Schlussbericht

für das LuFo VI-3 Verbundprojekt **HYBATS**

HYBATS

Hybrid Ice Protection on Advanced Natural Laminar Slat

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

Laufzeit des Vorhabens:	01.08.2023 - 31.03.2025
Förderkennzeichen:	20M2265F
Zuwendungsempfänger:	Faserinstitut Bremen e.V. Am Biologischen Garten 2 28359 Bremen Germany
Autor:	Marius Möller
Co-Autoren:	Dipl.-Ing. Richard Vocke Dr.-Ing. Patrick Schiebel

Bremen, 27.10.2025

Ort, Datum

Unterschrift des Projektleiters an der Forschungsstelle

Danksagung

Das LuFo VI-3 Verbundprojekt HYBATS wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Dafür möchten wir uns bedanken.

Darüber hinaus gilt der Dank den beteiligten Projektpartnern Airbus Operations GmbH, Airbus Aerostructures GmbH, Fraunhofer-Gesellschaft e.V., Henkel AG & Co. KGaA und dem Leibnitz-Institut für Verbundwerkstoffe GmbH für die gute und erfolgreiche Zusammenarbeit und die Unterstützung bei den Forschungsarbeiten.

Der Schlussbericht ist in der Technischen Informationsbibliothek (TIB) - Hannover veröffentlicht.

Kurzfassung

Im Rahmen des Projektes HYBATS wurden innovative Technologien zur Herstellung eines thermoplastischen, generischen Lasteinleitungselements entwickelt und erprobt. Ausgangspunkt bildeten grundlegende Materialuntersuchungen, die in Form von Coupon-Tests durchgeführt wurden, um ein geeignetes Prozessfenster für die Verarbeitbarkeit der eingesetzten Werkstoffe zu definieren. Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe wurden sowohl durch mechanische Prüfungen als auch durch visuelle Analysen evaluiert und bildeten die Basis für die nachfolgenden Arbeitsschritte.

Darauf aufbauend wurde eine vereinfachte Coupon-Geometrie (in Anlehnung an) einer Lasteinleitungsrippe konstruiert und gefertigt. Anhand dieser Bauteilgeometrie konnte das Fließverhalten der eingesetzten Chopped Tapes unter den zuvor ermittelten Verarbeitungsparametern detailliert untersucht werden. Hierbei konnten zentrale Erkenntnisse bezüglich des Füllgrades, des Porengehaltes sowie des generellen Fließverhaltens innerhalb der Kavität gewonnen werden.

Die daraus abgeleiteten Ergebnisse flossen unmittelbar in die Fertigung eines geometrisch komplexeren generischen Lasteinleitungselements ein, das zusätzlich durch gezielte Funktionsintegrationen erweitert wurde. Hierbei wurden unter anderem Metallbuchsen sowie Endlosfasereinleger in die Struktur integriert und deren Einfluss auf die Bauteileigenschaften untersucht. Die Versuche bestätigten die grundsätzliche Machbarkeit der weiteren Funktionalisierung auch für komplexe Geometrien.

Mit dem entwickelten Verfahren konnte schließlich gezeigt werden, dass durch den Einsatz hochfester thermoplastischer Werkstoffe die Herstellung geometrisch komplexer Primärstrukturen für die Luftfahrt möglich ist. Das Verfahren erlaubt dabei eine leichtbaugerechte und zugleich wirtschaftliche Fertigung in hohen Stückzahlen und eröffnet somit neue Perspektiven für den industriellen Einsatz der Chopped Tapes. Diese können perspektivisch dazu beitragen, Recyclingstrategien für z.B. Produktionsabfälle und Verschnittreste aufzuzeigen.

Abstract

As part of the HYBATS project, innovative technologies for manufacturing a thermoplastic, generic load transfer element were developed and tested. The starting point were fundamental material investigations, which were carried out in the form of coupon tests in order to define a suitable process window for the processability of the used materials. The results of this series of tests were evaluated both by mechanical testing and visual analysis and formed the basis for the subsequent work steps.

Based on this, a simplified coupon geometry (based on) a load-bearing rib was designed and manufactured. This component geometry was used to examine in detail the flow behavior of the chopped tapes used under the previously determined processing parameters. This provided key insights into the fill level, pore content and general flow behavior within the cavity.

The results derived from this were directly incorporated into the production of a (geometrically more complex) generic load-bearing element, which was additionally enhanced by targeted functional integrations. Among other things, metal bushings and continuous fiber inserts were integrated into the structure and their influence on the component properties was investigated. The tests confirmed the basic feasibility of further functionalization, even for complex geometries.

The developed process ultimately demonstrated that the use of high-strength thermoplastic materials makes it possible to manufacture geometrically complex primary structures for aviation. The process allows for lightweight and economical production in large quantities, thus opening up new perspectives for the industrial use of chopped tapes. In the future, these could contribute to identifying recycling strategies for production waste and scrap, for example.

Inhalt

Danksagung I

Kurzfassung II

Abstract III

Inhalt IV

I. Kurze Darstellung des Projekts 1

I.1 Aufgabenstellung 1

I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde 2

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens 2

I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn 3

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 8

II. Eingehende Darstellung des Projekts 9

II.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses 9

II.1.1 AP 0 Projektmanagement 9

II.1.2 HAP 2 Slat Struktur 10

II.1.3 HAP 3 Integration 25

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 35

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 35

II.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse 35

II.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen 35

II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses 36

III. Literaturverzeichnis 37

I. Kurze Darstellung des Projekts

Gemäß dem Muster zur Schlussberichterstellung nach Nr. 3.2 der BNBest-BMBF 98 werden nachfolgend kurz die Aufgabenstellung, die Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde, die zeitliche Planung, der wissenschaftliche und technische Stand an den angeknüpft wurde sowie die Zusammenarbeit mit den weiteren Projektpartnern dargestellt.

I.1 Aufgabenstellung

Im Rahmen des Vorhabens HYBATS wurden neue Technologien zur Fertigung geometrisch komplexer Primärstrukturbauteile aus Faserkunststoffverbunden am Beispiel einer generischen Lasteinleitungsrippe erarbeitet und erprobt. Bisher erfolgt die Fertigung solcher Bauteile aus metallischen Bauteilen als Frästeile. Um den Leichtbaugrad der Struktur zu steigern und Recyclingstrategien, sowie Strategien für den Einsatz von Produktionsabfällen aufzuzeigen, wurden thermoplastische Chopped Tapes im Heißpressprozess verwendet. Für die mechanische Leistungsfähigkeit der Bauteile wurde die Implementierung von Funktionalisierungen in Form von Endlosfasereinlegern und Metallinserts untersucht. Um kraft- und stoffschlüssige Fügemöglichkeiten aufzuzeigen, war die die Entwicklung und Charakterisierung nietfreier Fügeverfahren wesentliche Aufgabe des FIBRE bei der Entwicklung der Lasteinleitung. In Zusammenarbeit mit dem IGCV sollten die Auswirkungen auf die Nachhaltigkeit der entwickelten Bauteile in Verbindung mit den verwendeten Herstellungsverfahren im Rahmen einer LCA bewertet werden.

Um das Gesamtziel zu erreichen, mussten die folgenden Teilziele bearbeitet werden:

1. Vorflügelstruktur
    - Erarbeitung von nietfreien Fügekonzepten für die Lasteinleitung
2. Entwicklung generische Lasteinleitung
    - Material- und Prozesscharakterisierung der Chopped Tapes mit Coupon-Tests
    - Entwicklung und Fertigung von Coupon-Prüfkörper für mechanische Tests
    - Funktionalisierung mittels Metallinsert und Struktureinleger der Lasteinleitung
    - Untersuchung von Fräsabfällen und prototypische Fertigung
3. Entwicklung Hinterkante
    - Entwicklung von wabenfreien Herstellungs- und Konsolidierungskonzepten
4. Life Cycle Assessment
    - Lieferung von Stoff- und Energieströmen an die Projektpartner

5. Testing
    - Material- und Bauteiluntersuchungen auf Couponebene

6. Reparaturfähigkeit / Recycleability
    - Aufzeigen von Reparatur- und Recyclingstrategien

I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Durch den vorzeitigen Austritt von Airbus aus dem Projekt konnten ursprünglich geplante Projektarbeiten und Abstimmungen im Verbund nicht erfolgen. So wurden Bauteilgeometrien, die Prozesskette und die Charakterisierung weitestgehend eigenständig bearbeitet. In enger Zusammenarbeit mit dem IGCV zur Erarbeitung des LCA gab es einen umfangreichen Austausch zur Beschreibung und Definition der Prozesskette und des Materialeinsatzes.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Eingliederung der vom Faserinstitut Bremen e.V. (FIBRE) bearbeiteten Aufgaben in das Gesamtprojekt erfolge mit starkem Fokus auf die Entwicklung und Fertigung der Lasteinleitung. Das FIBRE unterstütze hierbei auch mit Stoff- und Energieströmen die Ausarbeitung der LCA.

Durch den vorzeitigen Austritt von Airbus fand die Bearbeitung der Arbeitspakete größtenteils in Eigenregie statt. Die Entwicklung der Lasteinleitung orientierte sich an einem von Airbus geteilten Design, welches dann in selbstständiger Arbeit neu konstruiert und abgeändert wurde. Die Änderungen zu Projektlaufzeit, -ablauf und -inhalt ergeben sich aus dem entsprechenden Änderungsantrag.

Der zeitliche Ablauf und die inhaltliche Struktur des Projekts kann dem Projektplan entnommen werden:

Tabelle 1 – Projektablaufplan (Aus Änderungsantrag)

Nr.:			Laufzeit	M 01	M 02	M 03	M 04	M 05	M 06	M 07	M 08	M 09	M 10	M 11	M 12	M 13	M 14	M 15	M 16	M 17	M 18	M 19	M 20
				Aug 23	Sep 23	Okt 23	Nov 23	Dez 23	Jan 24	Feb 24	Mrz 24	Apr 24	Mai 24	Jun 24	Jul 24	Aug 24	Sep 24	Okt 24	Nov 24	Dez 24	Jan 25	Feb 25	Mrz 25
1	AP 0	Projektmanagement	08/2023 - 03/2025																				
2	HAP 2	Vorflügelstruktur	08/2023 - 03/2025																				
3	AP 2.1	Entwicklung Vorflügelkörper	08/2023 - 01/2025																				
4	AP 2.2	Entwicklung generische Lasteinleitung	08/2023 - 03/2025																				
5	AP 2.2.3.1	Entwicklung und Fertigung Couponwerkzeug	08/2023 - 08/2024																				
6	AP 2.2.3.2	Couponherstellung und Analyse	06/2024 - 03/2025																				
7	AP 2.2.3.3	Entwicklung und Fertigung Lasteinleitungstool	09/2023 - 03/2025																				
8	AP 2.2.3.4	Generische Lasteinleitungsherstellung und Analyse	01/2025 - 03/2025																				
9	AP 2.3	Entwicklung Hinterkante	08/2023 - 01/2025																				
10	HAP 3	Integration	08/2023 - 10/2026																				
11	AP 3.1	Life Cycle Assessment	08/2023 - 02/2025																				
17	AP 3.4	Testing	08/2023 - 10/2026																				
18	AP 3.4.3.1	Tests und Analyse für Lasteinleitung	11/2023 - 10/2026																				
19	~~AP 3.4.3.2~~	~~Verbundübergreifende Tests und Analysen~~	~~02/2025 – 10/2026~~																				
20	AP 3.5	Reparaturfähigkeit / Recyclability	08/2023 - 03/2025																				
21	AP 3.5.3.1	Recyclingstrategie für Lasteinleitung	08/2023 - 03/2025																				
22	AP 3.5.3.2	Analyse prototypische Lasteinleitung aus Verschnitt	02/2025 - 03/2025																				

I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn

Die Entwicklungsschwerpunkte des FIBRE betrafen die Entwicklung einer Lasteinleitungsrippe. Dabei mussten aufgrund komplexer Randbedingungen innerhalb des HAP 2 innovative Lösungen gefunden werden. Einerseits sollte die Anbindung an die Haut sichergestellt werden und anderseits sollte die Montage des Eisschutzsystems gewährleistet werden. Weiterhin sollten die derzeitigen Lagerungsbedingungen des Vorflügels erhalten bleiben. Zusätzlich sollten prototypisch Verschnittreste als Rohstoff für Lasteinleitungen erprobt werden. Das FIBRE sollte dabei ein hybriden Materialansatz verfolgen. So sollten zur Ausbildung komplexer Geometrien und formschlüssigen Anbindung metallischer Lagerbuchsen sogenannte diskontinuierliche lange Fasern/*discontinuous long fibers (DLF)* genutzt werden. Zur Erhöhung mechanischen Leistungsfähigkeit sollten lastgerechte Verstärkungseinleger auf Basis von Endlosfasern verwendet werden. Um das nietfreie Fügekonzept zu unterstützen, sollten thermoplastische Matrixwerkstoffe verwendet werden.

Thermoplastische Verbundwerkstoffe

Bis zur Corona-Krise zeigte der weltweite Gesamtmarkt für Kohlenstofffasern und Carbon-Composites ein stabiles Wachstum. Die mittleren Wachstumszahlen lagen zwischen 10 – 12 %. Der Bedarf an kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) lag im Jahr 2017 bei 114 Tsd. Tonnen. Der Marktanteil von CFK mit thermoplastischer Matrix belief sich auf ca. 27,6 %, dieser ist in den letzten Jahren stetig gewachsen [SAU18].

FVK mit thermoplastischer Matrix zeichnen sich neben den klassischen Leichtbauaspekten, Gewichtsreduzierung und lastgerechter Faserverläufe, auch durch ihre Recycelbarkeit, kurze Zykluszeiten sowie ihrer Schweiß- und Thermoformbarkeit aus [VAI08]. Diese Vorzüge erschließen ein breites technologisches Anwendungsfeld. Durch die Verfahrenskombinationen können innovative Prozesse und Technologien geschaffen werden.

Die vielfältigen Technologien führen zu steten Entwicklungen im Bereich der DLF. So vermarktet die Firma Green Tweed basierend auf dem Material Xycomp® thermoplastische DLF Verbundbauteile [GRE15].

Abbildung 1: Halterung aus Xycomp® [GTW22]

Weiterhin befassen sich auch Forschungen mit der Analyse, Auslegung und dem Potential dieser Halbzeugklasse [BEL22; HOW14; COL21].

Entwicklung lastpfadgerechter Verstärkungen

Aufgrund der ausgeprägten Anisotropie der Verstärkungsfasern werden endlose Verstärkungsfasern vorzugsweise entlang der Hauptbelastungsrichtung abgelegt. Mittels Tailored Fiber Placement (TFP) lassen sich Fasern bedarfsgerecht ablegen. Die Technologie wird bereits seit einigen Jahren erfolgreich für die Fertigung von Preforms von Einlegern für RTM-Fensterrahmen des Airbus A350 angewendet [GAR13]. Im Hinblick auf thermoplastische Bauteile und die Verarbeitung von hybriden Materialien besteht noch Entwicklungsbedarf [KOE16].

In Abbildung 2 ist das prinzipielle TFP-Verfahren dargestellt.

