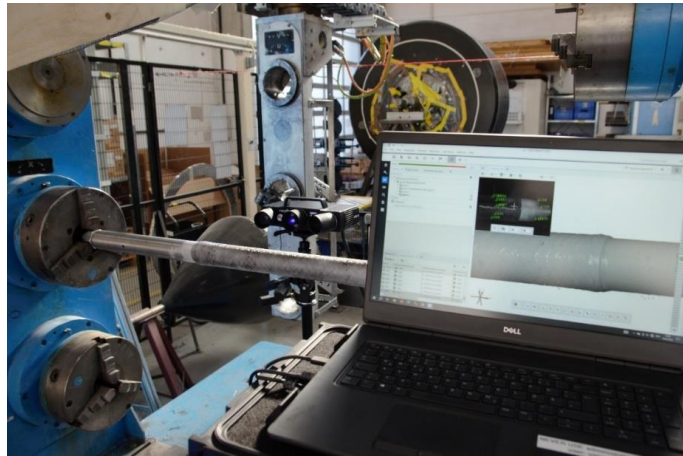


Abbildung 21: Gewickelte Schicht aus Carbonfasern bei EAST-4D mit 3D-Scan der Oberfläche.

Ein zentrales Ergebnis dieser Untersuchungen war, dass die in CADWIND® implementierte Dickenberechnung für die Ableitung von RTM-Werkzeuggeometrien mit lokal definierten Fasergehalten nicht hinreichend genau ist – insbesondere in nicht-geodätischen Bereichen wie Umkehrzonen und bei integrierten TFP-Patches. Der am IPF für TFP-Strukturen validierte Ansatz zur Dickenberechnung wurde daher so erweitert, dass er auch auf Wickellamine angewendet werden kann. Im Unterschied zu klassischen Methoden, die Rovings als einfache Rechtecke modellieren, beschreibt der IPF-Ansatz den lokalen Aufbau jedes einzelnen Rovings durch ein Gauß-Profil und berücksichtigt damit auch das „Ineinandergreifen“ benachbarter Rovings über mehrere Lagen (siehe Abb. 22).

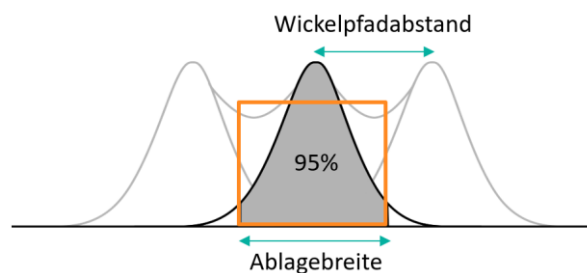


Abbildung 22: Gauß-basierte Dickenberechnung (schwarz bzw. grau) im Vergleich zur konventionellen rechteckigen Dickenrepräsentation (oranges Rechteck).

Qualitative Vergleiche der Dickenberechnung zeigen, dass der IPF-Ansatz die lokale Dicke insbesondere bei mehreren Lagen deutlich besser wiedergibt als die Standardberechnung. In entsprechenden Darstellungen werden die von CADWIND® berechneten Dickenverteilungen direkt mit den Ergebnissen des IPF-Algorithmus verglichen; der IPF-Ansatz bildet das Ineinandergreifen der Rovings in Überlapp- und Umkehrbereichen wesentlich realistischer ab (siehe Abb. 23).

Zur experimentellen Validierung wurden die mit dem IPF-Ansatz berechneten Dickenprofile mit 3D-Scan-Daten der gewickelten Zylinder verglichen (siehe Abb. 24). Eine kombinierte Darstellung aus berechneter Dicke, gemessenem 3D-Profil und der Differenz zwischen beiden zeigt, dass die Dickenprognose des IPF-Modells über weite Bereiche sehr gut mit den Messungen übereinstimmt. Verbleibende Abweichungen lassen sich vor allem auf Effekte wie Rovingschlupf auf dem metallischen Dorn oder manuelle Fixierungen und damit Abweichungen einzelner Rovings zurückführen, die im Modell nicht explizit berücksichtigt sind. In den nicht-geodätischen Umkehrzonen wird der Vorteil des IPF-Ansatzes besonders deutlich: Hier weicht die Standardberechnung von CADWIND® stärker von den Messdaten ab als das IPF-Modell. Obwohl der Ansatz noch nicht für alle Wickelbedingungen vollständig kalibriert war, zeigte er bereits eine deutlich verbesserte Prognosequalität, und für mehrlagige Strukturen wurde weiteres Optimierungspotenzial identifiziert.



Abbildung 23: Vergleich der Dickenberechnungen von CADWIND® und IPF-Algorithmus.

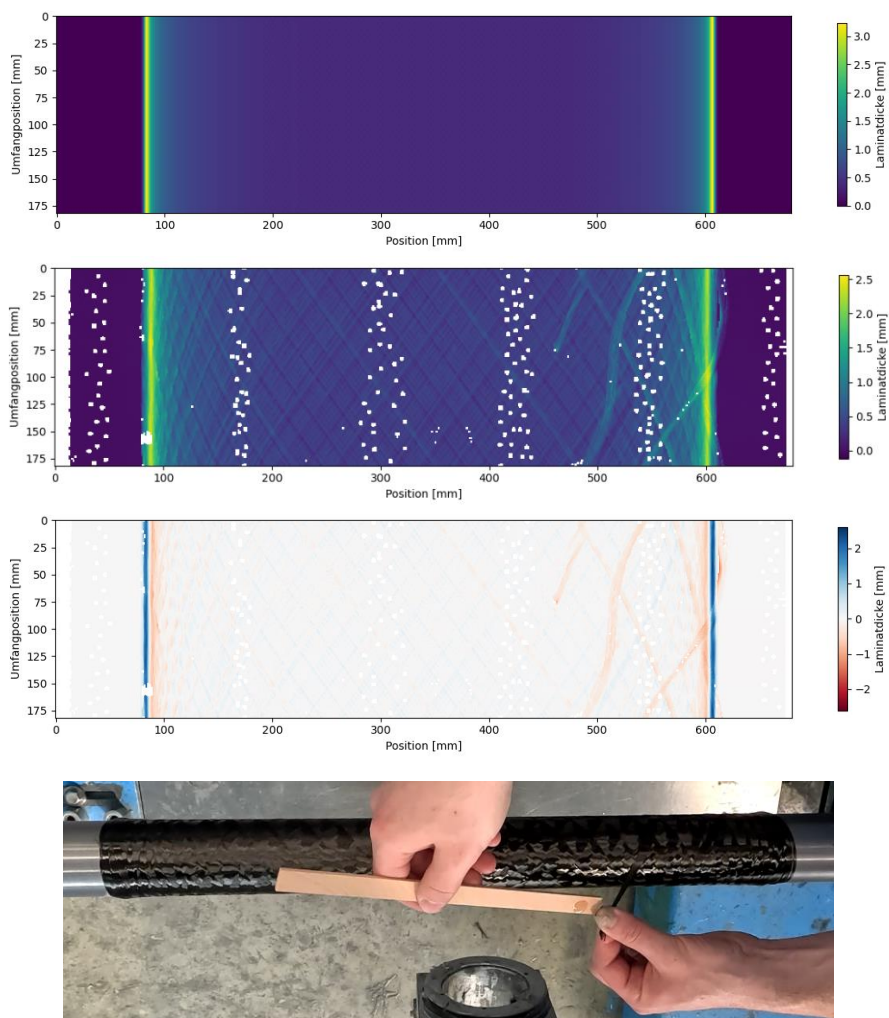


Abbildung 24: (a) Dickenberechnung mit IPF-Ansatz, (b) 3D-Scan der gewickelten Struktur, (c) Differenz zwischen 3D-Scan und IPF-Prognose, (d) Beispiel für Abweichungen durch die Fixierung des Rovingendes.

Im zweiten Entwicklungsschritt wurden polar-geodätische Wicklungen für Drucktanks betrachtet, bei denen ein geschlossenes Wickelmuster für die Dichtheit des Bauteils essentiell ist. Die Integration von TFP-Verstärkungspatches bricht die Rotationssymmetrie der Struktur und führt zu Abweichungen von der

geodätischen Faserbahn. In einem Beispiel wurden daher Trajektorien mit und ohne Patch gegenübergestellt: Die geodätische Trajektorie ohne Patch ergibt einen geschlossenen Umlauf über der Tankoberfläche, während die Trajektorie mit Patch aufgrund der lokalen Geometrieänderung von diesem Ideal abweicht. Der Vergleich zeigt, dass ein unverändertes geodätisches Muster nach Integration des Patches nicht mehr geschlossen werden kann und damit die Dichtheit des Tanks nicht gewährleistet wäre (siehe Abb. 25).

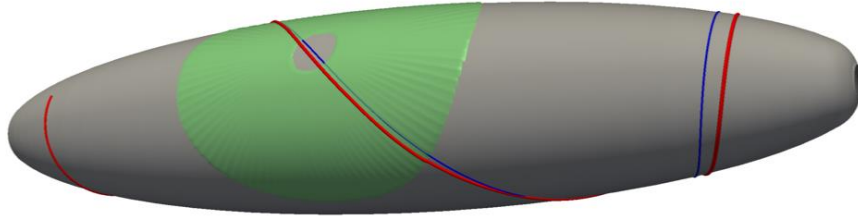


Abbildung 25: Vergleich der geodätischen Faserablage mit und ohne Patch (geschlossene Trajektorie ohne Patch vs. gestörte Trajektorie mit Patch).