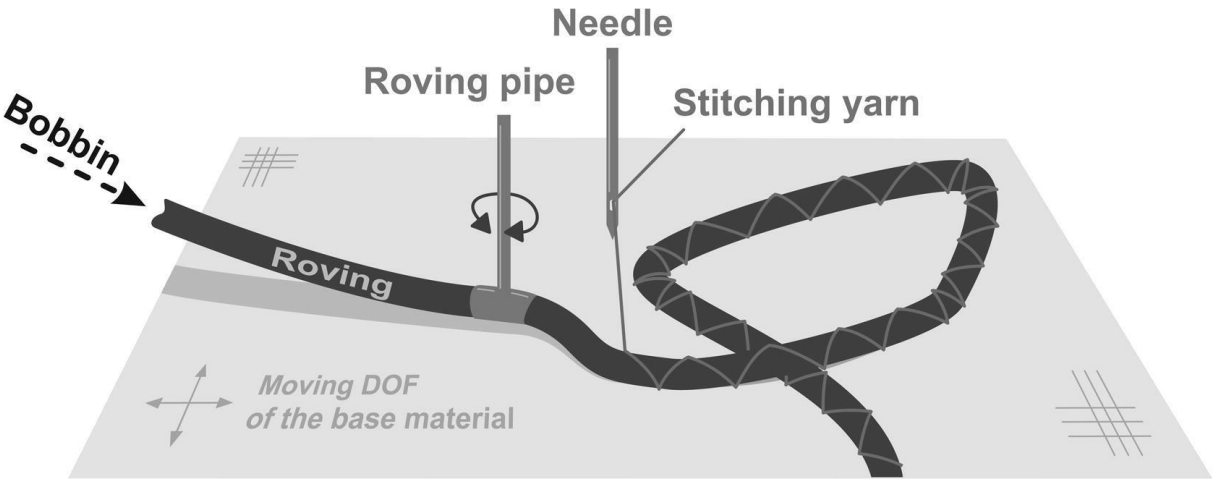


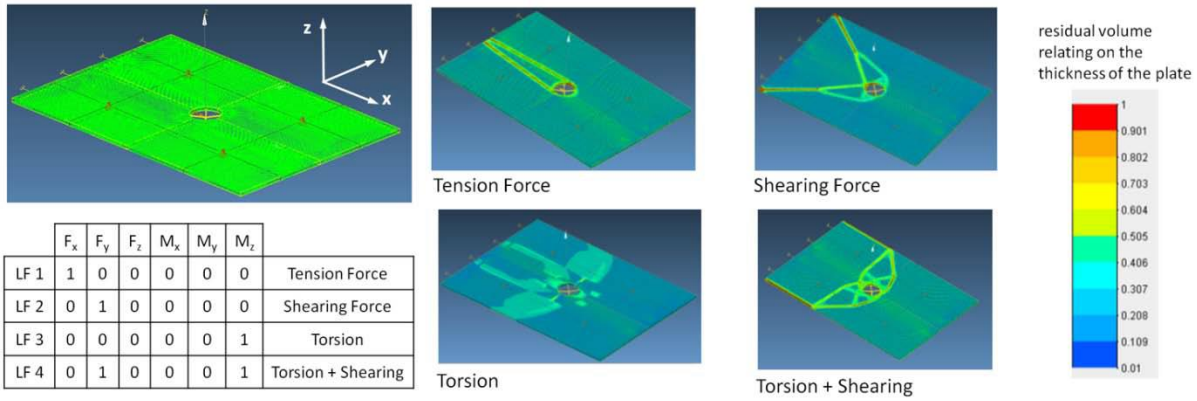
Abbildung 2: TFP-Prinzip [UHL16]

Der zugeführte Roving wird entsprechend der Lastfälle ausgerichtet und mittels Zick-Zack-Stich auf einem Stickgrund vernäht.

Das TFP-Verfahren wird zunehmend digitalisiert. Mittels der Software EDOstructure (http://cfs-

dresden.de/) lassen sich die Faserverläufe für komplexe Strukturen ableiten. Dazu müssen die Hauptspannungen der Struktur mittels FEM Simulation bestimmt werden. Das Programm EDOstructure liefert im Anschluss den Verlauf der Hauptspannungen (eben), anhand derer die Stickdatei abgeleitet wird.

Je nach Bauteil, -raum und Belastung ergeben sich unterschiedliche Faserverläufe. In Abbildung 3 sind die resultierenden Faserverläufe entsprechend unterschiedlicher Belastungsfälle dargestellt. Ziel ist es stets die optimale Faserauslastung zu gewährleisten.



	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z	
LF 1	1	0	0	0	0	0	Tension Force
LF 2	0	1	0	0	0	0	Shearing Force
LF 3	0	0	0	0	0	1	Torsion
LF 4	0	1	0	0	0	1	Torsion + Shearing

Abbildung 3: Beispiel für resultierende Faserverläufe entsprechend der Belastung [ARN15]

Durch den Einsatz der TFP-Technologie lassen bei bekannten Belastungen die spezifischen Vorteile der Faserverstärkung effektiv und nachhaltig nutzen, da dieses Verfahren quasi verschnittfrei arbeitet. Schwanemann et al. konnten so einen thermoplastischen Einleger für einen Fensterrahmen umsetzen [SCH22].

Thermoformen und Fließpressen

Thermoformen ist ein etabliertes Verfahren in der Luftfahrt. Überwiegend werden Clips und Cleats (Halte- und Verbindungselemente) zur Vernietung von Spanten und Stringern mit Flugzeugschale gefertigt.

Beim konventionellen Thermoformen werden Organobleche zugeschnitten. Die bauteilnahen Zuschnitte werden anschließend mittels Federn, Klammern oder Greifern fixiert. Nachdem Aufheizen zwischen zwei IR-Strahlerfeldern erfolgt der Transfer ins Werkzeug. Entsprechend des Materials muss die Werkzeugtemperatur eingestellt werden, damit sich während der Umformung die gewünschte Abkühlkurve einstellt. Dadurch wird die Kristallinität gezielt gesteuert. Gleichzeitig hat die Kristallinität Einfluss auf den Verzug [WIJ05]. Das abgekühlte Bauteil wird anschließend der Kavität entnommen und besäumt. Teilweise erfolgt zusätzlich eine Versiegelung der Schnittkanten.

Die Inspektion des Bauteils beschließt die Fertigung. Die automatisierte Prozesskette ist in Abbildung 4 dargestellt.

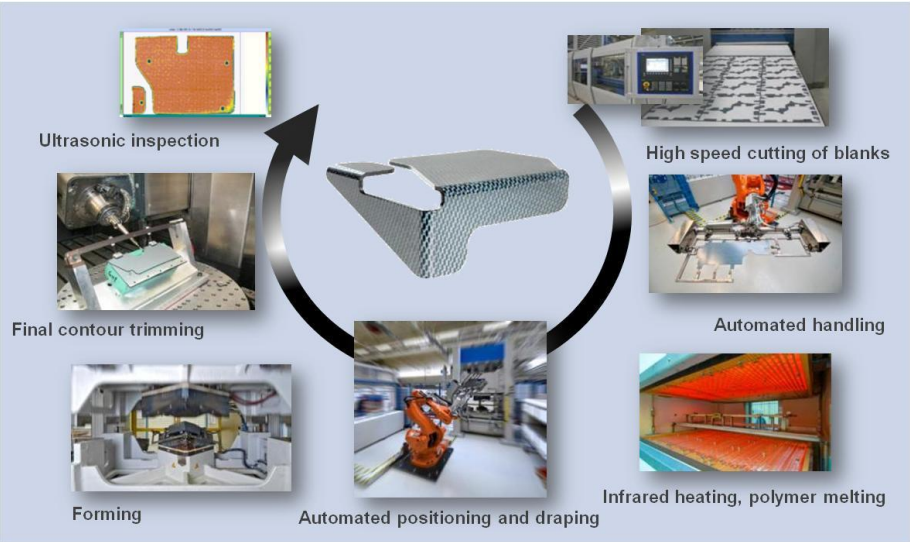


Abbildung 4: Automatisierte Thermoform-Prozesskette [MIA15]

Zunehmend werden Pick & Place Systeme genutzt, die durch hohen anlagentechnischen Aufwand (Linearportale/Mehrachsroboter) einen hohen Automatisierungsgrad aufweisen. Aus Einzellagen wird ein Stack gebildet, dies erlaubt einen höheren Freiheitsgrad für lastgerechte Halbzeuge.

Unter dem Verfahrenstitel “Quilted Stratum Process” (QSP®) hat die CETIM, Ecole Centrale de Nantes mit ihren Partnern einen Prozess entwickelt bei dem die Preform aus Einzelpatches aufgebaut wird. Trotz des hohen Verfahrensreife beim Thermoformen lässt sich dieses noch weiterentwickeln. In Abbildung 5 ist ein 2D-Preform und das ausgebildete 3D-Bauteil zu dargestellt.

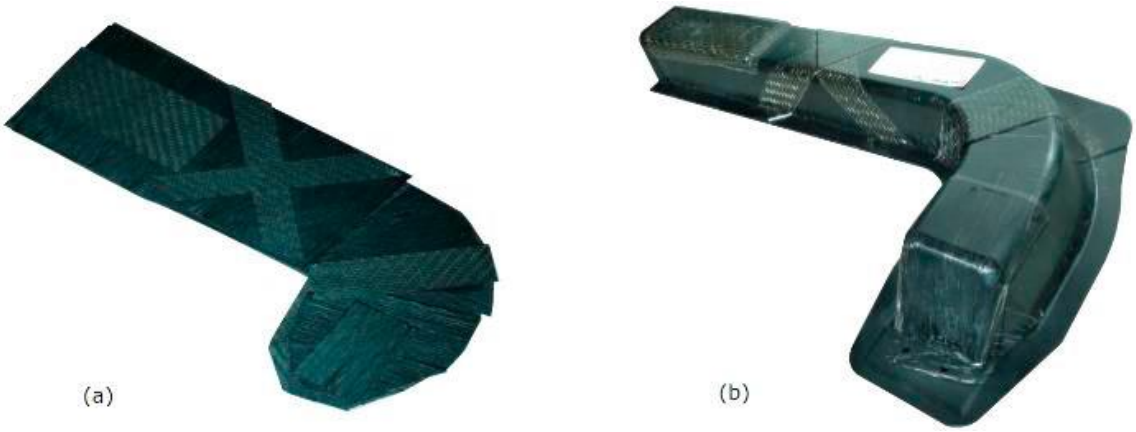


Abbildung 5: “Quilted Stratum Process” (QSP®) Preform (a) und Bauteil (b) [MUL20]

Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass trotz endkonturnahem Aufbau ein deutlicher Rand entsteht. In den weiteren Entwicklungen soll dieser Materialüberschuss reduziert werden.

Im Bereich Fließpressen gibt vielfältige Ansätze. So nutzt GreenTweed PEEK und PEKK basierte Tapes [GRE15]. Trotz einer Vielzahl an Anwendungen besteht ein hoher Forschungsbedarf, da die anisotropen in-plane Eigenschaften die Auslegung erschweren. Hier können gewebebasierte Chips Vorteile bringen, da die Kennwerte eine geringere Streuung aufweisen [BEL22]. Je nach Komplexität und Fließweg müssen die Prozessparameter angepasst werden [COL21, LEG20]. Weiterhin stellt der Verzug ein hohes Risiko für Anschlussmaße in einer Baugruppe dar. Allerdings scheint der Verzug bei „kleineren“ Chips geringer als bei „großen“ [COL21].

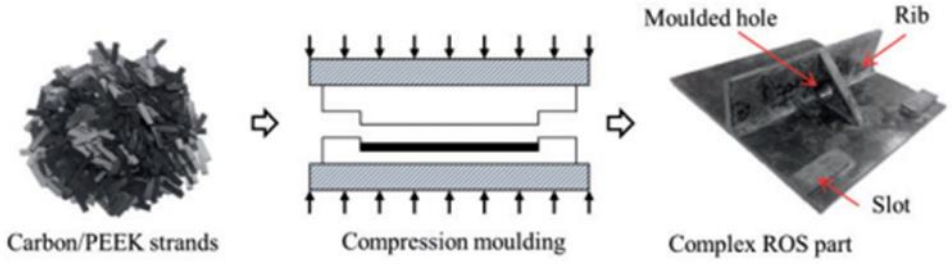


Abbildung 6 Prozesskette Fließpressen [SEL17]

Die typische Prozesskette ist in Abbildung 6 dargestellt.

Neben der Verwendung von geschnitten „Neutapes“ wird auch der wieder Einsatz erforscht [VIN22]. Eine mögliche Route ist in Abbildung 7 dargestellt.

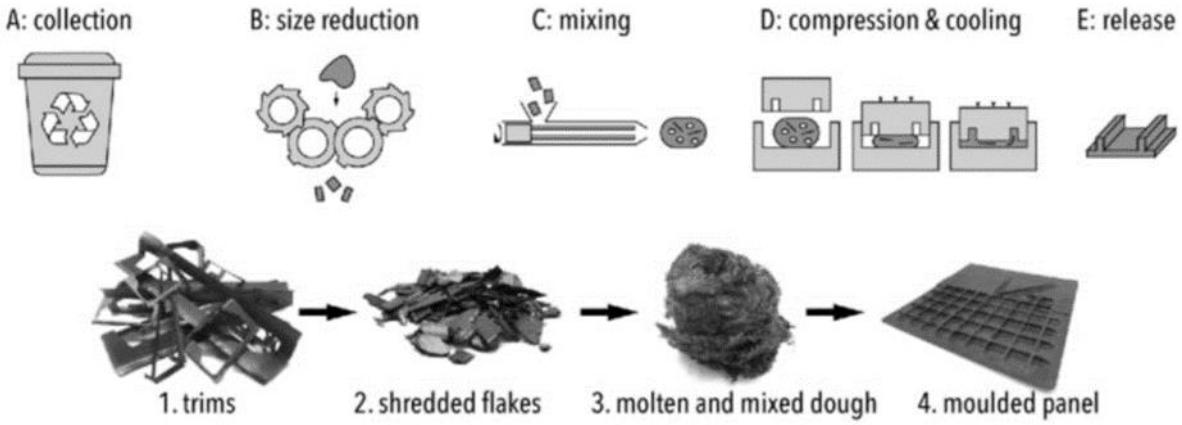


Abbildung 7 Mögliche Recyclingroute für Verschnittreste und Bauteile [VIN22]

Im Rahmen des Vorhabens wird sich das FIBRE mit Möglichkeiten der lastgerechten lokalen Verstärkungen solcher Pressmassen befassen.

Fügen

Das Fügen selbst ist nicht Bestandteil der Forschungsfragen des FIBRE. Jedoch werden die entwickelten Bauteile von Projektpartnern gefügt, daher wird kurz auf die gängigen Verfahren eingegangen. Prinzipiell lassen sich die Fügeverfahren in Kleben, Schweißen und mechanisches Fügen unterteilen [YOU04]. Das mechanische Fügen von FVK bringt zusätzliche Masse, durch die Fügeelemente, in die Strukturen ein. Weiterhin entstehen aufgrund der erforderlichen Qualität des Vorlochens und des Setzprozesses hohe Prozesskosten [HEB16]. Diese Kosten liegen im Bereich von 19 - 42 % der Gesamtkosten des Flugzeugs [COS12]. Beim Schweißen wird die Festigkeit der Verbindung durch die Eigenschaften der erstarrten Schmelze von Grund- und Hilfswerkstoff in der Fügezone bestimmt [PAT11]. Die Herausforderung besteht in der Erzeugung der lokal benötigten Energie [VIL19].

Schweißtechnologien polymerer Verbundwerkstoffe der Luftfahrt durch Widerstands-, Induktions- und Ultraschallschweißen beschreiben die Arbeiten von [Kou18, Zha18] grundlegend. Nahtschweißungen von Thermoplast-FVK-Komponenten in kontinuierlichen Prozessen zur Herstellung von großen acht Meter langen thermoplastbasierten CFK Rumpfstrukturen werden bereits demonstriert [COM20, EU01].

Im Rahmen des Vorhabens wird das FIBRE ggf. auf eine Variante der Co-Konsolidierung zurückgreifen um lastgerechte Einleger mit DLF zu geometrisch komplexen Bauteilen auszuformen. Vorteil dieses Verfahrens ist, das kein zusätzliches Gewicht durch Fügematerial eingebracht wird [COS12]. Beim klassischen Co-Konsolidieren werden alle Komponenten gemeinsam über Schmelztemperatur gebracht. Die Eigenschaften der Verbindung sind überwiegend durch die Matrix bestimmt, daher sind stoffgleiche oder stoffverträgliche System zu bevorzugen.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Durch den vorzeitigen Austritt von Airbus und den gekürzten Projektressourcen, sowie Zielen, wurde die Arbeitspakete weitestgehend selbstständig bearbeitet. Mit dem Fraunhofer IGCV fand eine umfangreiche und produktive Zusammenarbeit zur Erarbeitung der LCA statt. Das FIBRE lieferte dafür Prozess- und Materialcharakteristika für die Herstellung der Lasteinleitung und die Hinterkante. So konnte eine umfangreiche und detaillierte Auswertung erfolgen.

II. Eingehende Darstellung des Projekts

Gemäß dem Muster zur Schlussberichterstellung nach Nr. 3.2 der BNBest-BMBF 98 werden nachfolgend die erzielten Ergebnisse im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele eingehend dargestellt.

II.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses

II.1.1 AP 0 Projektmanagement

Ziele des Arbeitspakets:

- Ziel des APs war die begleitende Organisation des Projekts und Koordination der Interaktion zwischen den Partnern.

Im Projekt erzielte Ergebnisse:

- Dokumentation des Projektverlaufs und Abweichungen
- Durch den vorzeitigen Ausstieg von Airbus und dadurch bedingten Kürzungen vor allem Austausch mit dem Fraunhofer IGCV
- Konferenzbeitrag auf der 6. Fachkongress Composite Recycling & LCA in Stuttgart

Detaillierte technische Beschreibung der vom FIBRE durchgeführten Arbeiten

Absprache mit Projektpartnern zu Arbeitsinhalten und Austausch von Zwischenergebnissen.

II.1.2 HAP 2 Slat Struktur

Ziele des Arbeitspakets:

- Konzeptionierung von nietfreien Fügeverfahren für die Lasteinleitung
- Material- und Prozesscharakterisierung für die Verarbeitung der Chopped Tapes im Rahmen von Coupon-Tests
- Entwurf und Fertigung von des generischen Lasteinleitungselements
- Konzepte für die wabenfreie Hinterkante

Im Projekt erzielte Ergebnisse:

- Diskussion und Beschreibung von nietfreien Fügekonzepten, mit qualitativem Vergleich zum Co-Konsolidieren
- Material- und Prozesscharakterisierung mit der Herstellung von ebenen Platten und mechanische Charakterisierung
- Entwicklung und Fertigung von Coupon-Elementen zur Analyse des Fließ- und Füllverhaltens
- Herstellung von generischen Lasteinleitungselementen mit Endlosfaserverstärkung und Metallbuchsen
- Konzepte für die Fertigung und Konsolidierung einer wabenfreien Hinterkante

Detaillierte technische Beschreibung der vom FIBRE durchgeführten Arbeiten

AP 2.1 Entwicklung Slatkörper

Das FIBRE lieferte Konzepte zum nietfreien Fügen des generischen Lasteinleitungselements an eine Anbindungsstruktur. Die Lasteinleitung ist durch die Verwendung von Thermoplast als Matrix wiederaufschmelzbar und so ergeben sich verschiedene Schweißverfahren und das Co-Konsolidieren als (luftfahrttaugliche) Fügekonzepte. Potentiell möglich sind Laserstrahl-, Ultraschall-Widerstand- und das Induktionsschweißen. Durch die Bauteildicke und die Verwendung von C-Fasern in beiden Fügepartnern (mind. einer muss ausreichend transluzent sein, z.B. Glasfasern) entfällt das Laserstrahlschweißen. Ultraschallschweißen von komplexen Strukturen mit kleinen Krümmungsradien ist nach aktuellem Stand der Technik nicht möglich. Das Induktionsschweißen wird bei GFN Fokker bereits für die Serienfertigung von Luftfahrt-Primärstrukturen aus gewebeverstärktem PPS eingesetzt, jedoch verfügt die Übertragung auf andere Halbzeuge bislang einen geringen Reifegrad, weshalb es hier ebenfalls nicht weiter betrachtet wird.

Widerstandschweißen von faserverstärkten Thermoplasten hat in der Luftfahrt (für Flügelvorderkanten) bereits vor knapp 20 Jahren Anwendung gefunden[1], weshalb es als einzig grundsätzlich taugliches Schweißverfahren in HYBATS weiter betrachtet wurde. Es folgt zunächst ein qualitativer Vergleich und in Tabelle 2 eine Gegenüberstellung der Prozessparameter vom Widerstandschweißen und Co-Konsolidieren des Lasteinleitungselements.

Beim Co-Konsolidieren werden beide Fügepartner bis zur Verarbeitungstemperatur erwärmt, in einem Werkzeug unter Druck verpresst und bis unter die Glasübergangstemperatur abgekühlt. Beim Widerstandschweißen wird Strom durch einen Schweißleiter (z.B. Metallgewebe im Laminat) geleitet, welcher sich und das angrenzende Laminat dadurch erwärmt. Wenn die Verarbeitungstemperatur erreicht ist, werden die Fügepartner unter Druck verpresst. Der wesentliche Unterschied zwischen beiden Methoden ist der Ort und die Menge der eingebrachten Wärme. Während beim Co-Konsolidieren die Fügepartner vollständig erwärmt werden müssen, findet beim Widerstandschweißen nur eine lokale Erwärmung der Fügezone statt. Dadurch sinken benötigte Energiemenge und Prozesszeit deutlich. Durch den im Laminat verbleibenden Schweißleiter können die mechanischen Eigenschaften negativ beeinflusst werden, außerdem ist die Fügequalität schlechter (z.B. erhöhte Porosität) als beim Co-Konsolidieren. Für beide Fügeverfahren ist ein hydrostatischer Druck beim Verpressen wünschenswert, um eine gleichmäßige Qualität der Verbindung sicherstellen zu können. Diese Anforderung ergibt ein ggf. komplexeres und bauteilspezifisches Werkzeugdesign, welches in der Betrachtung hier vernachlässigt wird, da es keine genaueren Designvorgaben gibt. In der nachfolgenden Tabelle werden die Prozessparameter für das Fügen der Lasteinleitungsrippe gegenübergestellt.

Tabelle 2 Gegenüberstellung der Prozessparameter vom Co-Konsolidieren und Widerstandschweißen der Lasteinleitungsrippe

Prozessparameter	Co-Konsolidieren	Widerstandschweißen
Schweißzusatz	Nicht notwendig	Faser- und matrixgleiche Schweißleiter, In-Prozess Konsolidierung bei Herstellung möglich, Flächengewicht 80 g/m² (Zusätzliches Gewicht vernachlässigbar bei Betrachtung)
Prozessenergie	Mittel, Erwärmen der Bauteile auf bis zu 380 °C mittels Infrarot-Strahlerfeld Heizleistung 48 kW mit 60 s Heizphase ergibt Größenordnung 800 Wh Energiebedarf	Gering, Erwärmen der Fügezone für kurze Zeit Heizleistung 800 W mit 120 s Erwärmung ergibt Größenordnung 30 Wh Energiebedarf pro Schweißung

Rüstzeit	Gering, Bauteile in Infrarot-Strahlerfeld positionieren	Moderat, Schweißleiter an Stromquelle anschließen und Bauteile in Presswerkzeug einlegen (Größenordnung 10 min bei manuellem Prozess)
Prozesszeit	Gering, 60 - 90 s erwärmen und verpressen	Gering, <120 s erwärmen und verpressen
Fügequalität	Sehr hoch, Referenzqualität	Hoch, in aktuellen Untersuchungen bis 94 % SLS-Festigkeit im Vergleich zu Co-Konsolidierung (Vorstudie auf PA6 Basis, SLS untersucht beim Widerstandschweißen: LuFo VI-2 ThermoTwin)

Aufgrund der geringen Prozesszeit bei ausreichender Fügequalität und der um Faktor >25 (30 Wh zu 800 Wh), im Vergleich zum Co-Konsolidieren, geringeren Prozessenergie wird das Widerstandschweißen als Fügeverfahren ausgewählt. Die Schweißleiter können bei der Herstellung (mittels Automated Fiber Placement - AFP) des Einlegers für die Fügezone mit abgelegt und so direkt in das Laminat konsolidiert werden. Dadurch wird der Prozessaufwand weiter gesenkt. Eine aufbereitete Ausarbeitung mit einem konkreten Konzept für den hergestellten Demonstrator wird beim Workshop des Projektverbundes vorgestellt.

AP 2.2 Entwicklung Lasteinleitung

Begonnen wurde im Arbeitspaket mit der Charakterisierung des Verarbeitungsprozesses mit der Verwendung von Chopped Tapes für die Herstellung der Couponprüfkörper und des generischen Lasteinleitungselements. Verwendet wurde für die Versuche kohlenstofffaserverstärktes Polycarbonat (PC) (Maezio CF GP 1000T) in Form von Chopped Tapes mit einer Dicke von 0,17 mm und Längen von 6 mm und 10 mm (siehe Abbildung 8).

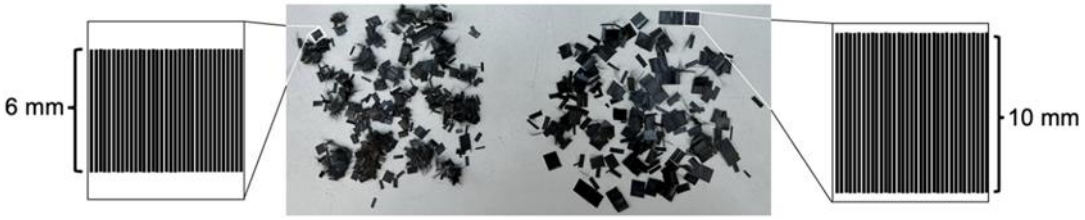


Abbildung 8 Verwendete Chopped Tapes mit 6 mm und 10 mm Tapelänge

Zur Materialcharakterisierung wurden ebene Platten, mit unterschiedlichen Prozessparametern (siehe Tabelle 2, Abbildung 9), gepresst. Die Versuche wurden mit einem Plattenwerkzeug aus dem Bestand des Faserinstituts durchgeführt.

Tabelle 3 Prozessfenster der Versuche mit CF-Polycarbonat

Temp. / Druck	20 bar	45 bar	70 bar
220 °C		x	
260 °C	x	x	x
300 °C		x	

Abbildung 9 Platte (200 x 300 x 2 mm) aus Chopped Tapes mit PC-Matrix; Parameter: 260 °C, 20 bar, 10 min Haltedauer

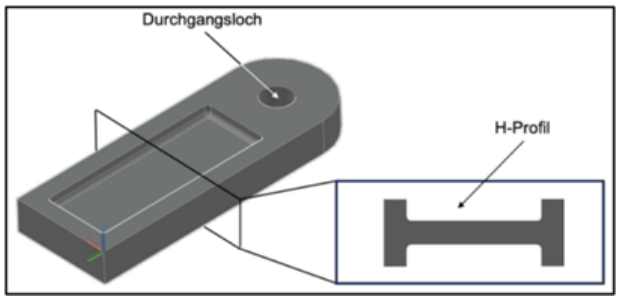


Abbildung 10 Coupon-Prüfkörper (Rippe)

Für die Entwicklung der Coupon-Prüfkörper Geometrie (Abbildung 10) wurden zunächst Anforderungen definiert und anhand eines morphologischen Kastens bewertet. Das Ziel war es, ein Design zu definieren, mit welchem die Integrierbarkeit von Endlosfasereinlegern, das Fließverhalten der Chopped Tapes in Abhängigkeit der Kavität und die Funktionsintegration mit einer Metallbuchse in der Lasteinleitung bewertet werden kann.

Für das Fließpress-Werkzeug wurden zusätzliche Rahmenbedingungen aus einer umfangreichen Literaturrecherche herausgearbeitet. Zusammen mit den Bedingungen aus der Beschreibung des Arbeitspakets bzw. des Gesamtprojekts, wurde ein morphologischer Kasten erstellt. Hierbei wurden erste Lösungswege definiert und diskutiert. Ein frühes Konzept ist in Abbildung 11 dargestellt.

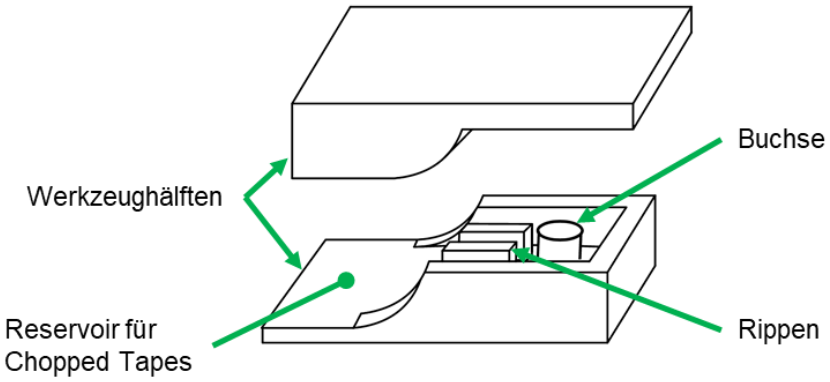


Abbildung 11 Konzept eines Thermoformwerkzeuges

Für die Konstruktion des Werkzeuges ergaben sich vor allem aus dem Herstellungsprozess Anforderungen. Das grundsätzliche Prinzip des Prozesses orientiert sich an dem des Spritzgusses, bei dem ein gezielter Materialfluss unter Druck und Temperatur in die Werkzeugkavität stattfindet. Hierzu wurde ein Reservoir vorgesehen, in welches die Chopped Tapes eingefüllt werden. Mithilfe eines Stempels wird das Material durch eine Öffnung im Reservoir in die Werkzeugkavität gedrückt. Die geöffnete Werkzeugkonstruktion mit gefüllter Kavität sowie die Funktionsweise sind in Abbildung 12 dargestellt. Das Werkzeug hat zwei Kavitäten mit je einem Reservoir, um eine zeiteffizientere Fertigung zu ermöglichen. Gleichzeitig besitzen die beiden Kavitäten unterschiedliche Querschnitte, um zusätzlich einen Einfluss von unterschiedlichen Kavitätsquerschnitten festzustellen.