Zur Lösung dieses Problems wurde ein Algorithmus entwickelt, der eine nicht-geodätische Faserablage auf nicht-rotationssymmetrischen Geometrien mit Patches ermöglicht. Innerhalb der durch die verfügbare Reibung gesetzten Grenzen versucht der Algorithmus, die Abweichung vom ursprünglichen geodätischen Wickelmuster zu minimieren oder – sollte dies nicht möglich sein – ein neues geschlossenes Wickelmuster zu identifizieren und den entsprechenden Maschinencode zu generieren. In einem dritten Schritt wurde der Ansatz auf allgemeine Bauteilgeometrien erweitert. Im Unterschied zu bestehenden kommerziellen Lösungen ist der entwickelte Algorithmus prinzipiell in der Lage, komplexe, nicht-rotationssymmetrische Geometrien zu behandeln. Innerhalb des Projekts wurde die Methode an zylindrischen und tankähnlichen Demonstratoren validiert; ihre Anwendung auf weitere reale Bauteile kann in anschließenden Folgearbeiten außerhalb des vorliegenden Projekts direkt an diese Ergebnisse anknüpfen.

AP4.3 (Lead E4D): Technologieanpassung der erweiterten Wickeltechnologie

Ziel dieses Arbeitspakets war es, die bestehende Wickeltechnologie so zu erweitern, dass neben geodätischen auch explizit nicht-geodätische Faserablagen realisiert werden konnten. Durch lokal integrierte TFP-Verstärkungspatches entstehen zusätzliche Materialdicken, sodass ein rein geodätisches Wickelmuster die Oberfläche des Wickelkerns nicht mehr vollständig abdeckt (vgl. AP4.2) und der ursprünglich mechanisch optimierte Faserablagewinkel lokal verfehlt würde. Eine angepasste, nicht-geodätische Ablage war daher erforderlich, um diese Effekte zu kompensieren und gleichzeitig eine geschlossene, druckdichte Struktur sicherzustellen.

Softwareseitige Erweiterung: Mustergenerator für (nicht-)geodätische Wickeltrajektorien

Branchenübliche Wickelsoftware wie CADWIND® erlaubt bislang keine explizite Berücksichtigung von TFP-Patches in der Trajektorienenerzeugung. Um dennoch geeignete Wickelmuster bereitstellen zu können, wurde ein eigener Mustergenerator entwickelt, der Wickeltrajektorien sowohl für geodätische als auch für nicht-geodätische Ablagen berechnet. Die Lösung basiert auf einer am IPF entwickelten Python-Anwendung, die auf Basis weniger Eingangsparameter – insbesondere Faserwinkel, Rovingbreite und gewünschtem Bedeckungsgrad („Overlap“) in der Mandrel-Mitte – zunächst eine Starttrajektorie und darauf aufbauend ein flächenfüllendes Wickelmuster generiert (siehe Abb. 26).

In einem ersten Validierungsschritt wurden die mit dem neuen Tool für geodätische Ablage erzeugten Wickelmuster mit den Ergebnissen aus CADWIND® verglichen (siehe Abb. 27). Bei identischen Eingangsparametern stimmen die Trajektorien nahezu perfekt überein. Dies bestätigt die grundsätzliche Korrektheit des Berechnungsansatzes und bildet eine robuste Basis für die anschließende Erweiterung hin zu nicht-geodätischen Mustern.

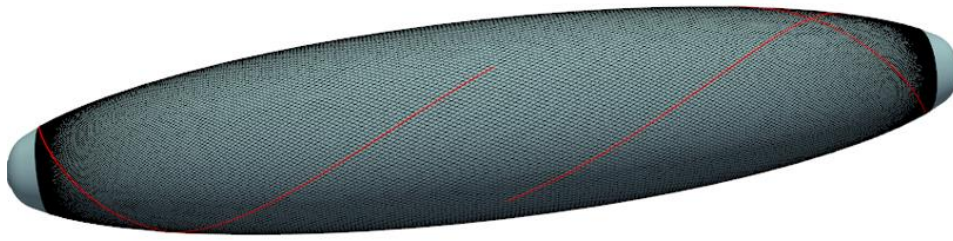


Abbildung 26: Starttrajektorie (rot) und flächenfüllendes Wickelmuster (schwarz).

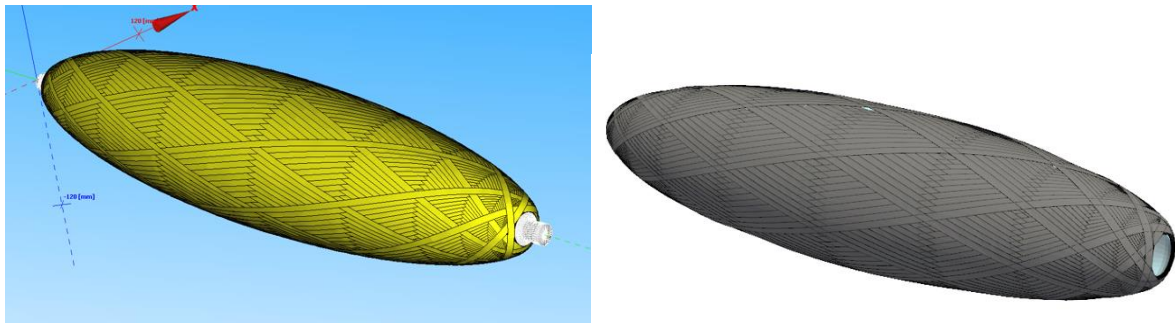


Abbildung 27: Wickelmuster, die mit identischen Eingangsparametern erzeugt wurden: CADWIND® (links) und IPF-Anwendung (rechts).

Um die Anwendung unabhängig von Programmierkenntnissen nutzbar zu machen, wurde eine grafische Benutzeroberfläche implementiert (siehe Abb. 28). Sie ermöglicht eine komfortable Eingabe der Wickelparameter und bietet eine direkte Exportfunktion für maschinenspezifischen G-Code, sodass die generierten Trajektorien ohne zusätzliche Zwischenschritte auf unterschiedlichen Wickelmaschinen eingesetzt werden können. Um nicht-geodätische Wickelmuster zu generieren ist neben den anderen Parametern die maximal zugelassene Reibung als Grenze zu definieren (u. A. abhängig von der Materialpaarung des Wickelkerns und den Fasern, als auch dem optionalen Einsatz von Binder zur Erhöhung der Haftung). Mit einem Klick auf *Extend Pattern* wird das zuvor noch geodätische Wickelmuster unter Beibehaltung des vorgegebenen Winkels in der Mitte des Körpers, bis an den Rand der Geometrie erweitert, vorausgesetzt dass Wickelkerngeometrie, vorgegebener Faserwinkel und insbesondere die maximal zulässige Reibung dies erlauben.

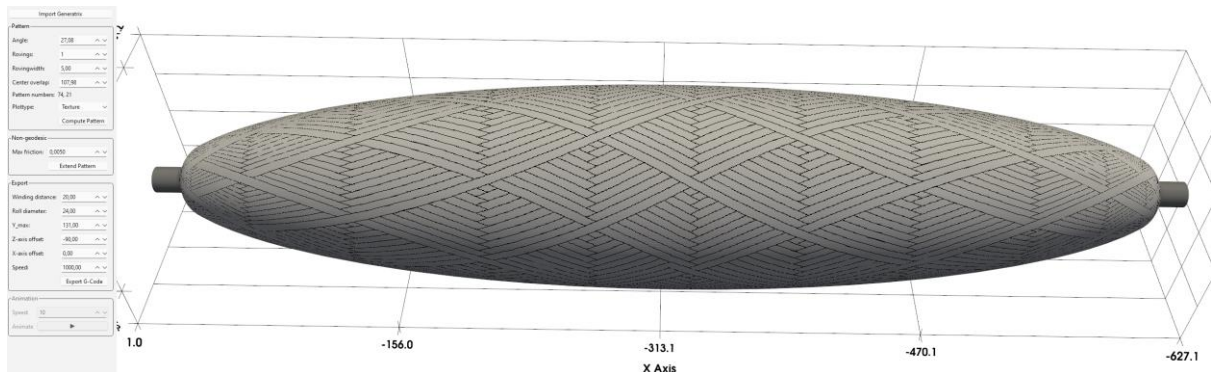


Abbildung 28: Am IPF entwickeltes Softwaretool zur Generierung geodätischer und nicht-geodätischer Wickelmuster mit TFP-Patches. Dargestellt ist ein nicht-geodätisches Wickelmuster.

In einem weiteren Schritt wurde das Tool um eine Animationsfunktion erweitert, die – ähnlich wie CADWIND® – die Faserablage virtuell visualisiert, bevor der reale Wickelprozess gestartet wird (siehe Abb. 29). Erste Simulationen zeigten beispielsweise, dass der Roving am Payoff-Kopf nicht exakt mittig von der Spule abließ, sondern seitlich an der letzten Umlenkrolle vorbeigeführt wurde (siehe Abb. 30). Solche Effekte können nun bereits im Vorfeld erkannt und im realen Prozess systematisch vermieden werden.

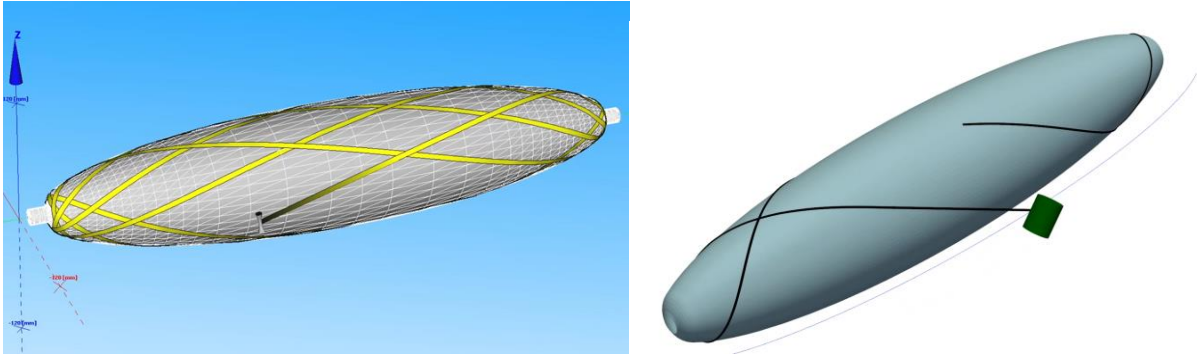


Abbildung 29: Vergleich der Ablagesimulation aus CADWIND® (links) und dem IPF-Prototyp (rechts).