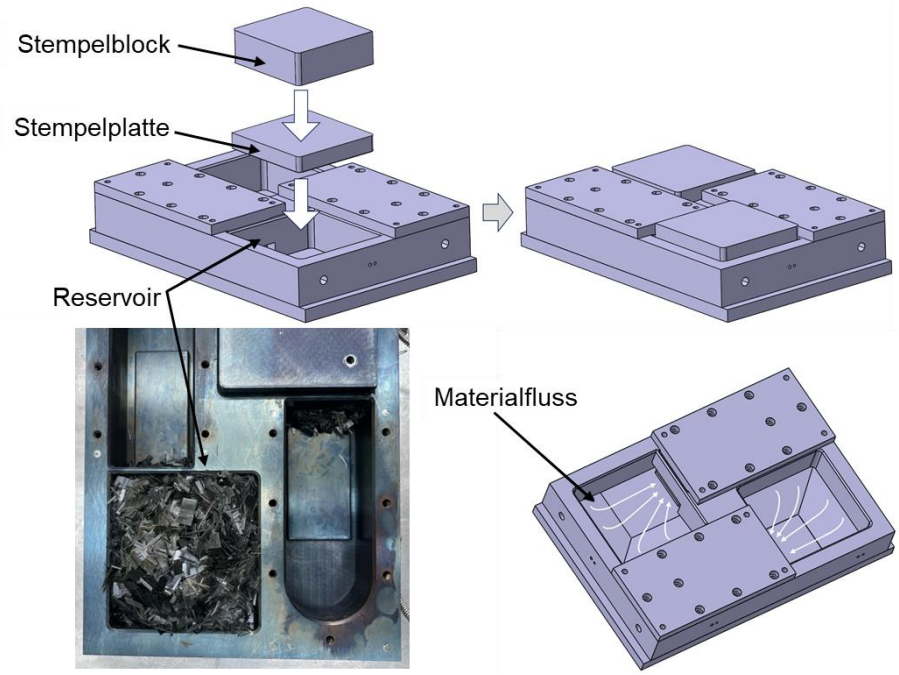


Abbildung 12 Schematische Darstellung des Couponwerkzeuges (Lasteinleitungsrippe) mit zwei Kavitäten

Mit dem Werkzeug und den zuvor definierten Prozessparametern wurden umfangreiche Versuchsreihen durchgeführt. Dabei wurden zwei Hauptreihen definiert: Eine mit konstanter Verarbeitungstemperatur und variierendem Verarbeitungsdruck und eine mit konstantem Druck und

variierender Temperatur.

Die Geometrie der Lasteinleitungsrippe und Hinterkante des Slatkörpers wurde mit Airbus in Teilen abgestimmt. Ausgangspunkt für die Entwicklung ist eine konventionelle Rippe, die von Airbus geteilt wurde. Auf Basis dieser hat das FIBRE eine 3D-Geometrie konstruiert. Durch das vorzeitige Austreten von Airbus aus dem Projekt wurde diese Geometrie abgeändert, während grundsätzliche geometrische Eigenschaften enthalten blieben.

Das aus der Rippe abgeleitete generische Lasteinleitungselement besteht, im Vergleich zur Lasteinleitungsrippe, weiterhin aus zwei Lagern mit Metallbuchsen, einem Lasttragenden Körper mit optionaler Endlosfaserverstärkung sowie einer Fläche (Fügezone) zur Kraftübertragung und Anbindung an eine andere Struktur (Abbildung 13).

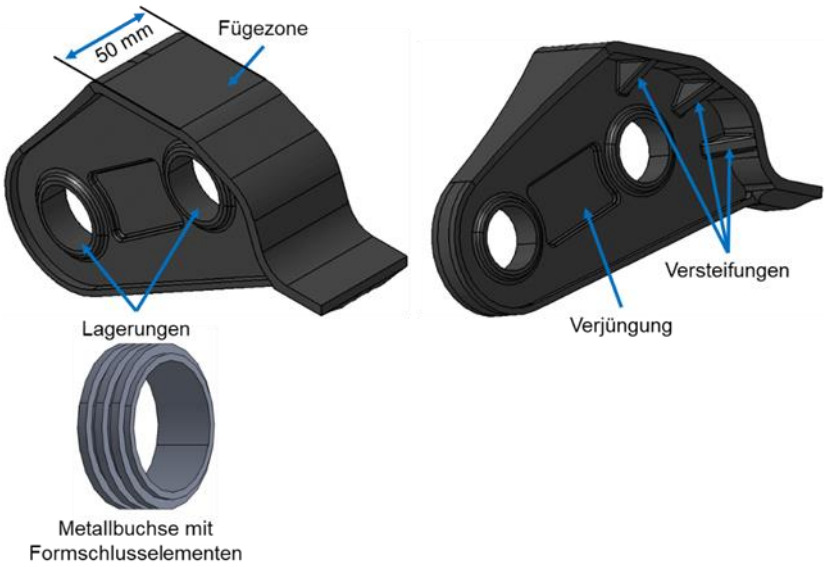


Abbildung 13 Generisches Lasteinleitungselement und integrierte Metallbuchsen

In der Fügezone kann ebenfalls ein endlosfaserverstärkter Einleger eingesetzt werden, der mittels TFP oder AFP hergestellt wird und so die Anpassung des Laminats an das Fügeverfahren erlaubt. Für eine Verbindung mittels Nieten kann Beispielsweise ein entsprechend günstiger Lagenaufbau gewählt werden, für eine Widerstandschweißung kann der Schweißleiter beim Ablegen mit in das Laminat konsolidiert werden. Der Einleger wird im Prozess, wie auch der Einleger zur Festigkeitssteigerung, mit den Chopped Tapes konsolidiert, um kurze Prozesszeiten und eine gute Anbindungsqualität zu ermöglichen. Die Metallbuchse hat Formschlusselemente in Form von Rillen, die durch die Chopped Tapes im Prozess umflossen werden und so die Anbindung verbessern. Aus dieser Geometrie wurde die Werkzeugkavität abgeleitet, in welche die Erkenntnisse des Coupon-Werkzeuges einflossen (Abbildung 14).

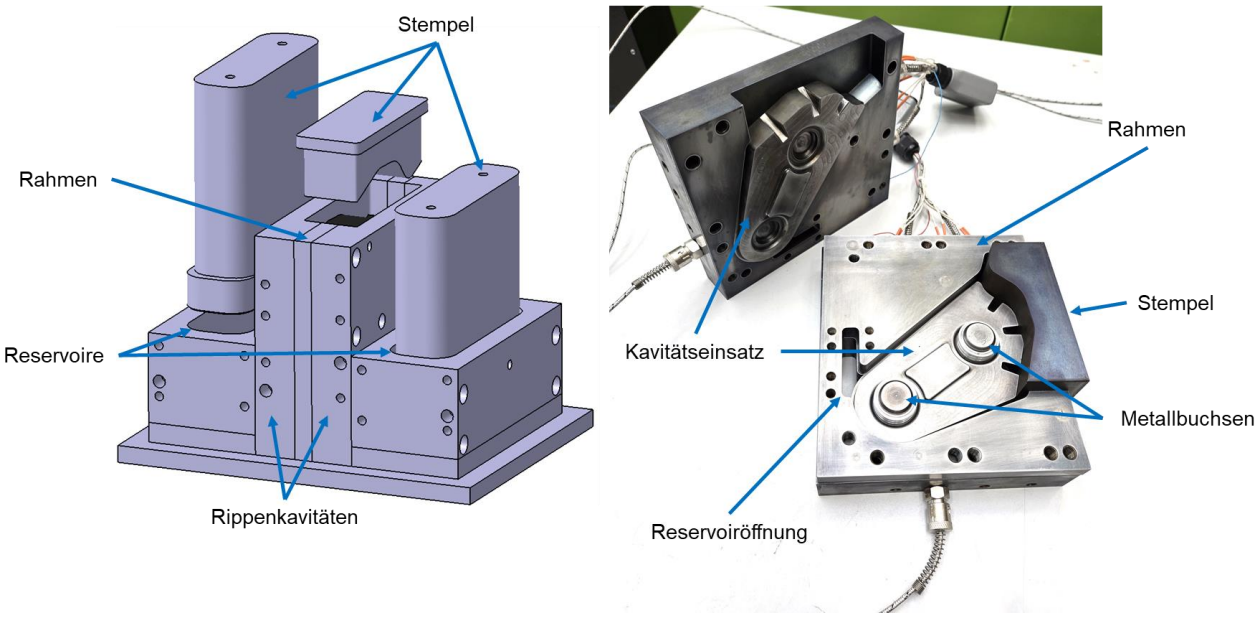


Abbildung 14 Presswerkzeug für das Lasteinleitungselement: Gesamtwerkzeug (CAD) und Detailansicht Werkzeugmitte (Foto)

Das Werkzeug besteht aus zwei Reservoiren, in die die Chopped Tapes gefüllt werden. Dort werden mit der Presse zwei Stempel nach unten gedrückt, wodurch die Tapes durch eine Öffnung in den mittleren Teil des Werkzeuges fließen können, wo sich die Kavität des Lasteinleitungselements befindet. Auf der oberen Seite des Werkzeuges befindet sich ein weiterer Stempel, der zusätzlichen Konsolidierungsdruck auf die Anbindungsfläche des Bauteils einbringt. Dort wird der optionale Einleger platziert und so die Konsolidierung mit den Chopped Tapes sichergestellt. Im Prozess wird durch das Einbringen einer genauen Materialmenge der Füllgrad der Reservoirs so angepasst, dass beim finalen Einbringen des Drucks alle drei Stempel an der Presse anliegen. So kann ein gleichmäßiger Druck im Werkzeug gewährleistet werden.

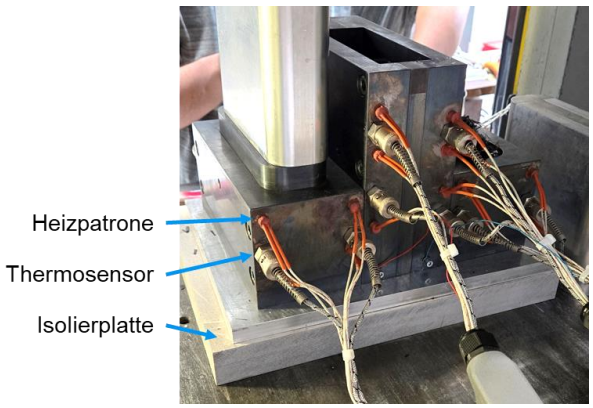


Abbildung 15 Gerüstetes Werkzeug in der Presse

Die Erwärmung des Werkzeuges erfolgt mittels 14 Heizpatronen, die jeweils 400 W Heizleistung (insgesamt 5,6 kW) besitzen. Die Regelung findet jeweils über Thermosensoren statt, wobei 12 Heizpatronen zu zweit und 2 Heizpatronen einzeln über einen Thermosensor geregelt werden. Um den Wärmeabfluss vom Werkzeug in die kalte Presse zu reduzieren, werden an der Unter- und Oberseite des Werkzeuges Isolierplatten platziert, die aus mit Silikonharz imprägniertem Glimmerpapier bestehen. Die Platte an der Oberseite hat eine Dicke von 10 mm, die Platte an der Unterseite 35 mm.

Um ein sicheres Aufschmelzen und gleichmäßige Verarbeitungstemperatur in der gesamten Kavität sicherzustellen, erfolgte eine numerische Simulation des Werkzeuges. Dabei soll die gleichmäßige

Erwärmung (max. 10 °C Temperaturdifferenz im mittleren Teil des Werkzeuges) nachgewiesen werden. Die Temperaturen werden an 8 Stellen berechnet, an denen die Temperatursensoren sitzen. Sie befinden sich jeweils in der Mitte des Werkzeuges am Ende der Bohrungen.

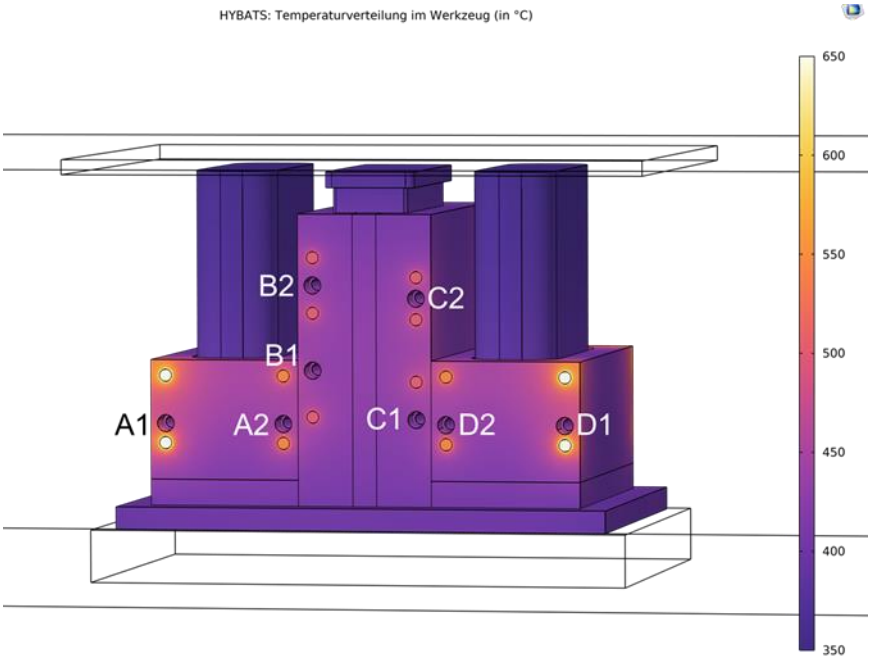


Abbildung 16 Simulation der Temperaturverteilung mit der Zieltemperatur 400 °C (Simulierte Regelegung mit 14 Heizpatronen); Temperaturen in den Messstellen: A1/D1 = 397 °C, A2/D2 = 402 °C, B1 = 408 °C, C1 = 405 °C, B2/C2 = 401 °C; im Bild ausgeblendet – aber simulativ berücksichtigt - sind Isolierplatten und Presse

Die Simulation der Werkzeugtemperatur (Abbildung 16) zeigt eine gleichmäßige Erwärmung des Werkzeuges. Lediglich im lokalen Bereich der Heizpatronen ist eine größere Erwärmung zu sehen. Die maximale Temperaturdifferenz beträgt 11 °C zwischen der kältesten Stelle A1/D1 mit 397 °C und der wärmsten Stelle B1 mit 408 °C im Werkzeug. Die Temperaturdifferenz in den Mittelteilen des Werkzeuges (C1 zu B2/C2) beträgt hingegen nur 7 °C, was innerhalb der angestrebten Differenz von 10 °C liegt.

Für die Herstellung des Schlaufeneinlegers wurde ebenfalls ein Werkzeug gefertigt, siehe Abbildung 17. Dieses dient zur Herstellung eines einfachen Schlaufenelements, neben der Möglichkeit einer mechanischen Leistungssteigerung für einen generischen Lastfall soll hieran vor allem das Prozessverhalten und die Konsolidierung mit den Chopped Tapes untersucht werden. Im Austausch mit Airbus wurde auch ein möglicher Lastfall für das Lasteinleitungselement definiert. Im Fall der Lasteinleitungsrippe des Vorflügels können die Aktuatoren, die die Rippe bewegen, teilweise ausfallen. Im kritischsten Fall würde ein Aktuator blockieren und der vordere weiter nach vorne drücken. Da keine weiteren Kräfte oder Kraftrichtungen definiert wurden, wurde daraus ein einfacher Lastfall abgeleitet. Dieser ist in Abbildung 18 qualitativ eingezeichnet (rote Pfeile). Daraus leitet sich die Schlaufengeometrie ab, die die mechanische Leistungsfähigkeit entlang der Längsachse

steigern soll. Durch die Projektkürzung erfolgten keine Verbundübergreifenden Tests, wodurch auch die Leistungsfähigkeit nicht mehr getestet und analysiert wird. Dadurch ist der Schlaufeneinleger nur als Konzeptstudie zu sehen, um das Einbringen eines Struktureinlegers in den Fließpressprozess zu untersuchen. Das Design ist eine triviale Schlaufengeometrie, welche an den Metall-Inserts anliegt (siehe Abbildung 18).