Abbildung 30: Zu Beginn der Entwicklung verlief der Roving die Spule am Ablagekopf nicht zentriert, sondern lief seitlich von der letzten Umlenkrolle ab (rot hervorgehoben). Dieses Problem konnte im weiteren Verlauf der Entwicklung behoben werden, so dass Prozesssimulation und Ablageverhalten an der Anlage übereinstimmten (siehe auch Abb. 33).

Das Tool wurde im Projekt in mehreren Iterationen implementiert, getestet und auf Basis der experimentellen Ergebnisse verfeinert. Es wurde insbesondere für nicht-geodätische Trajektorien und Strukturen mit TFP-Patches in den Wickel-Workflow integriert und stellt nun die Softwarebasis zur Generierung maschinenfähiger Wickelmuster über das Projekt hinaus dar.

Hardware- und anlagenseitige Anpassungen für nicht-geodätische Ablage

Parallel zur Softwareentwicklung wurden die Wickelanlagen hardwareseitig angepasst, um die experimentelle Validierung der nicht-geodätischen Trajektorien zu ermöglichen. Die in AP4.2 entwickelten CAM-Algorithmen wurden in AP4.3 genutzt, um maschinenspezifische G-Codes zu erzeugen, die sowohl an der industriellen Wickelanlage von EAST-4D als auch an der Laboranlage des IPF eingesetzt wurden. Damit konnte gezeigt werden, dass der Ansatz grundsätzlich auf unterschiedliche Maschinentypen übertragbar ist. In Kooperation mit EAST-4D wurden wesentliche Prozessparameter identifiziert, die für eine reproduzierbare nicht-geodätische Faserablage entscheidend sind. Dazu gehören eine regelbare und hinreichend konstante Fadenspannung, die Reibung zwischen Faser und Untergrund (Metallwickelkern, CF-Strukturen mit und ohne Binder, TFP-Patches; eine unzureichende Reibung/Haftung äußert sich in dem in Abb. 31 dargestellten Ablageverhalten) sowie die Anzahl der gleichzeitig parallel abgelegten Rovings.

Für die Laborwickelanlage des IPF wurden die Führung und Positionierung der Rovings entsprechend angepasst und die Anlage wurde mit Kreuzlinienlasern ausgestattet. Diese erleichtern die Positionierung der TFP-Patches auf dem Wickelkern und gewährleisten eine präzise Ausrichtung zwischen Patch und Wickeltrajektorien. Abb. 32 zeigt beispielhaft die Laborwickelanlage mit installierten Kreuzlinienlasern zur Positionierung von TFP-Patches. Abb. 33 zeigt den Wickelvorgang eines mit der IPF-Software erzeugten Wickelmusters auf der modifizierten Laboranlage des IPF.

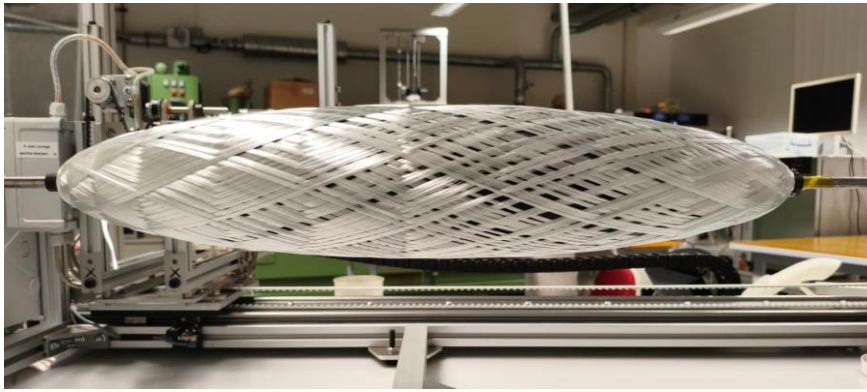


Abbildung 31: Liegt eine unzureichende Haftung bzw. Reibung zwischen Wickelkern und Faser vor äußert sich dies durch lokale Verschiebungen einzelner Rovings. Um diesem Verhalten entgegenzuwirken ist die Haftung durch beispielsweise dem Einsatz von Binder zu erhöhen.

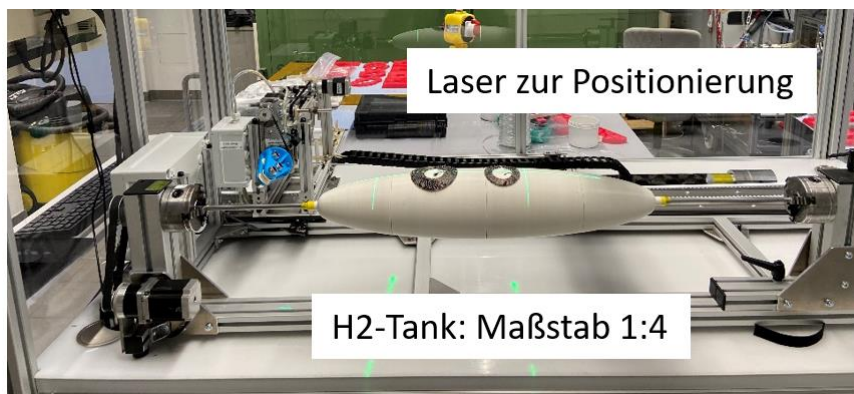


Abbildung 32: IPF-Laborwickelanlage mit Kreuzlinienlasern zur Positionierung von TFP-Patches.

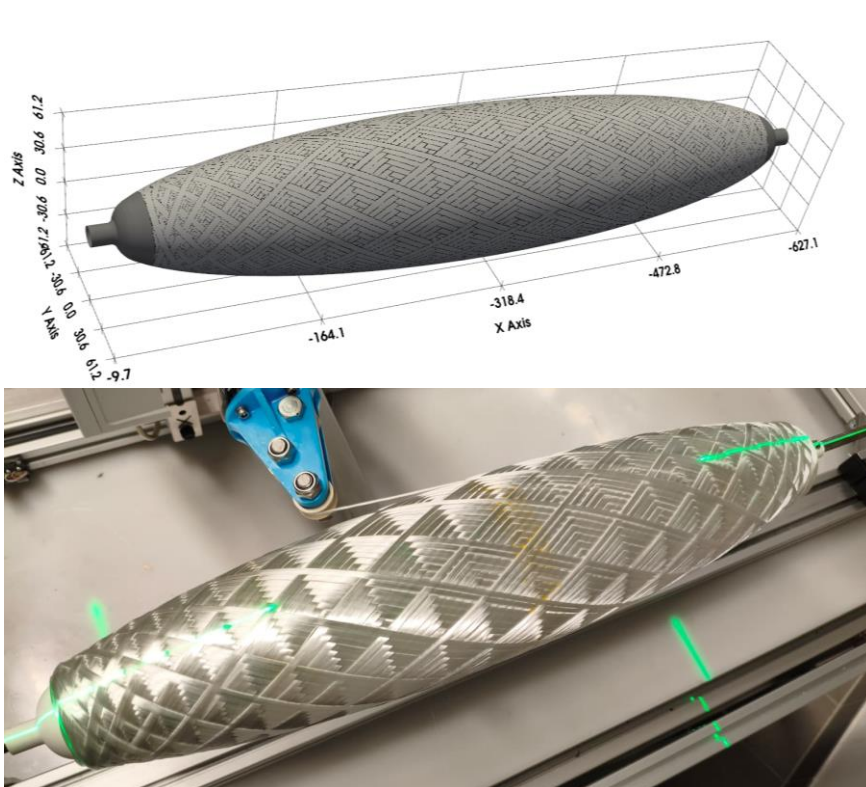


Abbildung 33: Mit der IPF Software erzeugtes Wickelmuster (oben) und der entsprechende Wickelvorgang auf der modifizierten Laboranlage des IPF (unten).

Die in AP4.3 beschriebenen software- und hardwareseitigen Anpassungen bilden zusammen mit den in AP4.2 entwickelten Algorithmen die Grundlage für die experimentelle Umsetzung nicht-geodätischer Wickelmuster mit integrierten TFP-Patches und bereiteten die Validierung an realen Bauteilen in den nachfolgenden Arbeitspaketen vor.

AP4.4 (Lead E4D): Werkzeug- und Linerentwicklung

Ziel dieses Arbeitspakets war die Entwicklung des RTM-Werkzeugs zur Konsolidierung der TFP-verstärkten Wickelstrukturen sowie eines dazu passenden H₂-Tank-Liners. Die Geometrie des Werkzeugs basierte auf den Dickenverteilungen der gewickelten Strukturen, die aus der Modellierung der Wickel- und TFP-Patchkonzepte sowie aus den in AP4.2 entwickelten Algorithmen abgeleitet wurden. Auf diese Weise wurde sichergestellt, dass Werkzeugkavität, Linergeometrie und FW+TFP-Laminataufbau sowohl geometrisch als auch prozesstechnisch zueinander passen.

Dickenmodellierung für gewickelte Strukturen und Anpassung in EDOPath

Für die Auslegung des RTM-Werkzeugs musste das Dickenprofil der gewickelten Struktur so realitätsnah wie möglich beschrieben werden. Die ursprünglich in EDOPath implementierte Dickenmodellierung basierte auf einem gaußförmigen Querschnittsprofil der Rovings, das das typische Verformungsverhalten genähter Rovings in TFP-Strukturen abbildet und sehr glatte Dickenverteilungen erzeugt. Wickelprozesse weisen jedoch andere Charakteristika auf: Bedingt durch höhere Rovingzugkräfte und – je nach Prozess – den Einsatz von Prepregs oder Infusionsmedien werden die Rovings deutlich stärker abgeflacht und nehmen im Laminat eine eher rechteckähnliche Form an, wobei sich die Lagen in Überlappbereichen nur begrenzt ineinander einbetten.

Um diese Unterschiede abzubilden, wurde das in EDOPath verwendete Querschnittsmodell an die Bedingungen des Wickelprozesses angepasst. In der überarbeiteten Variante wird eine deutlich flachere, rechteckähnliche Rovingform beschrieben; Überlappungen mehrerer Rovings werden als stufiger, weniger stark „verschmierter“ Dickenanstieg modelliert. Dadurch konnte das tatsächliche Stapelverhalten im Wickelprozess wesentlich genauer erfasst und die Genauigkeit der simulierten Dickenverteilungen für Wickelstrukturen deutlich verbessert werden (siehe Abb. 34).

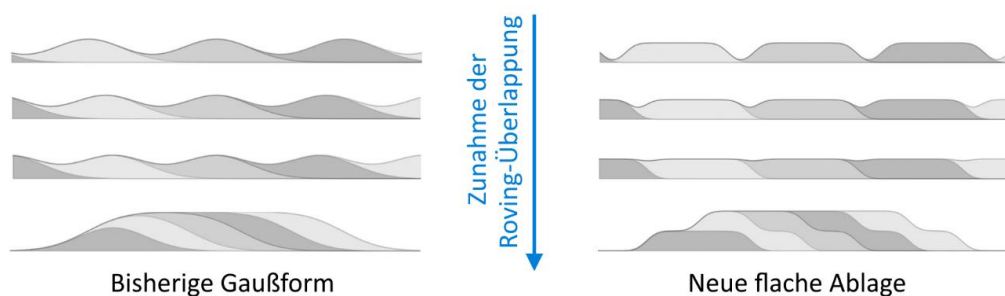


Abbildung 34: Vergleich des bisherigen gaußförmigen Profils mit der neuen, flacheren Ablagerepräsentation für verschiedene Überlappszenarien.

Die Implementierung des überarbeiteten Dickenprofils in EDOPath ermöglicht die Generierung konsistenter Dickenverteilungen für beliebige Wickelmuster – einschließlich nicht-geodätischer Trajektorien und lokaler Aufdickungen durch TFP-Patches (siehe Abb. 35). Diese Dickenverteilungen dienen direkt als Grundlage für die Ausformung von Werkzeugkavitäten.

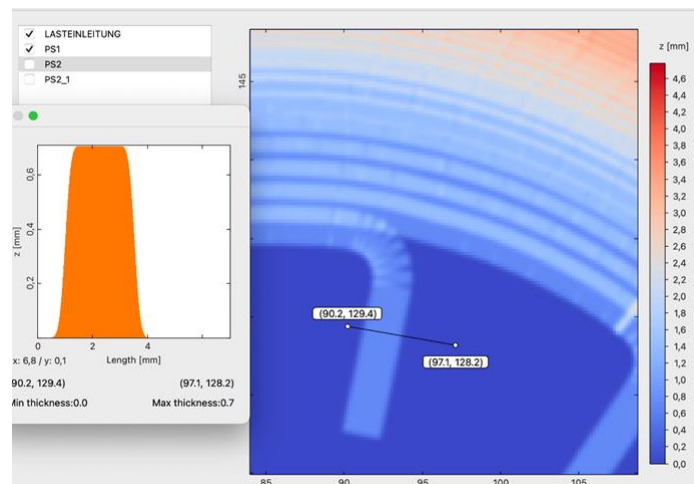


Abbildung 35: Beispiel-Implementierung des neuen Ablageprofils in der Software EDOpath.

Validierung der Dickenprognosen und Einfluss der Konsolidierung

Zur Validierung der aktualisierten Dickenmodellierung wurden zunächst gewickelte Zylinder mit mehreren Lagen im trockenen Zustand vollständig mittels 3D-Scan erfasst. Aus den Scandaten (siehe Abb. 36) wurden radiale Dickenprofile extrahiert und mit den Prognosen des IPF-Ansatzes sowie mit dem in CADWIND® implementierten klassischen analytischen Modell verglichen. In den geradlinigen Wickelbereichen lagen beide Modelle relativ nah beieinander; in den nicht-geodätischen Umkehrzonen traten jedoch deutliche Unterschiede auf: Der angepasste IPF-Ansatz folgte den experimentellen Daten deutlich besser, während das klassische Modell größere Abweichungen zeigte.

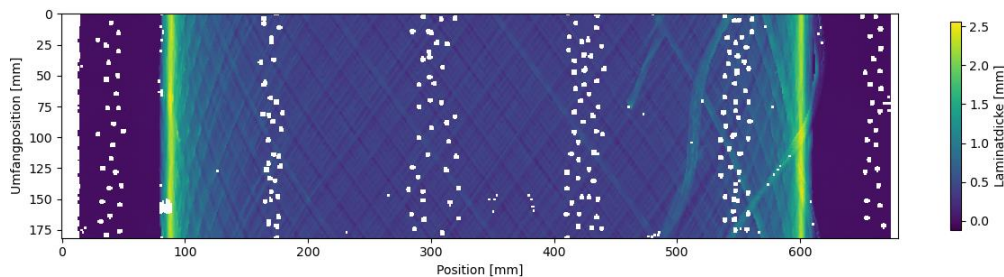


Abbildung 36: Trockene Faserablage auf einer zylindrischen Geometrie (Basis für die Dickenprofile im 3D-Scan).

Die Scan-Auswertung deutete zugleich auf Rovingschlupf in den Umkehrbereichen hin. Die Wendepunkte erschienen leicht in Richtung Zylindermitte verschoben, was erklärt, warum die gemessenen Dickenprofile von den idealisierten Prognosen abweichen. Darüber hinaus zeigten die Daten (siehe Abb. 37), dass Verdichtungseffekte in den unteren Lagen – etwa durch den Anpressdruck nachfolgender Lagen oder den späteren Harzfluss – von keinem der Modelle vollständig erfasst wurden. Während für die erste Wickellage eine gute Übereinstimmung festgestellt wurde, nahmen die Abweichungen mit zunehmender Lagenzahl zu.

In einem weiteren Schritt wurde derselbe Wickelkörper mittels VARI (Vacuum-Assisted Resin Infusion) infiltriert, erneut 3D-gescannt und das konsolidierte Dickenprofil mit der Prognose für den trockenen Zustand verglichen (siehe Abb. 38). Im regulären Wickelbereich, d. h. im mittleren Zylinderabschnitt, wurden Abweichungen von bis zu ca. 0,5 mm beobachtet. Diese Unterschiede wurden auf Verformungen der Membran während des Harzflusses zurückgeführt, wie sie in VAP/VARI-Prozessen auftreten, wenn der Harzdruck die Membran lokal anhebt. Die Ergebnisse verdeutlichen, wie anspruchsvoll eine exakte Prognose des Dickenprofils ist, insbesondere in den Umkehrbereichen, in denen zusätzliche Einflüsse wie Spannungsverluste und Rovingschlupf hinzukommen.

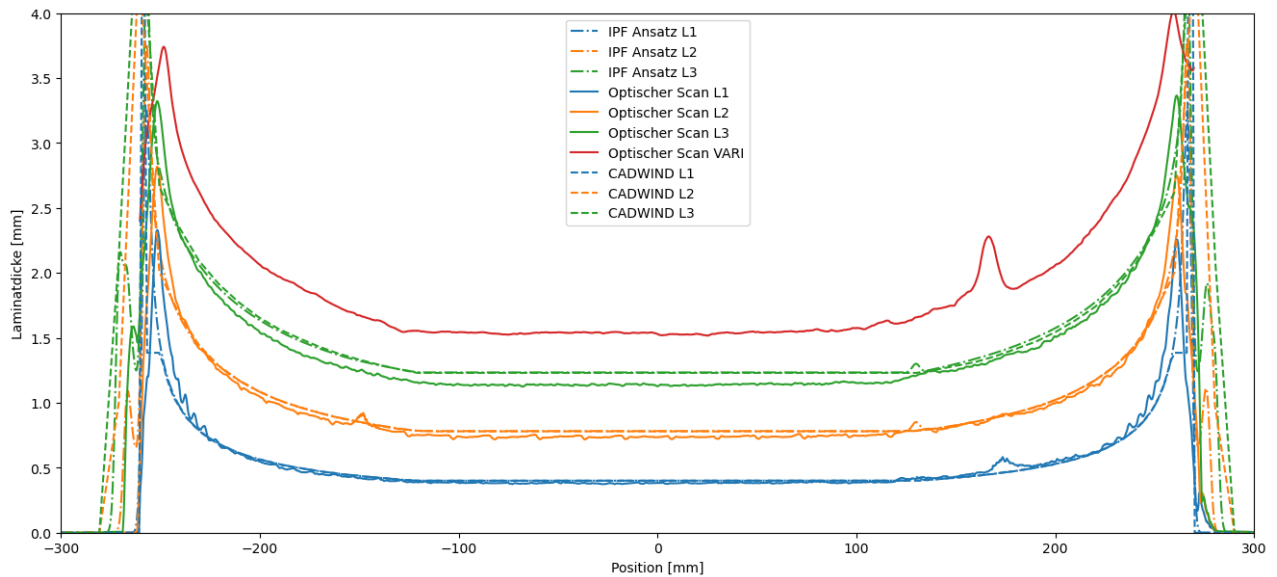


Abbildung 37: Vergleich der berechneten Dicke (CADWIND® und IPF-Modell) mit der gemessenen Dicke nach VARI-Infiltration. Die dargestellten Dicken von Layer 2 (orange) und Layer 3 (grün) beinhalten jeweils die Dicke einschließlich der unter ihnen befindlichen Layer dar.