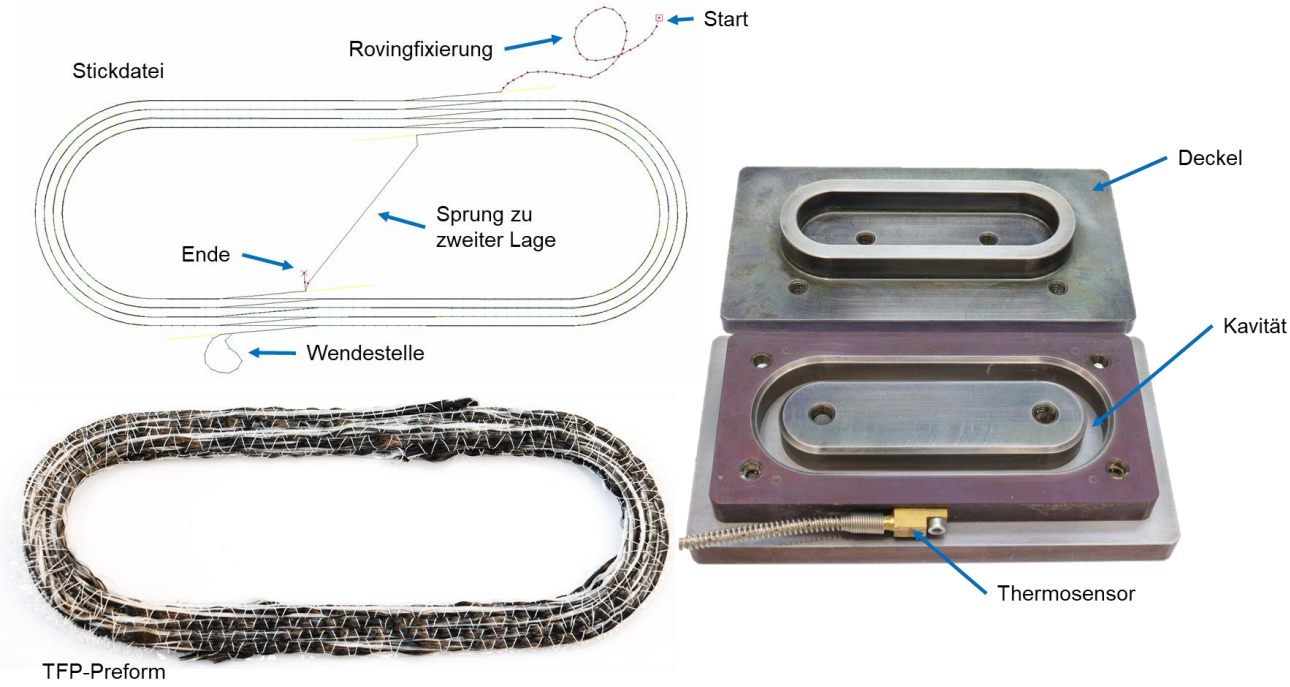


Abbildung 17 Werkzeug und TFP-Schlaufeneinleger

Abbildung 18 CAD-Bild des Lasteinleitungselements (mit Lastfall Kraft „F“ und Position Schlaufenelement) und Bild des konsolidierten TFP-Einlegers mit Metallbuchsen (Aluminium)

Der Einleger für die Anbindungsfläche besteht aus parallel abgelegten Rovings über eine Fläche von 49 x 149 mm abgelegt und ist damit leicht kleiner als die Anbindungsfläche von 50 x 150 mm. Damit soll das problemlose Einlegen in die Werkzeugkavität sichergestellt werden (Abbildung 19). Der Lagenaufbau ist quasi-isotrop [0 60 -60]s , da hier komplexe Spannungszustände zu erwarten wären.

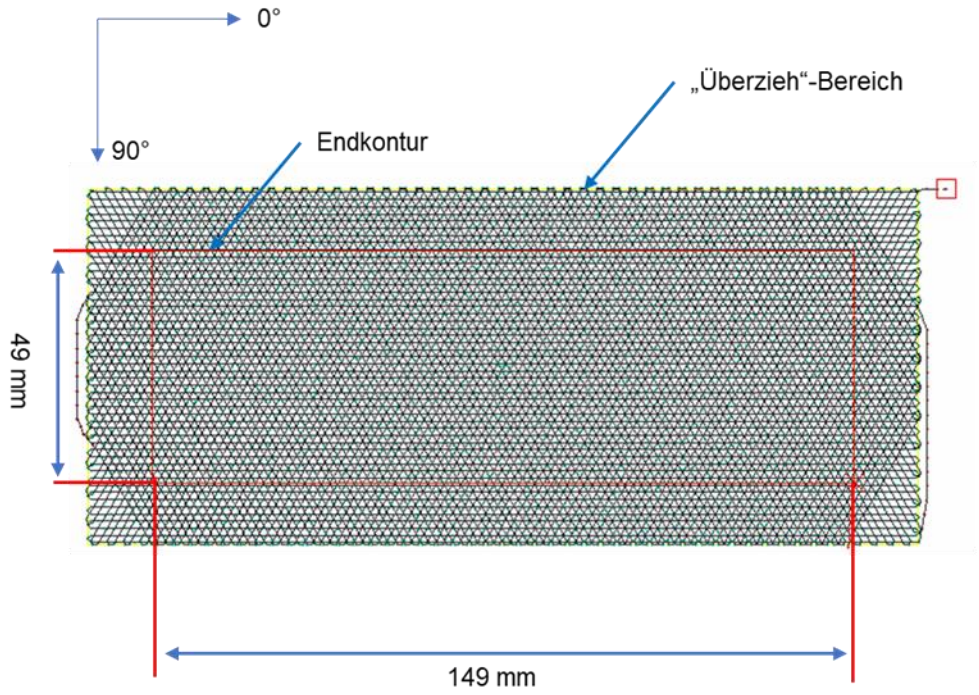


Abbildung 19 TFP-Stickatei des Anbindungseinlegers mit (in rot markiert) Endkontur (wurde ausgeschnitten) und dem „Überzieh"-Bereich, um Wendestellen des Rovings trimmen zu können

Im nächsten Schritt wurden die TFP-Einleger gefertigt. Pro Schlaufeneinleger werden zwei Preforms bestehend aus jeweils zwei Lagen verpresst (insgesamt 4 Lagen). Die Einleger bestehen dabei aus zwei Preforms mit jeweils drei Lagen (insgesamt 6 Lagen), die, im Gegensatz zum Schlaufeneinleger, direkt im Herstellungsprozess des Lasteinleitungselements konsolidiert wurden. Alle TFP-Einleger wurden hergestellt mit einem C-Faser/Polycarbonat Hybridroving, PC-Folie als Stickgrund und Polyester Nähgarn:

Hybridroving:

- Produktname: Comfil 57C−PC−1400
- Verstärkungsfasern: 12k Carbonfaser
- Matrixfasern: Polycarbonat (PC)
- Feinheit Hybridroving: 1400 tex
- Faservolumengehalt: 48 %

Stickgrund:

- Material: PC (Folie)
- Stärke: 0.1 mm

Nähgarn:

- Produktname: Amann Serfil Comphil
- Material: Polyester Multifilament
- Feinheit: 30 tex

Die Tape-Einleger für die Anbindungsfläche bestehen aus einem reinen UD-Lagenaufbau mit 26 Einzellagen:

C-Faser/Polycarbonat Tape:

- A+ CF-PC-55-102-148 UD-Tape
- Stärke: 0,15 mm
- Faservolumengehalt: 55 %

Bei der Herstellung der Lasteinleitung wurde zunächst die notwendige Menge an Chopped Tapes (mittels CAD-Volumen) bestimmt. Aufgrund des Volumens für den Fließkanal und dem notwendigen Restvolumen in den Reservoirs, beträgt die Füllmasse mehr als das Nettogewicht eines Elements. Bei den verschiedenen Herstellungsvarianten variiert die Füllmenge zwischen 540 g für eine Element mit 100 % Anteil Chopped Tapes und 490 g für eins mit Anbindungseinleger + Metallbuchsen. Die entformte Rippe aus 100 % Chopped Tapes wiegt 233 g.

Tabelle 4 Versionen des generischen Lasteinleitungselements

Variante	Füllmenge Chopped Tapes	Verstärkungseinleger	Metallbuchse
V1	540 g	ohne	ohne
V2	531 g	ohne	Mit
V3	524 g	Schlaufeneinleger	Mit
V4	490 g	Anbindungseinleger	Mit

Nachfolgend ist ein gefülltes Reservoir und ein eingelegter Anbindungseinleger (UD-Tape Lagenaufbau) abgebildet. Es verdeutlicht die Ausdehnung des unverpressten Materials. In Abbildung 14 war bereits die Rüstung des Materials in der Kavität (Metallbuchsen) abgebildet. Das Material wurde vor den Versuchen unter Vakuum für 4 h bei 125 °C vorgetrocknet.

Abbildung 20 Werkzeug mit eingelegtem Anbindungseinleger (UD-Tape) und mit Chopped Tapes gefülltes Reservoir

Für die Herstellung der Rippen wurde eine Regeltemperatur von 280 °C und ein Kavitätsdruck von 60 bar gewählt. Diese Prozessparameter basieren auf den Ergebnissen mit der Coupon-Lasteinleitungsrippe und befinden sich, aufgrund der höheren Komplexität, am oberen Ende des ermittelten Prozessfensters. Im Prozess heizt das Werkzeug mit der beschriebenen Regelung in 42 min auf und kühlt ohne aktive Kühlung unter Druck 100 min auf 60 °C ab. Moderne induktiv beheizte Werkzeuge sind in der Lage in vergleichbarer Größe in < 5 min die gleiche Temperatur zu erreichen [CW24]. Nachfolgend ist ein Diagramm mit Prozessparametern für die Herstellung eines Lasteinleitungselements dargestellt (Abbildung 21).

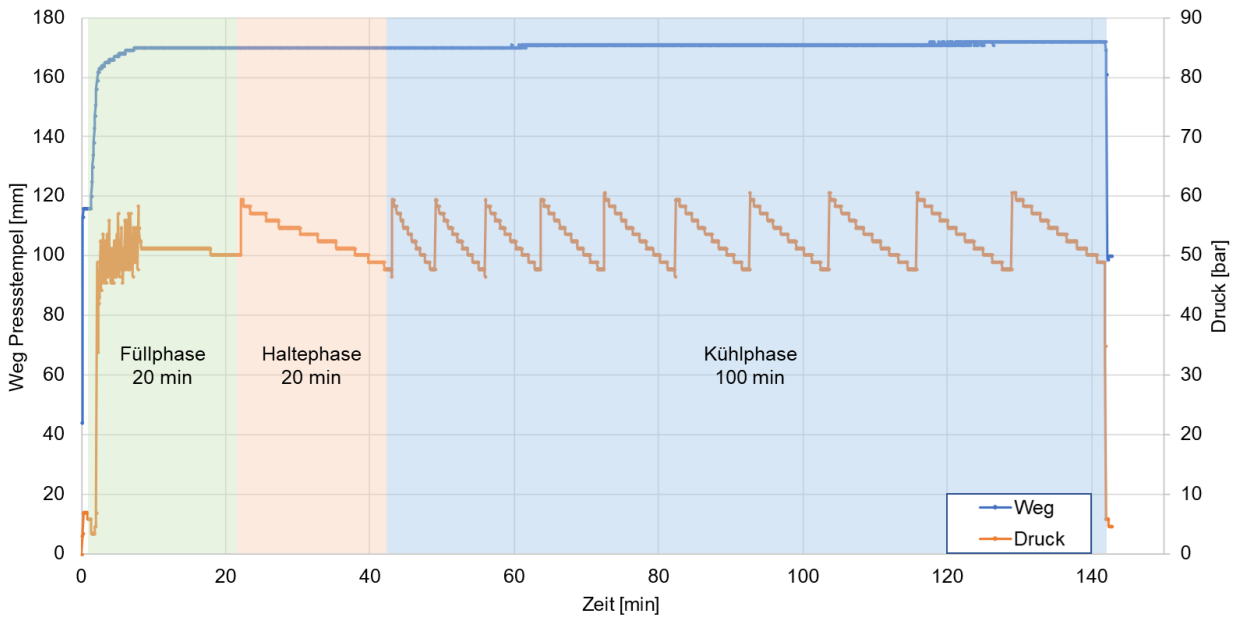


Abbildung 21 Prozessdiagramm für die Herstellung eines Lasteinleitungselements: Druck/Zeit und Weg Pressstempel/Zeit, dazu die einzelnen Prozessabschnitte Füll-, Halte- und Kühlphase farblich gekennzeichnet

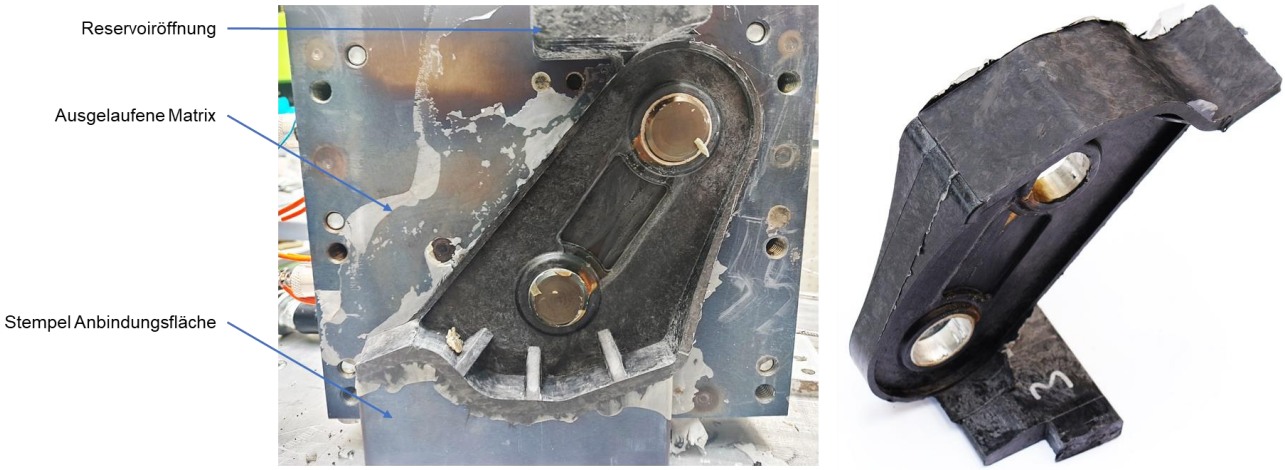


Abbildung 22 Ausgeformtes Lasteinleitungselement im Werkzeug und nach dem Entformen

Nach dem Entformen muss der Angusskanal mechanisch abgetrennt werden. Dieser kann anschließend entweder zurück in der Kavität platziert oder mechanisch zerkleinert werden. Mit einem leicht angepassten Werkzeugdesign könnte dieser auch direkt am Bauteil beim Entformen abgetrennt werden und im Werkzeug verbleiben. In jedem Fall kann die Masse wieder aufgeschmolzen und für die Herstellung wiederverwendet werden.