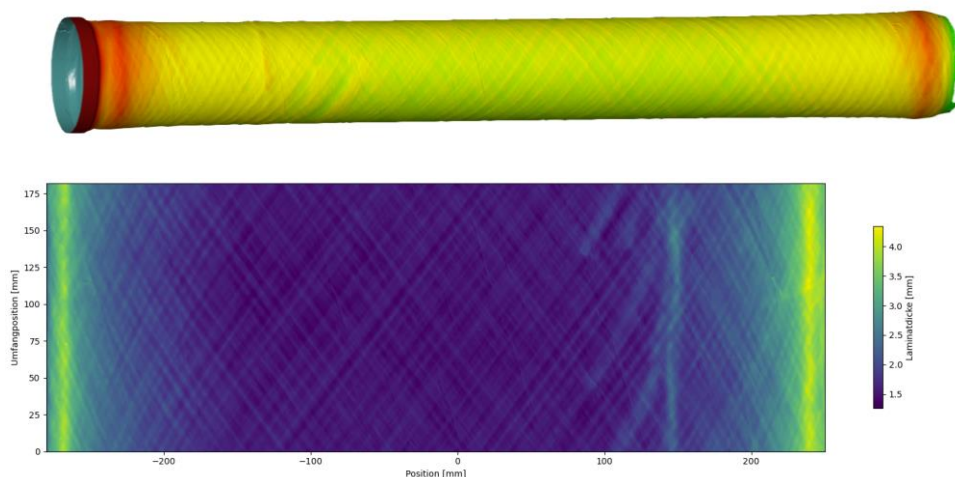


Abbildung 38: 3D-Scan (oben) und Laminatdickenprofil der VARI-infiltrierten Probe (unten).

Die aus diesen Untersuchungen abgeleiteten Erkenntnisse fließen in die Definition von Werkzeugzugaben, Dichtkonturen und Toleranzfeldern ein. Für Standard-RTM-Prozesse ist zu erwarten, dass die Dickenverteilung im regulären Wickelbereich den IPF-/klassischen Prognosen deutlich näher folgt als im VARI-Fall, während in den Umkehrzonen weiterhin mit größeren Abweichungen zu rechnen ist.

Entwicklung von RTM-Werkzeug und H₂-Tank-Liner

Auf Basis der beschriebenen Dickenverteilungen wurde das RTM-Werkzeug für die Konsolidierung der FW+TFP-Strukturen geometrisch ausgelegt und konstruktiv umgesetzt. Die Werkzeugkavität berücksichtigt sowohl die geradlinigen Wickelbereiche als auch lokale Aufdickungen infolge von TFP-Patches und nicht-geodätischen Wickeltrajektorien. Ziel war es, eine reproduzierbare Infiltration bei hohen Faservolumengehalten und gleichzeitig geringem Porengehalt zu ermöglichen, sodass sowohl die mechanische Leistungsfähigkeit als auch die Dichtheit des Druckbehälters langfristig sichergestellt werden können.

Beitrag zur Permeations- und Typ-V-Tank-Strategie

Im Projektkonsortium lag die Technologie „gewickelte Bauteile konsolidiert in RTM-Werkzeugen“ primär beim Partner EAST-4D. Die Arbeiten in AP4.4 konzentrierten sich daher auf die spezifischen Herausforderungen, die sich durch TFP-Patches im Hinblick auf Permeation ergeben. Die in anderen Arbeitspaketen ermittelten Zusammenhänge zwischen Patchdicke, Porosität und Permeabilität wurden genutzt, um Anforderungen an die RTM-Prozessführung, das Werkzeugkonzept und den Ziel-Faservolumengehalt abzuleiten.

Aufgrund des angestrebten hohen Faservolumengehalts und des damit verbundenen niedrigen Porengehalts ist zu erwarten, dass die mittels RTM-Prozess hergestellten Strukturen eine deutlich reduzierte Gaspermeabilität aufweisen. Dies ist eine zentrale Voraussetzung für die Realisierung von Typ-V-Tanks ohne zusätzliche Barrierschicht. Die in AP4.4 entwickelten Konzepte zur Dickenmodellierung, zum RTM-Werkzeug und zum Liner bildeten damit die konstruktive Grundlage für die nachfolgenden Demonstrationsaktivitäten zu dieser Tanktechnologie innerhalb des Projekts.

AP4.5 (Lead E4D): Faserablage – Filamentwickeln + TFP-Patches und Konsolidierung

In diesem Arbeitspaket wurde die Faserablage im Filamentwickelprozess in Kombination mit lokal integrierten TFP-Verstärkungspatches weiterentwickelt und auf einen aerodynamisch geformten Druckbehälter übertragen. Der Schwerpunkt lag auf dem Endkappenbereich, in dem TFP-Patches zur gezielten lokalen Verstärkung eingesetzt und anschließend gemeinsam mit der Wickelstruktur konsolidiert wurden. Die Arbeiten bauten unmittelbar auf den in den vorhergehenden Arbeitspaketen entwickelten Patcharchitekturen sowie den Wickel- und RTM-Konzepten auf.

TFP-Patchauslegung und Drapierung im Endkappenbereich

Für die Tank-Endkappe wurde das bereits in AP3.2 vorgestellte TFP-Patchdesign entwickelt. Ausgangspunkt war die dreidimensionale Geometrie der Endkappe, aus der zunächst eine ebene 2D-Preform mit definierten Schnitten und Faserverläufen abgeleitet wurde. Diese 2D-Preform wurde anschließend wieder auf die 3D-Geometrie abgebildet. Das Zusammenspiel aus Patchlayout und „intelligentem Zuschnitt“ verbesserte die Drapierbarkeit auf der doppelt gekrümmten Oberfläche deutlich (siehe auch Abb. 11 und 12). Gleichzeitig konnte die Lage der Verstärkungsrovings in mechanisch kritischen Zonen reproduzierbar eingestellt werden, sodass die Endkappenbereiche gezielt verstärkt und lokale Spannungsspitzen reduziert wurden.

Integration der TFP-Patches in den Wickelprozess und Konsolidierung

Der aerodynamische Druckbehälter wurde in einem Nasswickelprozess aufgebaut. Die TFP-Patches wurden mit Epoxidharz vorimprägniert und in den definierten strukturell kritischen Zonen im Endkappenbereich appliziert. Die Harzprägnierung stellte zunächst eine ausreichende Klebrigkeit („Tack“) bereit, sodass die Patches an der Oberfläche des Wickeldorns hafteten. Nach wenigen Wickelumdrehungen übernahmen die vorgespannten Rovings die mechanische Fixierung, und die Patches wurden formschlüssig in die Wickelstruktur eingebettet (siehe Abb. 39). Ab diesem Zeitpunkt konnte der restliche Wickelprozess ohne Unterbrechung bis zur Fertigstellung des Druckbehälters durchgeführt werden.

Die resultierenden Bauteile wurden in geeigneten Formen konsolidiert. Die gewählte RTM-Prozessführung ermöglichte hohe Faservolumengehalte bei reduziertem Porengehalt, was im Hinblick auf Typ-V-Tanks ohne zusätzliche Barrierschicht von zentraler Bedeutung ist.



Abbildung 39: Nasswickelprozess zur Applikation des TFP-Patches auf die Endkappe.

CT-Analyse der Endkappe mit TFP-Patch

Zur Bewertung der Integration der Kohlenstofffaser-TFP-Patches und der resultierenden Wickelqualität wurden CT-Scans im Endkappenbereich durchgeführt (siehe Abb. 40). In der vorliegenden Rekonstruktion trennt die farbcodierte Volumenvisualisierung die unterschiedlichen Materialbereiche deutlich: Gelb steht für die Gelcoat-Schicht und den CFRP-Patchbereich, während Weiß die nass gewickelte Glasfaserstruktur und den Keramikboss repräsentiert. Der Patchbereich und sein Überlapp mit den umliegenden Glasschichten sind klar erkennbar.

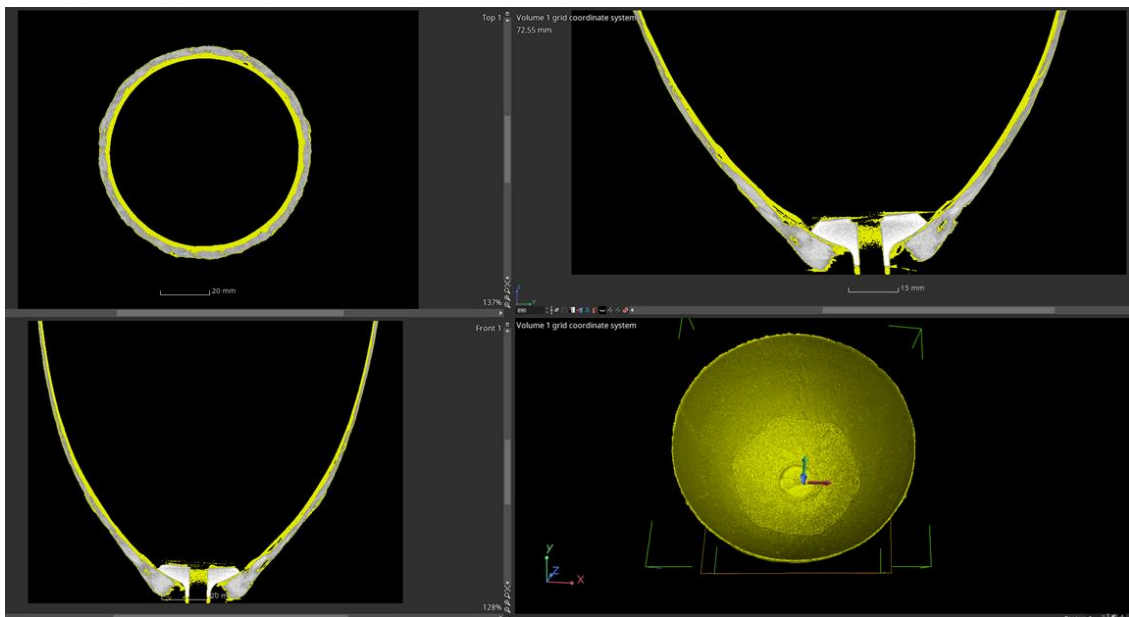


Abbildung 40: CT-Scan des Endkappenbereichs des Druckbehälters mit orthogonalen Schnittebenen (XY, XZ, YZ) und 3D-Volumenrekonstruktion.

Die Aufnahmen deuten darauf hin, dass die Haftung zwischen Patch und den überliegenden Wickellagen weiter verbessert werden könnte, beispielsweise durch eine Optimierung der Wickelparameter, insbesondere der Fadenspannung und der Kompaktion in den ersten Lagen über dem Patch.

Beobachtete Wickelstruktur und Weiterentwicklung der Fadenspannungseinrichtung

In den CT-Daten sind auf der Innenseite des Tanks dreizehn wellenförmige Überhöhungen erkennbar, die eindeutig dem Wickelmuster zugeordnet werden können. Ihre Amplitude ist größer als erwartet und deutet auf lokal unzureichende bzw. nicht hinreichend konstante Fadenspannung während des Wickelprozesses hin. Aus diesen Gründen wurde im Rahmen dieses Arbeitspakets die bereits im Zwischenbericht 2023 vorgestellte Fadenspannvorrichtung des IPF noch einmal grundlegend neu entwickelt.

Die maximal aufbringbare Bremskraft der alten Vorrichtung konnte lediglich eine Rovingspannung von etwa 2 N herbeiführen. Im Vergleich dazu arbeiten die Wickelanlagen des Projektpartners EAST-4D typischerweise mit Fadenspannungen im Bereich von mindestens 3 N bis 20 N, welcher nun als Orientierung für die Neuentwicklung der IPF-Anlage herangezogen wurde. Zudem ermöglichte die vorherige Vorrichtung des IPF nicht, Filamentüberschüsse aktiv zurückzuziehen, was bei kleinsten Fadenreserven – wie sie in Umkehrzonen auftreten können – unmittelbar zu einem Abfall der Fadenspannung und damit zu einem ungleichmäßigen Wickelbild führen kann.

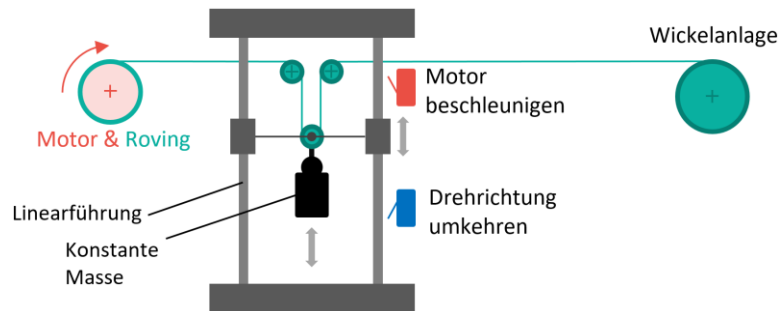


Abbildung 41: Schematischer Aufbau der neuen Fadenspannungseinrichtung.

Das Wirkprinzip der neu entwickelten Fadenspannvorrichtung ist in Abb. 41 dargestellt und der realisierte Prototyp der Anlage in Abb. 42 zu sehen. Die Konstruktion basiert auf einem mechanischen System, bei dem ein entlang einer Linearführung vertikal bewegliches Gewicht die gewünschte Fadenspannung erzeugt. Durch den Austausch des Gewichts können unterschiedliche Fadenspannungen eingestellt werden. Die – unter der Annahme vernachlässigbarer Beschleunigungskräfte – konstant wirkende Gewichtskraft gewährleistet eine stabile Fadenspannung, die unabhängig von lokalen Veränderungen der Roving-Abzugsgeschwindigkeit oder -richtung aufrechterhalten bleibt.

Die Anlage detektiert rechtzeitig, wann der Motor mehr Material bereitstellen muss und wann dieses, im Falle entstehender Fadenreserven, wie sie in Umkehrzonen auftreten können, wieder zurückgeholt werden muss. Im Gegensatz zur zuvor eingesetzten, rein bremsbasierten Lösung bleibt die definierte Spannung mit diesem Ansatz über den gesamten Prozessverlauf konstant erhalten. Das Wirkprinzip der Anlage hat sich im weiteren Projektverlauf als zuverlässig und prozessstabil erwiesen, so dass die Qualität der Faserablage deutlich verbessert werden konnte.

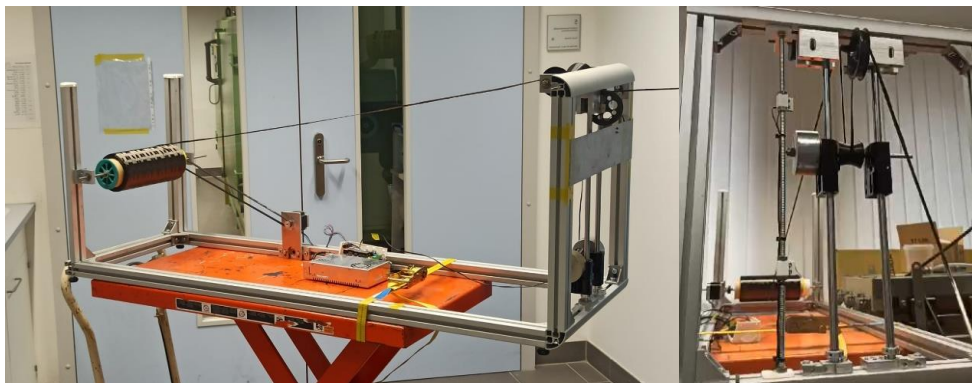


Abbildung 42: Prototyp der neuen Fadenspannungseinrichtung.

AP5.2 (Lead IMA): Begleitende Nachweiskonzepte Mechanik und Permeation

Ziel dieses Arbeitspakets war die Entwicklung von Nachweis- und Validierungskonzepten für das mechanische und permeationstechnische Verhalten des Gesamtsystems. Ausgangspunkt war eine Gruppe von Werkstoffsystemen und Substrukturen, deren Eigenschaften so charakterisiert wurden, dass belastbare Aussagen zum Trag- und Dichtheitsverhalten im späteren Tankaufbau möglich wurden. Den Projektpartnern wurden vom IPF allgemeine Empfehlungen zum erwarteten Verhalten von TFP-Bauteilen bereitgestellt. Diese umfassten zum einen das mechanische Verhalten unter relevanten Lastfällen und zum anderen die zusätzlichen Permeationspfade, die lokal durch das eingebrachte Stickgarn als auch durch Bridging-Effekte durch die integrierten TFP-Patches entstehen können. Insbesondere wurde aufgezeigt, in welchen Bereichen TFP-Patches das Permeationsverhalten eines Druckbehälters kritisch beeinflussen können und welche Randbedingungen für einen sicheren Nachweis einzuhalten sind. Insgesamt stellte AP5.2 damit die methodische Grundlage für eine fundierte Bewertung von in die Wickelarchitektur eingebetteten TFP-Patches hinsichtlich Festigkeit, Steifigkeit und Dichtheit sowie für die Etablierung geeigneter Nachweiskonzepte für die resultierenden TFP/Wickel-Hybridstrukturen bereit.

AP5.3 (Lead ILK): Prüftechnische Validierung Ringstruktur

Ziel dieses Arbeitspakets war die experimentelle, prüftechnische Validierung der Ringstruktur. Auf Basis der im Projekt entwickelten Auslegungs- und Drapierkonzepte für TFP-basierte Preformen sollte das Tragverhalten des Ringsegments experimentell nachgewiesen werden. Die Versuche waren so ausgelegt, dass die numerisch und konzeptionell erarbeiteten Entwurfsansätze unter realitätsnahen Randbedingungen überprüft und die Eignung der Ringstruktur für den späteren Einsatz im Gesamtsystem bestätigt werden konnten. Seitens des IPF erfolgte eine fachliche Unterstützung der Partner ILK und IMA durch die Bereitstellung von Erfahrungen mit TFP-basierten Strukturen auf doppelt gekrümmten Geometrien, wie sie in AP3.3 und AP4.5 gewonnen wurden. Diese Erfahrungen standen den Partnern als Referenzmaterial zur Verfügung. Zudem wurde der eigene Workflow inklusive der am IPF entwickelten Skripte zur Analyse von Versagenskriterien geteilt, um die experimentelle Bewertung der Ringstruktur zu unterstützen. Innerhalb des Projektzeitraums lieferte AP5.3 damit die für die prüftechnische Validierung der Ringstruktur erforderliche Versuchsspezifikation sowie die zugehörigen Auswertungs- und Bewertungskonzepte.

AP5.4 (Lead IMA): Prüftechnische Validierung – numerische Unterstützung

Ziel dieses Arbeitspakets war die Unterstützung der experimentellen Validierung des Druckbehälters durch numerische Analysemodelle. Hierzu stellte das IPF Simulationswerkzeuge sowie die in den vorangegangenen Arbeitspaketen aufgebaute technische Expertise zur Verfügung, insbesondere zur Analyse des Strukturverhaltens von TFP-Patches in kritischen Zonen der Tankstruktur. Auf dieser Basis wurden dem Partner ILK Finite-Element-Modelle und institutseigene Simulationsroutinen bereitgestellt, mit denen Spannungsverteilungen und potenzielle Versagenszonen innerhalb der Tankstruktur prognostiziert werden können. Im Projektverlauf wurden diese numerischen Modelle zur Unterstützung der laufenden physikalischen Versuche eingesetzt, indem sie eine simulationsgestützte Auswertung der Messergebnisse ermöglichten. Die numerischen Analysen dienten dazu, Versuchsdaten zu interpretieren, kritische Bereiche frühzeitig zu identifizieren und gegebenenfalls Anpassungen an Versuchsprogrammen oder Strukturkonzepten abzuleiten. Auf diese Weise trug AP5.4 dazu bei, das Gesamtverhalten der Tankstruktur aus kombiniert experimenteller und numerischer Perspektive abzusichern und die Übertragbarkeit der im Projekt entwickelten TFP/FW-Konzepte auf realistische Betriebsbedingungen zu bewerten.

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die im Vorhaben abgerechneten Gesamtausgaben betragen 559.952,32 €. Die Mittel wurden überwiegend für die wissenschaftliche Bearbeitung und Umsetzung der Arbeitspakete eingesetzt. Ergänzend wurden projektbezogene Sachmittel, einzelne investive Gegenstände sowie Dienstreisen zur Versuchsdurchführung, Softwareentwicklung und Konsortiumsarbeit verwendet.