Abbildung 23 Aufbereitetes Lasteinleitungselement (entgratet, abgetrennter Anguss)

In Abbildung 23 dargestellt ist ein aufbereitetes Lasteinleitungselement der Variante V1 aus 100 % Chopped Tapes. Dieses wiegt 233 g im Vergleich zu 420 g aus einer (volumengleichen) Bauweise aus Aluminium. Dabei liegt ein Gewichtsersparnis von 44 % ohne Metallinsert und von 43 % mit Aluminium-Insert vor. Durch die materialgleichen Verstärkungseinleger wird das Gewicht des Lasteinleitungselements

AP 2.3 Entwicklung Hinterkante

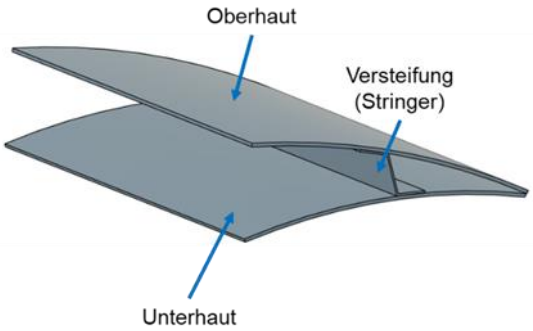


Abbildung 24 Qualitative Darstellung der Hinterkante, bestehend aus Ober- und Unterhaut und einem Z-Stringer als Versteifung

Im AP 2.3 unterstützte das FIBRE bei der Ausarbeitung eines Fertigungskonzeptes für die Hinterkante, welche durch die verkürzte Projektlaufzeit und das vorzeitige Austreten von Airbus jedoch nicht mehr umgesetzt wurde. Zur Veranschaulichung der Geometrie dient daher ein qualitatives Modell (siehe Abbildung 24). Die Hinterkante soll im Vergleich zur aktuellen Bauweise ohne Waben gebaut werden. Als Werkstoff wird ebenfalls kohlenstofffaserverstärktes PEEK verwendet. Generell werden zwei unterschiedliche Ansätze bei der Herstellung der Hinterkante betrachtet: Eine Herstellung von Organoblechen aus UD Tapes mit anschließendem Zuschnitt und einer Endkonturnahen Herstellung der Bauteile mittels AFP. Dabei gibt es jeweils zwei Prozessrouten, die in Tabelle 5 aufgelistet sind. Bei der Herstellung der Hinterkante aus Organoblech ist ein Konsolidieren in der Intervallheißpresse notwendig, die Krümmung der Hinterkante kann durch die Biegung bei der Montage erzielt werden oder durch eine zusätzliche Umformung in der Presse, mit vorheriger Erwärmung durch einen Infrarotstrahler. Zur Einschätzung der Machbarkeit wären hier

genauere Geometrieanforderungen notwendig. Bei der Herstellung mittels 2D-AFP kann die Umformung in der Presse erfolgen oder mittels 3D-AFP direkt die gewünschte Krümmung bei der Ablage erzeugt werden. Bei einem optimalen Ablageprozess erfolgt die Konsolidierung bereits hier vollständig, sodass keine anschließende Konsolidierung in der Presse erfolgen muss.

Tabelle 5 Vergleich der Prozessparameter der verschiedenen Prozessrouten für die Herstellung der Hinterkante [Angerer, Fraunhofer IGCV 2025]

Prozessspezifikation: Hinterkante (Oberseite + Unterseite)					
		Organoblech aus UD-Tape inkl. Zuschnitt	Organoblech aus UD-Tape inkl. Zuschnitt und Umformung in Presse	AFP 2D inkl. Konsolidierung in Presse	AFP 3D inkl. Konsolidierung während Ablage
Prozesstemperatur Intervallheißpresse	Stufe 1	380 °C	380 °C	---	---
	Stufe 2	120°C	120°C	---	---
Prozesszeit Intervallheißpresse	Stufe 1	10 min	10 min	---	---
	Stufe 2	2 min	2 min	---	---
Prozessdruck Intervallheißpresse	Stufe 1	1 bar	1 bar	---	---
	Stufe 2	40 bar	40 bar	---	---
Materialverlust Organoblechzuschnitt	Min	10%	10%	---	---
	Max	15%	15%	---	---
Prozesstemperatur IR-Feld	Min	---	370 °C	370 °C	---
	Max	---	400°C	400°C	---
Prozesszeit IR-Feld	Min	---	5 min	5 min	---
	Max	---	---	7 min	---
Prozesstemperatur Presse	Min	---	220 °C	220 °C	---
	Max	---	240 °C	240 °C	---
Prozesszeit Presse	Min	---	2 min	2 min	---
	Max	---	5 min	5 min	---
Prozessdruck Presse	Min	---	25 bar	25 bar	---
	Max	---	---	---	---
Materialverlust Nachbearbeitung	Min	---	2%	2%	2%
	Max	---	5%	5%	5%

Da für die Auswahl für das finale Fertigungskonzept weitere Angaben erforderlich sind, wird an dieser Stelle auf eine Festlegung eines finalen Konzeptes verzichtet.

II.1.3 HAP 3 Integration

Ziele des Arbeitspakets:

- Liefern von Energie- und Stoffströmen für das Life Cycle Assessment (LCA) an Projektpartner
- Analyse der hergestellten Coupon-Prüfkörper und Bauteile mittels Schliffbilder, CT-Bilder und quasistatischen Tests
- Erstellen von Reparatur- und Recyclingkonzepten für die Lasteinleitung bzw. Slatkomponenten, inklsuive von Strategien zu Demontage von thermisch gefügten Komponenten

Im Projekt erzielte Ergebnisse:

- Umfangreiches Lifecycle Assessment für die Lasteinleitung, aufstellen und ganzheitliche Betrachtung verschiedener Produktionsketten
- Auswertung und Analyse der erstellten Prüfkörper, Bewertung des Herstellungsprozesses und des Fließverhaltens der Chopped Tapes
- Konzeptionierung von Reparatur- und Recyclingmöglichkeiten für die generische Lasteinleitung, prototypische Herstellung einer Lasteinleitung aus vergleichbarem Demonstrationsmaterial für das Recycling

Detaillierte technische Beschreibung der vom FIBRE durchgeführten Arbeiten

AP 3.1 Life Cycle Assessment

Für das Life Cycle Assessment lieferte das FIBRE fortlaufend Energie- und Stoffströme für die TP-Fertigungsprozesse am FIBRE (Preforming, Compression Moulding, Reparaturkonzept und Lasteinleitung) und trug so zum ganzheitlichen Life Cycle Assessment in AP 3.1 bei. In diesem Zug fand ein regelmäßiger Austausch mit dem Fraunhofer IGCV statt, bei dem Inhalte zum Fertigungsprozess besprochen wurden. Dabei wurde die Fertigung der Lasteinleitungsrippe nachvollzogen und so mögliche Prozessketten mit den verwendeten Materialien und den unterschiedlichen Fertigungsverfahren erstellt. Eine Prozesskette ist in Abbildung 5 dargestellt.

Abbildung 25 Mögliche Prozesskette aus der LCA [Angerer, Fraunhofer IGCV 2025]

In Abbildung 11 dargestellt ist das Ergebnis der Berechnung für die Herstellung einer (ursprünglich geplanten) Lasteinleitungsrippe, bei der verschiedene Prozessrouten berücksichtigt wurden. Zu erkennen ist das Einsparpotential von Treibhauspotential mithilfe der Verwendung von Recyclingfasern für die Chopped Tapes im Vergleich zum Referenzprozess mit Neumaterial. Dies unterstreicht die Bedeutung der Schließung von Materialkreisläufen und der Wiederverwendung von bisher nicht genutzten „Prozessabfällen“. Ebenfalls dargestellt ist der Einfluss von Erneuerbaren Energien auf das Treibhauspotential, sowie die Kombination der verschiedenen Prozessrouten, durch welche eine Gesamteinsparung von knapp 90% möglich ist.

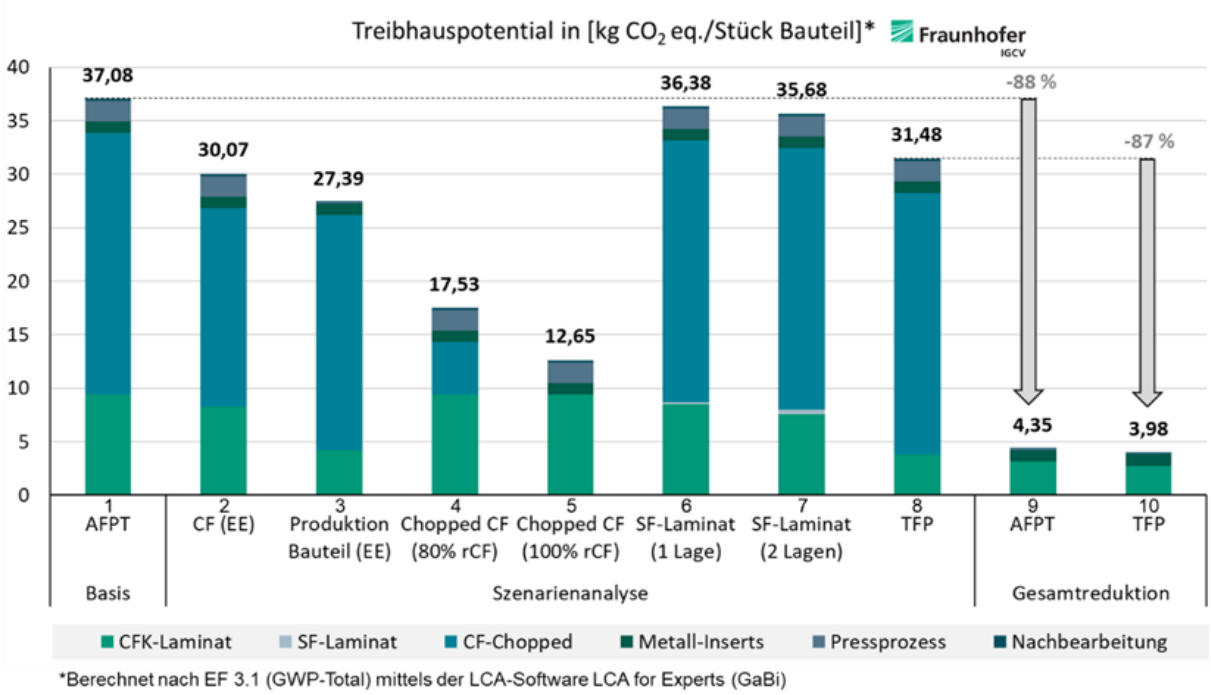


Abbildung 26 Darstellung des Treibhauspotentials für verschiedene Prozessrouten mit einem AFP-Chopped Tape Bauteil als Referenzbasis (1) (weitere Erläuterungen im IGCV Bericht) [Angerer, Fraunhofer IGCV 2025]

AP 3.4 Testing

Durch den vorzeitigen Austritt von Airbus fanden keine, wie ursprünglich geplant, vollumfänglichen Tests des Slatkörpers statt, stattdessen wurden vor allem Test auf Coupon-Ebene durchgeführt. Die anfänglich hergestellten Platten wurden äußerlich anhand von Sichtprüfungen analysiert, wobei die Oberflächenqualität bewertet wurde. Zusätzlich wurden Schliffbilder erstellt, um die Laminatqualität der Platten zu bewerten. Es zeigte sich, dass bei zu niedrigen Temperaturen vermehrt trockene Stellen an der Oberfläche und ein erhöhter Porengehalt im Material auftraten. Ein hoher Druck führte zu einer weiteren Reduktion des Porenanteils (siehe Abbildung 27).

Abbildung 27 Auswirkungen des Prozessdrucks auf den Porengehalt (rot gekennzeichnet) am Beispiel ebener Platten (260 °C, 10 min Haltedauer)

Zur mechanischen Charakterisierung wurden Zugprüfkörper aus den hergestellten Platten gefertigt. Dabei zeigten sich unterschiedliche Tendenzen in Festigkeit und E-Modul in Abhängigkeit von der Tapelänge und Verarbeitungsparametern. Insbesondere bei den 6 mm langen Tapes kam es bei höheren Drücken und Temperaturen vermehrt zu einem Materialaustritt am Rand des Plattenwerkzeugs, wodurch eine Faserausrichtung in Querrichtung der Platten durch den Materialfluss initiiert wurde (die Zugprüfkörper wurden in Längsrichtung aus den Platten geschnitten) (Abbildung 28). Ein Plattenwerkzeug mit definierten Stellen für den Materialaustritt könnte eine definierte Anisotropie erzeugen, wodurch durch den Fließprozess die mechanischen Materialeigenschaften beeinflusst werden können.

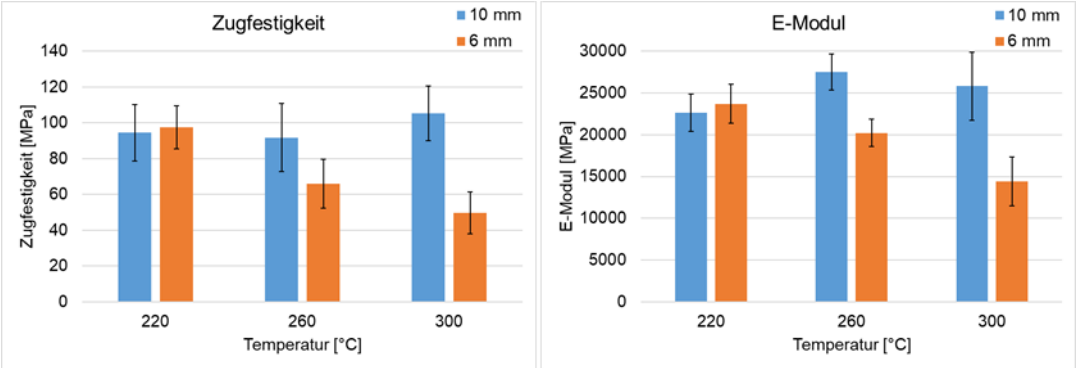


Abbildung 28 Untersuchung des Einflusses der Verarbeitungstemperatur auf die Zugeigenschaften (Versuche mit 45 bar,15 min Haltedauer)

Die Prozessparameter wurden ebenfalls für die Herstellung der Coupon-Rippen verwendet, um eine Vergleichbarkeit bzw. Übertragbarkeit zwischen simpler Plattengeometrie und komplexerer

Geometrie im Fließpressprozess zu untersuchen. Es zeigte sich ein deutliches Abhängigkeitsverhalten des Materialflusses von den jeweiligen Prozessparametern (siehe Abbildung 29). Niedrige Temperaturen und geringe Drücke führten zu unzureichender Kavitätsfüllung und einem hohen Porenanteil. Zudem traten an der Oberfläche Stellen mit nicht ausreichend konsolidierter Matrix auf, was sich in Form trockener Fasern zeigte. Erst bei ausreichend hohen Drücken und Temperaturen wurde eine vollständige Formfüllung mit guter Oberflächenqualität erreicht.

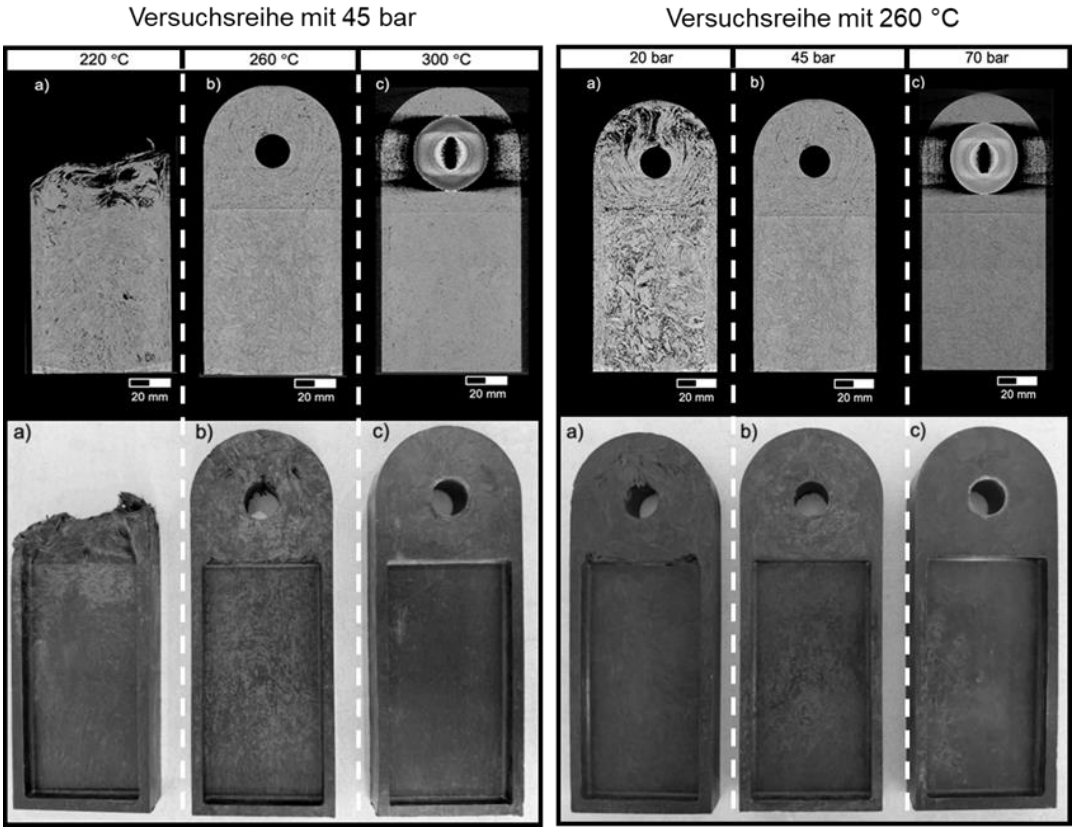


Abbildung 29 Lasteinleitungsrippen - getrennt nach Hauptreihe: CT-Bilder im Vergleich mit Fotos (alle Versuche mit 15 min Haltdauer, 10 mm Tapelänge)

Ergänzend wurden Versuche mit unterschiedlichen Tapelängen durchgeführt. In Abbildung 6 sind zwei Versuche mit 6 mm bzw. 10 mm langen Tapes und sonst identischen Prozessparametern dargestellt. Dabei zeigte sich ein verbessertes Fließverhalten bei 6 mm Länge, mit einem höheren Füllgrad der Kavität. Bei höheren Prozessparametern neigen die kürzeren Tapes jedoch zu einem stärkeren Austritt aus dem Werkzeug.