Wissenschaftliches Personal (inkl. unterstützender Hilfskräfte): Der Schwerpunkt der Mittelverwendung lag bei den Personalkosten (insgesamt 537.067,86 € – ca. 96%). Dies entspricht dem Charakter des Vorhabens, da die wesentlichen Projekthinhalte in der Entwicklung, Implementierung und Validierung von Methoden (u. a. FE-/Auslegungsansätze), der Software-/CAM-Entwicklung sowie der Planung, Durchführung und Auswertung der Versuche bestanden. Der Personaleinsatz umfasste insgesamt 84 Personenmonate wissenschaftliches Personal sowie 37 Personenmonate SHK/unterstützende Tätigkeiten und deckte insbesondere Arbeiten in AP2.1, AP3.2–AP3.3 sowie AP4.5 ab.

Softwareentwicklung und Modifikationen an bestehender Infrastruktur: Ein wesentlicher Teil der Entwicklungsleistungen (Software/CAM, Trajektorien-/Algorithmenentwicklung, Auswertungs-Workflows) wurde als Eigenleistung über das wissenschaftliche Personal erbracht (insb. AP4.2–AP4.4 sowie unterstützend AP3.2). Parallel wurden bestehende Labor- und Versuchsinfrastrukturen gezielt angepasst, um die projektspezifischen Prozess- und Versuchsketten (TFP–FW, Drapierbarkeit, Datenerfassung/Auswertung) zuverlässig abbilden zu können (u. a. im Kontext AP4.3/AP4.5).

Versuchsdurchführung und projektbezogene Verbrauchsmaterialien: Für die Durchführung der Technologie- und Demonstratorversuche wurden projektbezogene Materialien und Hilfs-/Verbrauchsmittel eingesetzt (12.411,98 €). Hierzu zählten insbesondere Materialien zur Herstellung von Wickelkernkomponenten, Versuchsvorrichtungen und Probekörpern, sowie Werkstoffe und Prozesshilfen für die Versuche (z. B. Textilien/Faserhalbzeuge, Harzsysteme sowie Infiltrations-/Infusionshilfsmittel wie Membranen). Diese Sachmittel standen in direktem Zusammenhang mit den experimentellen Arbeiten, insbesondere in AP2.1, AP3.3 und AP4.5.

Investive Gegenstände (Stärkung der Forschungsinfrastruktur): Zur Durchführung und Auswertung der Arbeiten wurden einzelne größere Geräte beschafft (6.238,57 €), insbesondere zur Herstellung/Bearbeitung von Versuchs- und Werkzeugkomponenten im Kontext der Drapier- und Mandrel-/Aufbauentwicklung sowie zur Geometrieerfassung/Scan-gestützten Auswertung (u. a. Vermessung/3D-Scan von Wickelkernen, Drapier-Ergebnissen sowie gewickelten Demonstratoren/Druckbehältern). Diese Anschaffungen wurden projektbezogen genutzt und stärken zugleich die langfristige Forschungsinfrastruktur, da sie auch in zukünftigen Vorhaben für ähnliche Entwicklungs-, Versuchs- und Auswerteaufgaben eingesetzt werden.

Dienstreisen: Für projektbezogene Abstimmungen, Konsortialtreffen sowie ausgewählte fachliche Termine zur Einordnung/Darstellung der Ergebnisse wurden Dienstreisen abgerechnet (4.233,91 €), einschließlich der Teilnahme an einer fachlichen Konferenz im Themenfeld des Vorhabens.

Die Kosten- und Zeitplanung wurde im Wesentlichen eingehalten.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Vorhaben durchgeführten Arbeiten waren erforderlich, da zentrale Voraussetzungen für eine robuste, prozesssichere Umsetzung von FW+TFP-Hybridstrukturen zu Projektbeginn noch nicht ausreichend verfügbar bzw. nicht industriell abgesichert waren. Der Projektansatz am IPF (Methodenentwicklung, Software/CAM und experimentelle Validierung) zielte darauf ab, Lücken in Modellierung, Prozessbeherrschung und digitaler Bauteilabbildung zu schließen und die Ergebnisse in eine übertragbare Prozess- und Werkzeugkette zu überführen.

Hybridprozesse waren bislang nicht ausreichend modelliert. Die Kombination aus FW und lokal integrierten TFP-Patches führt zu lokalen Aufdickungen, variierenden Faserorientierungen und Dickenschwankungen, die sich mit etablierten Einzelprozess-Modellen nicht zuverlässig abbilden lassen. Ohne konsistente Modellierung besteht das Risiko, dass Auslegung, Trajektorien-Erzeugung und Bauteilgeometrie nicht zusammenpassen und die Übertragbarkeit auf Tank- und Ringbereiche eingeschränkt ist.

Nicht-geodätische Strategien sind industriell nicht abgesichert. Für druckdichte Wickelstrukturen ist eine geschlossene, flächenfüllende Ablage erforderlich; durch lokale TFP-Patches wird die Rotationssymmetrie aufgehoben, sodass geodätische Standardpfade nicht mehr zuverlässig schließen. Zudem bestimmen Reibung/Haftung und stabile Fadenspannung die praktische Umsetzbarkeit, weshalb eine experimentelle Absicherung unter realen Prozessbedingungen notwendig ist.

Die Dickenmodellierung ist marktseitig unzureichend. Für Werkzeugauslegung und die Bewertung lokaler Fasergehalte ist eine realitätsnahe Dickenbeschreibung erforderlich. Kommerzielle Lösungen bilden lokale Aufdickungen, Überlappungen und Umkehrzonen – insbesondere in nicht-geodätischen Bereichen – nur begrenzt genau ab. Die Weiterentwicklung der Dickenmodellierung und die Verknüpfung mit Scan-gestützter Auswertung schufen daher eine belastbare Grundlage für Werkzeug- und Prozessentscheidungen.

Die gewählten Methoden waren geeignet und angemessen. Der zentrale Ansatz war die iterative Verzahnung von Simulation, Softwareentwicklung und experimentellen Versuchen: Modell- und Simulationsergebnisse wurden in Software/CAM-Workflows überführt, experimentell validiert und anhand der Rückkopplung (u. a. Reibung/Haftung, Fadenspannung, Drapierbarkeit, reale Dickenverteilung) iterativ verbessert. Dadurch entstand schrittweise eine konsistente, übertragbare Prozess- und Werkzeugkette.

II.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Beim FW kann die Kompaktierung über den Laminataufbau variieren, wobei sich zeigte, dass zuerst gewickelte Lagen häufig stärker kompaktiert werden als außenliegende Lagen. Dies kann zu Schwankungen im Faservolumengehalt sowie zu lokalen Faserondulationen und Orientierungsabweichungen führen. Es wird daher angenommen, dass solche Inhomogenitäten die Permeabilität, den Harzfluss und das Imprägnierverhalten im RTM-Prozess beeinflussen können und zudem zu lokalen Unterschieden der mechanischen Eigenschaften beitragen.

Die im Vorhaben entwickelten Methoden- und Softwarebausteine (z. B. Dicken-/Geometrieauswertung, Wickelmuster-/Trajektoriengenerierung sowie Auswerte-Workflows) bieten eine geeignete Grundlage, um diese Zusammenhänge weiter zu untersuchen und die Prozessauslegung zu unterstützen. Folgende Verwertungsschritte sind vorgesehen:

- **Kurzfristig (0–12 Monate nach Vorhabenenende)** werden die entwickelten Softwaretools und Workflows konsolidiert, dokumentiert und für die Wiederverwendung in weiteren Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten bereitgestellt.

- **Mittelfristig (12–24 Monate)** können gezielte Versuchskonzepte vorbereitet werden, um Kompaktierungseffekte mit dem RTM-Verhalten in Beziehung zu setzen; dazu werden geeignete Demonstratoren und Messmethoden (z. B. Flow-Front-Analyse, CT/Schliffuntersuchungen) genutzt, um Strukturmerkmale mit dem Imprägnierverhalten zu korrelieren.
- **Langfristig (24–36 Monate)** können die daraus abgeleiteten Erkenntnisse zur vertieften Modellierung und Prozessbewertung sowie als Grundlage für potenzielle Optimierungen von Layup-Strategien (z. B. über kontrollierte Rovingspannung) genutzt werden.

Die Verwertung erfolgt zudem über wissenschaftliche Dissemination (Publikationen/Fachkonferenzen). Schutzrechtsrelevante Aspekte werden bei Bedarf vor einer Veröffentlichung geprüft.

Perspektivisch können die im Vorhaben entwickelten Softwarebausteine in die Auslegungstools des Verbundpartners *Complex Fiber Structures GmbH* (CFS) eingebracht werden. Dabei könnten die bisher auf TFP fokussierten Tools um Wickelprozesse erweitert werden. Dies umfasst unter anderem geodetische und nicht-geodetische Pfadgenerierung (mit und ohne TFP-Patches), die Dickenvorhersage für Freiformflächen-Werkzeugdesign sowie Analyse- und Validierungswerkzeuge für Dickenabweichungen im Vergleich zu realen Scans. Während im Projekt vor allem prototypische Software mit grundlegender Benutzeroberfläche entwickelt wurde, könnte die konsolidierte Integration dieser Bausteine perspektivisch in den CFS-Tools erfolgen, um eine durchgängige, praxisnahe Softwarelösung zu schaffen, die sowohl TFP als auch Wickelprozesse abdeckt.

II.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Im Projektzeitraum wurde auf der JEC-Fachmesse ein aktueller Überblick über Entwicklungen im Bereich FW, zugehörige Softwarelösungen sowie Trends bei Druckbehältern (insbesondere Typ-V) gewonnen.

FW-Software / CAM: In der industriellen Praxis ist weiterhin die etablierte Wickelsoftware (z. B. CADWIND®) stark verbreitet, deren mathematische Grundlagen in vielen Fällen auf klassischen Gleichungssätzen beruhen. Parallel entstehen neue Anbieter mit moderneren, skript- bzw. „pythonisierten“ Workflows (z. B. TaniQ), die die Bedienbarkeit und Automatisierung verbessern. Nach aktuellem Kenntnisstand basieren diese Ansätze jedoch überwiegend auf denselben grundlegenden Gleichungssätzen wie die bestehenden Tools. Vor diesem Hintergrund kann die Übernahme alternativer Modellansätze – insbesondere für nicht-achsensymmetrische Wicklungen, mandrel-/geometrieaktualisierte Fälle und lokal TFP-Patch-beeinflusste Oberflächen – in marktübliche Standard-Toolchains herausfordernd sein. Die im Vorhaben verfolgte Modellierung auf Basis einer abweichenden Formulierung adressiert damit ein Feld, das in Standardsoftware nur begrenzt abgedeckt ist.