Auch das Verhalten bei den unterschiedlichen Kavitäten im Werkzeug wurde ausgewertet: Bei konstantem Querschnitt zeigte sich eine gleichmäßige Fließfront, während bei variierendem Querschnitt ein Voreilen der Schmelze zu beobachten war (Abbildung 30).

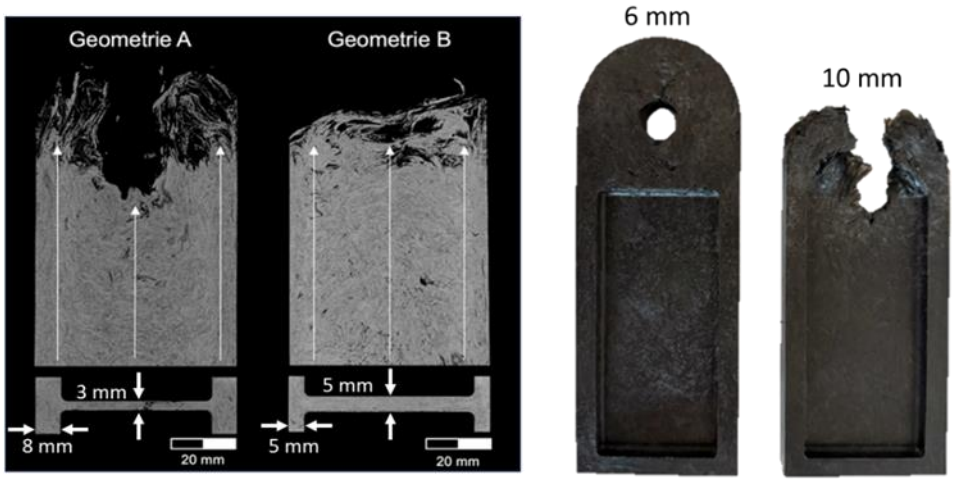


Abbildung 30 Vergleich zwischen zwei Kavitätsquerschnitten und den beiden untersuchten Tapelängen mit 6 und 10 mm

Die Analyse des Lasteinleitungselements fokussiert sich vor allem auf eine Auswertung von CT- und Schliffbildern. In Abbildung 31 dargestellt ist ein Lasteinleitungselement der Variante 1, ohne Einleger und Metallbuchse. Zu erkennen ist eine konturtreue Füllung, auch in dem dünnen Querschnitt im rechten Bild (2 mm Dicke).

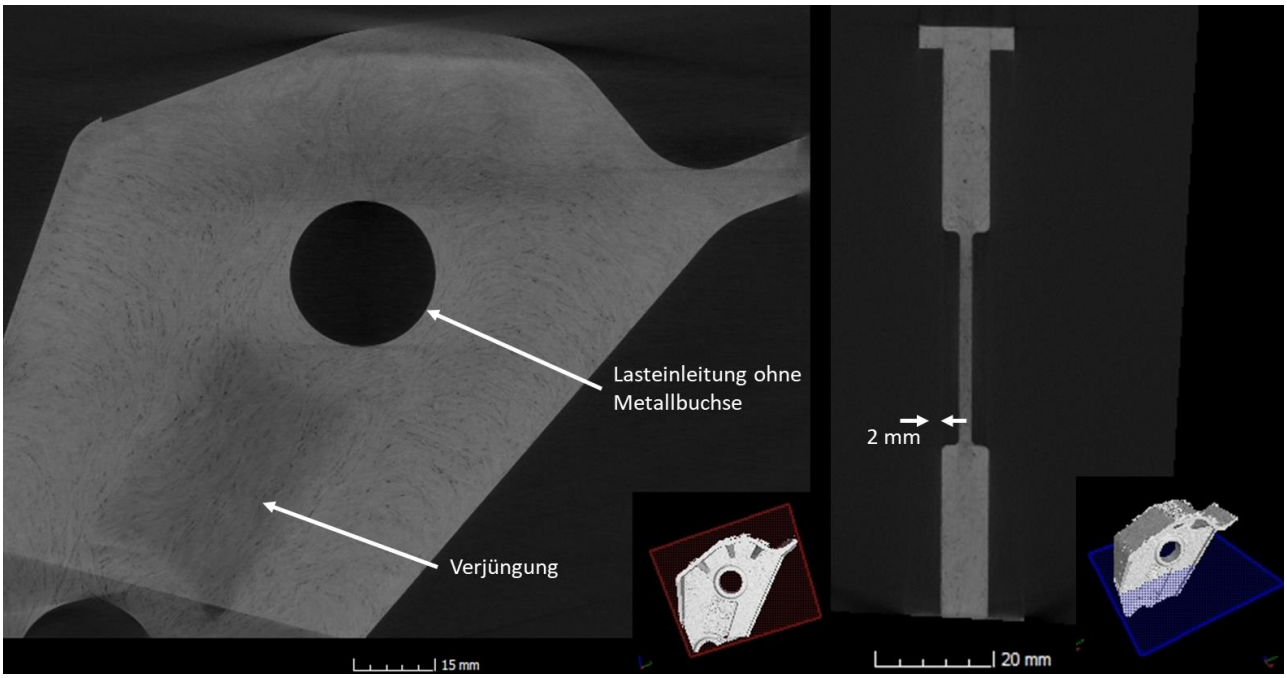


Abbildung 31 CT-Bilder des Lasteinleitungselements in zwei Schnittebenen

Im CT-Bild eines Lasteinleitungselements der Variante 3 (Abbildung 32), mit Metallbuchsen und Schlaufeneinleger, sind die Endlosfasern im Querschnitt deutlich zu erkennen. Der Faserverlauf des Einlegers hat sich deutlich verschoben und liegt nun deutlich weiter innen im Bauteil, im Bereich der Verjüngung. Dort hat sich, im Einleger, ein Reinharzgebiet gebildet. Die Endlosfasern scheinen beim Fließpressen die Fasern in dem Bereich blockiert zu haben. Das Schnittbild durch eine Metallbuchse zeigt die formtreue Füllung der Rillen und damit eine gute Anbindung.

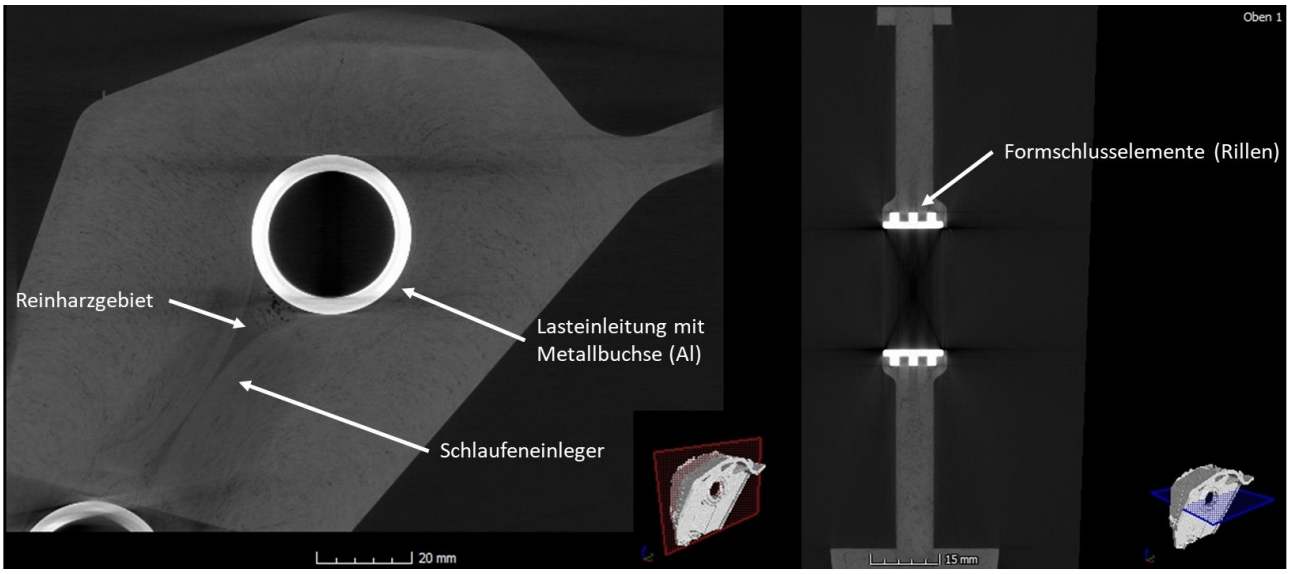


Abbildung 32 CT-Bild eines Lasteinleitungselements mit Schlaufeneinleger und Metallbuchse aus Aluminium

Im CT-Bild eines Lasteinleitungselements mit Tape-Endlosfasereinleger in der Anbindungsfläche ist in der Schnittfläche der Übergangsbereich zwischen Einleger und Chopped Tapes angedeutet. Die Chopped Tapes scheinen die Endlosfasern seitlich verdrängt zu haben und haben eine Auswölbung gebildet. Für eine deutlichere Untersuchung wurden zusätzlich Schliffbilder angefertigt.

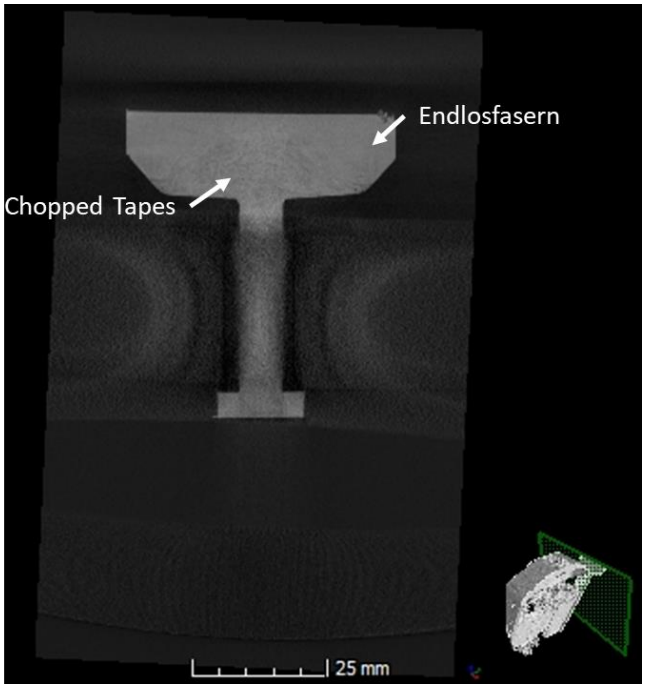


Abbildung 33 CT-Bild eines TFP-Einlegers in der Anbindungsfläche

Im Schliffbild zu dem gleichen Bauteil (Abbildung 34), an der fast identischen Stelle, zeigt sich die angedeutete Auswölbung sehr deutlich. Die Verdrängung der Endlosfasern fand fast bis zur Oberfläche statt, die Grenzfläche ist deutlich erkennbar.

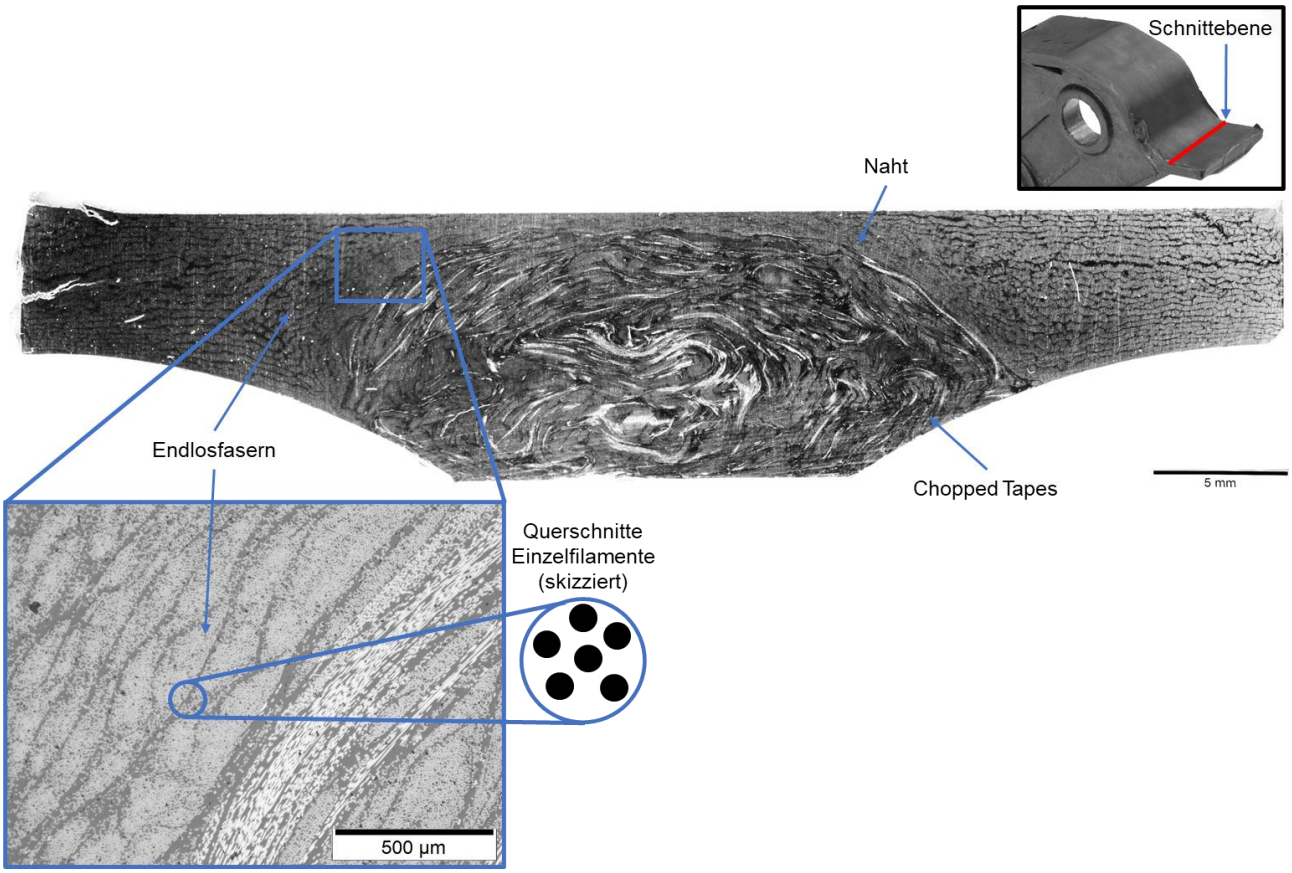


Abbildung 34 Schliffbild eines Lasteinleitungselements mit Endlosfasereinleger in der Anbindungsfläche

In näherer Betrachtung (in der Abbildung skizziert), zeigen sich die Einzelfilamente mit kreisrundem Querschnitt. Das lässt auf eine geringe Winkelverschiebung schließen, die in ihrer Größe aber so nicht zu messen ist.