Typ-V-Druckbehälter / Permeation und Qualität: Typ-V-Druckbehälter sind seit mehreren Jahren ein dominantes Thema in Forschung und Industrie. Dies wurde auch auf der JEC sowie in Gesprächen mit anderen Akteuren (Universitäten und Forschungsinstituten) deutlich. Eine zentrale Herausforderung ist die Erreichung einer hinreichend niedrigen und stabilen Wasserstoffpermeation; zahlreiche laufende Vorhaben adressieren dies durch die Entwicklung und Integration physikalischer und/oder chemischer Barriere-Konzepte zur Verbesserung der Permeationseigenschaften. Das vorliegende Vorhaben fokussierte demgegenüber ausschließlich qualitätsbezogene Parameter der Verbundstruktur und des Fertigungsprozesses (und nicht Barriere-Materialien). In diesem Kontext werden eine reproduzierbare Fertigungspräzision und eine präzise definierte Wanddicke als wesentliche Bedingungen für die Realisierung einer konsistenten Bauteilqualität angesehen. Sie werden dabei durch geeignete Software zur Muster-/Trajektorien-Definition sowie durch prozessnahe Qualitätskontrolle (einschließlich der (Vor-)Definition des Faservolumengehalts) unterstützt und tragen damit zur Sicherung der Gesamt-Permeationsperformance von Typ-V-Behältern bei.

II.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Papers:

Cristiano B. Azevedo, Eduardo A. W. Menezes, Tales V. Lisbôa, José Humberto S. Almeida Jr., Matheus M. Madrid, Axel Spickenheuer, Sandro C. Amico, „Tailored Fibre Placement Patches for Locally Reinforcing Cutouts in Filament-Wound Composite Cylinders“, *Materials & Design* (Status: seit Dezember 2025 in Begutachtung).

Konferenzen:

Cristiano B. Azevedo, Eduardo A. W. Menezes, Tales V. Lisbôa, José Humberto S. Almeida Jr., Matheus M. Madrid, Axel Spickenheuer, Sandro C. Amico, „Local Reinforcement of Cutouts in Filament-Wound Composite Cylinders Using Tailored Fiber Placement Patches“, ECCM, Juni 2026 (Status: Abstract angenommen).

Geplante Veröffentlichungen:

Für 2026 sind die Einreichung eines weiteren Journalartikels sowie eines Konferenzbeitrags (Proceedings/Full Paper, sofern zutreffend) vorgesehen. Inhaltlich sollen diese Beiträge insbesondere die im Vorhaben erarbeiteten methodischen Neuerungen im Filamentwickeln adressieren (u. a. erweiterte Trajektorien-/Modellierungsansätze sowie deren Bedeutung für nicht-achsensymmetrische bzw. geometrieaktualisierte Wickelaufgaben).

Einordnung gegenüber der ursprünglichen Planung:

In der ursprünglichen Vorhabensplanung waren Konferenzbeiträge bereits für 2024 sowie eine Journalpublikation bis 2025 vorgesehen. Da wesentliche, publikationsreife Ergebnisse erst in einer späten Projektphase konsolidiert vorlagen, wurden die Veröffentlichungsaktivitäten entsprechend zeitlich verschoben. Zudem wurde eine Publikationsreihenfolge „Journal vor Konferenz“ gewählt, um eine konsistente wissenschaftliche Hauptveröffentlichung sicherzustellen und mögliche Überschneidungen (z. B. Selbstplagiat bei umfangreichen Proceedings) zu vermeiden.

Literaturverzeichnis

[Bit12] Bittrich, L.; Spickenheuer, A.; Uhlig, K.; Heinrich, G.: *EDOPunch – ein neues Tool zur Effizienzsteigerung und Optimierung von Stickmustern und Faserverbundteilen*. In: Proceedings 13. Chemnitzer Textiltechnik-Tagung, Chemnitz (2012).

[Bit17] L. Bittrich: „*Faserverbund-Leichtbau 2.0*“ in Future Technology Science Match, January 26, Dresden (2017).

[Bit19] Bittrich, L.; Spickenheuer, A.; Almeida Jr., J.H.S.; Müller, S.; Kroll, L.; Heinrich, G.: *Optimizing variable-axial fiber-reinforced composite laminates: The direct fiber path optimization concept*. Mathematical Problems in Engineering (2019), ID 8260563.

[Bra02] Brandt, J.; Geßler, A.; Filsinger, J.: *New Approaches in Textile and Impregnation Technologies for the Cost Effective Manufacturing of CFRP Aerospace Components*. Proceedings ICAS 2002, Toronto (2002), pp. 634.1–634.9.

[Dal19] Dalibor, I.H.; Lisbôa, T.V.; Marczak, R.J.; Amico, S.C.: *A geometric approach for filament winding pattern generation and study of the influence of the slippage coefficient*. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering 41 (2019), pp. 1–16.

[Dig13] Digel, W.: *Faserlegemaschine zum gleichzeitigen Verlegen und Vernähen mehrerer Faserstränge*. Digel Sticktech GmbH & Co. KG, DE102012219578A1 (application 2012).

[Fel12] Feltin, D.: *Industrial use of Tailored Fibre Placement*. Vortrag, 1st TFP Workshop – Tailored Fiber Placement meets Industrial Partners, Dresden (Nov 13, 2012).

[Fil03] Filsinger, J.; Lippert, T.; Stadler, F.; Utecht, S.: *Method and Device for Producing Fiber-Reinforced Components by an Injection Method*. (2003).

[Joh98] Johansen, B.S.; Lystrup, A.; Jensen, M.T.: *Cadpath: a complete program for the cad-, cae- and cam-winding of advanced fibre composites*. Journal of Material Processing Technology 77(1–3) (1998), pp. 194–200.

[Kos04] Koussios, S.: *Filament Winding: A Unified Approach*. IOS Press, Amsterdam (2004).

[Lei19] Leine, B.; Azran, A.: *Process for manufacturing a layer of yarns, via stitches, in particular for the production of composite material parts*. WO 002020025621 A1 (application 2020).

[Mal16] Malakhov, A.V.; Polilov, A.N.: *Design of composite structures reinforced curvilinear fibres using FEM*. (Composites Part A, 2016). DOI: 10.1016/j.compositesa.2016.04.005

[Mat21] Matsuzaki, R.; Mitsui, K.; Hirano, Y.; Todoroki, A.; Suzuki, Y.: *Optimization of curvilinear fiber orientation of composite plates and its experimental validation*. Composite Structures 255 (2021) 112956. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112956

[Pet11] Peters, S.T.: *Composite Filament Winding*. ASM International, Materials Park (2011).

[Rap20] Rapking, D.; Zhou, E.; Liu, B.; Braginsky, M.; Tandon, G.; Huelskamp, S.: *On the Development of a Computational Design Methodology for Tailored Fiber Placement Preforms*. SAMPE Conference Proceedings, Seattle, WA (May 4–7, 2020). (DOI field in proceedings: “will be filled by SAMPE” in the paper.)

[Rap21] Rapking, D.; Tandon, G.: *Final Technical Report PA16-0349-5.7-01 – Tailored Fiber Placement for Complex Preforms*. IACMI/R009-2021/5.7 (03/30/2021).

[Ric15] Richter, E.; Spickenheuer, A.; Bittrich, L.; Uhlig, K.; Heinrich, G.: *Applications of Variable-axial Fibre Designs in Lightweight Fibre Reinforced Polymers*. Proceedings, 20. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, Wien (July 1–3, 2015).

[Spi13] Spickenheuer, A.: *Zur fertigungsgerechten Auslegung von Faser-Kunststoff-Verbundbauteilen für den extremen Leichtbau auf Basis des variabelaxialen Fadenablageverfahrens Tailored Fiber Placement*. (2013).

[Spi14a] Spickenheuer, A.; Leipprand, A.; Bittrich, L.; Uhlig, K.; Richter, E.; Heinrich, G.: *Process dependent material properties for structural simulation of composites made by Tailored Fibre Placement*. ECCM16, Seville, Spain (June 22–26, 2014).

[Spi14b] Spickenheuer, A.; Bittrich, L.; Heinrich, G.: *EDOpath – A Novel Process Software for Tailored Fiber Placement*. 8th Aachen-Dresden International Textile Conference, Dresden (Nov 27–28, 2014).

[Uhl16] Uhlig, K.; Tosch, M.; Bittrich, L.; Leipprand, A.; Dey, S.; Spickenheuer, A.; Heinrich, G.: *Meso-scaled finite element analysis of fiber reinforced plastics made by Tailored Fiber Placement*. Composite Structures 143 (2016) 53–62. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.01.049

[Uhl19] Uhlig, K.; Bittrich, L.; Spickenheuer, A.; Almeida Jr., J.H.S.: *Waviness and fiber volume content analysis in continuous carbon fiber reinforced plastics made by tailored fiber placement*. Composite Structures 222 (2019) 110910.

[Zhu17] Zhu, Y.; Liu, J.; Liu, D.; Xu, H.; Yan, C.; Huang, B.; Hui, D.: *Fiber path optimization based on a family of curves in composite laminate with a center hole*. Composites Part B 111 (2017) 91–102. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.11.051

[Zhu18] Zhu, Y.; Qin, Y.; Qi, S.; Xu, H.; Liu, D.; Yan, C.: *Variable Angle Tow reinforcement design for locally reinforcing an open-hole composite plate*. Composite Structures 202 (2018) 162–169. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.01.021

[Zu07] Zu, L.; He, Q.X.; Ni, Q.Q.: *Pattern design for non-geodesic winding toroidal pressure vessels*. Proceedings ICCM-16 (2007).