Bei der Draufsicht des Lasteinleitungselements mit TFP-Einleger in der Anbindungsfläche, zeigt sich eine geringe Winkelverschiebung von <2 °; wie in Abbildung 35 dargestellt – zu erkennen beim Vergleichen von farbigen Nähgarnen in Längsrichtung und roten Referenzlinien. Im vorderen Bereich A und hinteren Bereich B sind lokal größere Verschiebungen ersichtlich. Eine Erklärung ist, dass die Chopped Tapes den Einleger im Prozess durch das Fließverhalten stauchen. Hier könnte mit einer anders geregelten Temperaturführung im Prozess entgegengewirkt werden. Dazu wären weitere Versuche notwendig, die in der Projektlaufzeit nicht mehr umzusetzen waren.

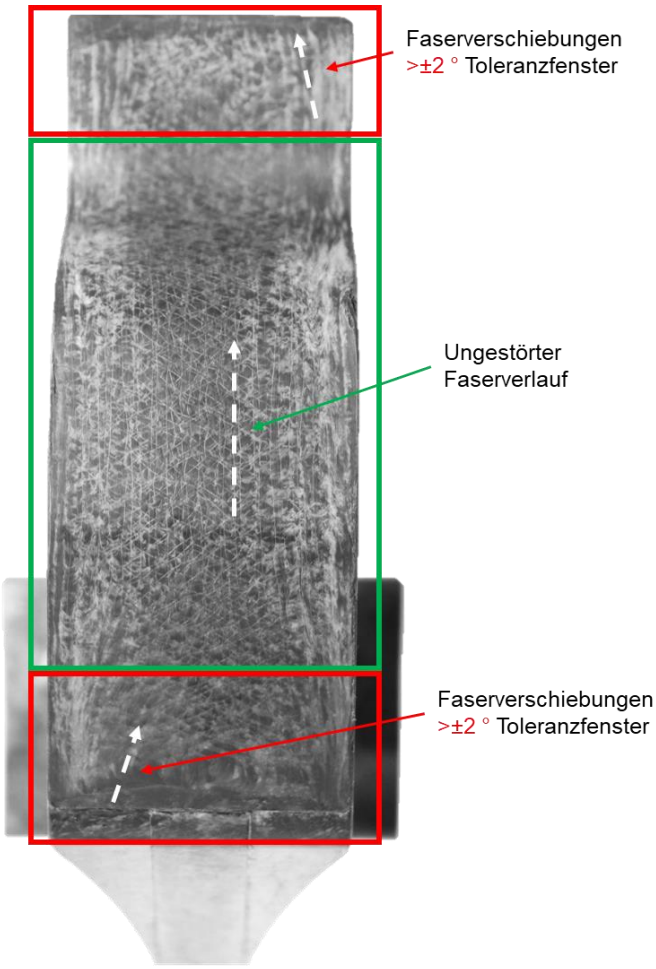


Abbildung 35 Draufsicht Anbindungsfläche Lasteinleitungselement Version 4 mit TFP-Einleger; in rot markiert das +-2 ° Toleranzfenster für die Winkelverschiebung

AP 3.5 Reparaturfähigkeit / Recyclability

Ein wichtiger Aspekt bei der Verwendung von Thermoplasten ist das mögliche Rezyklieren des Materials, da es wiederaufschmelzbar ist. Das ermöglich darüber hinaus das grundsätzliche reparieren einer integralen Struktur durch entfernen des beschädigten Bereichs und anschließendem Konsolidieren von Neumaterial. Die im Projekt verwendeten Chopped Tapes sind in sich bereits ein Ansatz, eine Materialform zu verwenden, die als Recyclingprodukt entstehen kann. Grundsätzlich wurde im Projekt damit schon ein Ansatz nachgewiesen, Recyclingmaterial zu verwenden. Da das verwendete Material allerdings aus Neumaterierial gewonnen wurde und in sich sortenrein (gleiche Tape Größe) war, wurde ein Versuch mit unsortiertem Material (Abbildung 36) durchgeführt. In dem Material liegen Tapegeometrien verschiedener Größe vor, wie sie beim Zerkleinern von Bauteilen bzw. bei der Gewinnung von Rezyklat entstehen.

Abbildung 36 Chopped Tapes unsortierter Größe; Demonstrationsmaterial für Recycling

Grundsätzlich konnte die Herstellbarkeit eines Lasteinleitungselements aus dem Demonstrator-Rezyklat nachgewiesen werden, beim Prozess zeigten sich keine Auffälligkeiten/Abweichungen. Beim Entformungsprozess zeigte sich jedoch eine vermehrte Anhaftung der Oberfläche an dem Werkzeug, wodurch sich einzelne Bereiche der Lasteinleitungsoberfläche ablösten (siehe Abbildung 37).

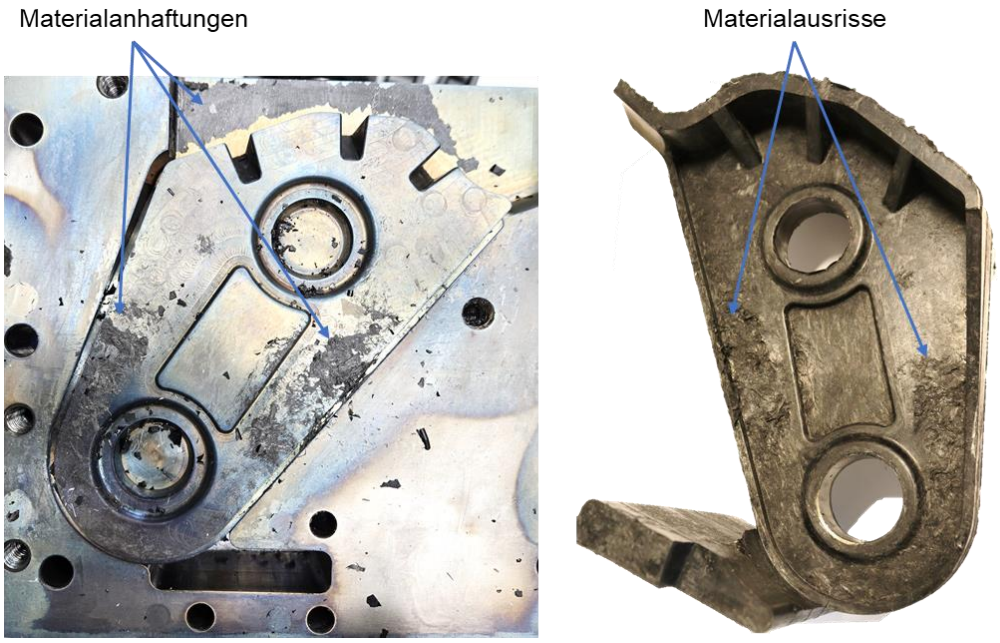


Abbildung 37 Materialanhaftungen im Werkzeug und Lasteinleitungselement

Eine mögliche Ursache dafür können die enthaltenen Kurzfasern sein, die sich in (im Vergleich zu mittleren Oberflächenrauheit) raue Stellen der Oberfläche des Werkzeuges setzen bzw. mit ihr verkanten und so eine deutlich erhöhte Anhaftung besitzen. Diese deutlich kürzeren Fasern sind nicht im sonst verwendeten Material enthalten, wodurch bei den übrigen Versuchen dieses Problem nicht in der Stärke ausgeprägt war. Als Lösungsansatz käme eine Reduktion der Oberflächenrauheit (z.B. durch polieren) des Werkzeuges in Betracht. Diese Problemstellung ist aber unabhängig vom grundsätzlichen Verarbeitungsprozess bzw. Verarbeitbarkeit des Materials, wodurch das Ziel, dieses Nachzuweisen, als erfüllt angesehen wird.

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Das Budget wurde entsprechend des Änderungsantrages abgerufen.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Hauptaufgaben des FIBRE bestanden in der Entwicklung eines generischen Lasteinleitungselements, inklusive der Untersuchung des Herstellungsprozesses und Materials. Die Arbeiten sind in angemessener und notwendiger Weise verrichtet worden.

Ohne Zuwendung des Förderträgers hätten diese Arbeiten nicht durchgeführt werden können.

II.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Im Projekt wurden durch die Charakterisierung neuartiger Verarbeitungsprozesse neue Voraussetzungen für endlosfaserverstärkte Bauteile aus Chopped Tapes geschaffen. Die prozess- und materialinhärenten Vorteile, wie die Fertigbarkeit komplexer und leistungsfähiger Bauteile und die Möglichkeit des Recyclings dieser Strukturen, können damit nutzbar gemacht werden.

Durch die Notwendigkeit der Emissionsreduktion in der Luftfahrt ist die Massereduktion und das Recycling von Komponenten durch die Verwendung thermoplastischer Verbundwerkstoffe ein zentraler Entwicklungsschwerpunkt. Die im Projekt durchgeführten Arbeiten bieten dem gesamten Projektkonsortium somit eine gute Ausgangslage zur zukünftigen Ergebnisverwertung.

Der Wissenstransfer aus den Projektergebnissen wird durch Lehre am FIBRE im Rahmen der Vorlesung „Technologie der polymeren Faserverbundwerkstoffe“ an der Universität Bremen sichergestellt. Die Nutzung der Internetseiten der beteiligten Forschungsstelle und Industriepartnern werden zum Informationsaustausch und Kenntnistransfer für interessierte Firmen genutzt. Darüber hinaus werden die Ergebnisse des Projektes in geeigneter Weise zusammengefasst, gebündelt und veröffentlicht.

II.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Auf dem Gebiet der Fertigung und Verarbeitung von endlosfaserverstärkten Bauteilen aus Chopped Tapes liegen zurzeit keine Erkenntnisse zu Fortschritten bei anderen Stellen vor.

II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Auf der Fachtagung „Composite Recycling & LCA“ wurde am 19.02.2025 unter dem Titel „Analyse des Wiedereinsatzes von Produktionsabfällen in Form von „Chopped Tapes“ für komplexe Strukturen“ eine Veröffentlichung der Projektergebnisse durchgeführt.

Auf der International Conference & Exhibition on thermoplastic Composites (ITHEC 2024) wurden am 09./10.10.2024 in Bremen interessierten Unternehmen erste Projektergebnisse auf einem Messestand mit Projektflyern vorgestellt. Es wurde ein Prüfkörper mit Metallinsert zur Bewertung der Formfüllung ausgestellt.

Nach Projektende werden die Projektergebnisse in einem weiteren, in Arbeit befindlichem, Journal veröffentlicht.

III. Literaturverzeichnis

SAU18 M. Sauer, M. Kühnel: Der globale CF- und CC-Markt, in Composites-Marktbericht 2018: Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen, https://www.avk-tv.de/files/20181115_avk_ccev__marktbericht_2018_final.pdf

VAI08 Vaidya U. K., Chawla K. K.: Processing of fibre reinforced thermoplastic composites, International Materials Reviews, 53:4, 185-218, 2008

GRE15 Greene T. L., et al: Complex-Shape Metallic Aircraft Engine - Bracket Replacement Using Compression Molded - Discontinuous Long Fiber Thermoplastic Composites; Greene Tweed. 2015

BEL22 Belliveau R., et al: Comparative study of the mechanical properties of woven and unidirectional fibres in discontinuous long-fibre composites, Journal of Thermoplastic Composite Materials, Vol 0(0) 1-18, 2022

GTW22 https://www.gtweed.com/de/products/structural-components/ (letzter Aufruf 24.09.2025)

HOW14 D. DeWayne Howell, Scott Fukumoto, COMPRESSION MOLDING OF LONG CHOPPED FIBER THERMOPLASTIC COMPOSITES, TenCate Advanced Composites, 2014

COL21 Collins et al., Warpage investigation of carbon/PEEK discontinuous long fibre thin panels, Journal of Composite Materials 55(24), 2021

GAR13 Gardiner, G.: Tailored Fiber Placement: Besting metal in volume production, http://www.compositesworld.com/articles/tailored-fiber-placement-besting-metal-in-volume-production, 2013

KOE16 Koerdt, M., Schiebel, P., Focke, O., Herrmann, A.S.: Hybrid Textiles – The other way of forming high-performance thermoplastic composites for primary structure, ECCM17, Munich, 2016

ARN15 K. Arnaut, P. Schiebel, A. Lang, A. Herrmann: Reinforcement elements aligned with the direction of forces for load transfer areas of long-fiber-reinforced thermoplastic components, 2015

SCH22 Schwanemann P., et al: Investigation of a Process Chain for the Production of a Thermoplastic Aircraft Window Frame, ITHEC 2022, Bremen, Germany, 12 – 13 October 2022

MIA15 A. Miaris, K. Edelmann, S. Sperling: Thermoplastic Matrix Composites: Xtra complex, Xtra Quick, Xtra Efficient-Manufacturing advanced composites for the A350 XWB and beyond, 20th ICCM Copenhagen, 2015

WIJ05 S. Wijskamp: Shape distortions in composites forming, PhD thesis, University of Twente, Enschede (NL), 2005

MUL20 P. D. Mulye, et all:Numerical Modeling of Interply Adhesion in Composite Forming of Viscous Discontinuous Thermoplastic Prepregs ; 23rd International Conference on Material Forming (ESAFORM 2020); Procedia Manufacturing 47 (2020) 71–73

LEG20 Leger E. et al., High flow compression molding for recycling discontinuous long fiber thermoplastic composites, Journal of Composite Materials 54(23), 2020

SEL17 Selezneva M. et al., Modelling of mechanical properties of randomly oriented strand thermoplastic composites, Journal of Composite Materials 51(6), 2017

VIN22 Vincent G. A. et al., Process- and materialinduced heterogeneities in recycled thermoplastic composites, Journal of Thermoplastic Composite Materials 35(12), 2022

YOU04 A. YOUSEFPOUR et all; Fusion Bonding/Welding of Thermoplastic Composites; Journal of THERMOPLASTIC COMPOSITE MATERIALS, Vol. 17—July 2004; DOI: 10.1177/0892705704045187

HEB16 L. Heberger et al., Influence of the quality of rivet holes in carbon-fiber-reinforcedpolymer (CFRP) on the connection stability, Procedia Manufacturing 6, 140 – 147, 2016

COS12 A. P. da Costa, et all: A Review of Welding Technologies for Thermoplastic Composites in Aerospace Applications; J. Aerosp. Technol. Manag., São José dos Campos, Vol.4, No 3, pp. 255-265, Jul.-Sep., 2012; doi: 10.5028/jatm.2012.04033912

IFA22 https://www.ifam.fraunhofer.de/en/Press_Releases/sustainable-and-efficient-aircraft-construction-through-automation-and-robotics.html, 26.06.2022

CW24 https://www.compositesworld.com/articles/jec-world-2024-highlights-thermoplastic-composites-cmc-and-novel-processes#Induction%20heating, 04.10.2024 (letzter Aufruf 25.09.2025)