

„HiPeR“

„High Performance Recycled Carbon Fiber Materials“

im Verbund HiPeR

Kurzbericht

Zuwendungsempfänger: CTC GmbH

Förderkennzeichen: 03INT713AA

Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2020 – 31.03.2023

Berichtszeitraum: 01.04.2020 – 31.03.2023

Erstellungsdatum: 20. September 2023

Berichtersteller:

Tassilo Witte, CTC GmbH

Freigegeben:

Marc Fette, CTC GmbH

Autor:

Tobias Barth, CTC GmbH

Teil I: Kurzdarstellung

In der Luft- und Raumfahrt werden zunehmend mehr Kohlenstofffaser verstärkte Kunststoffe (kurz CFK) eingesetzt, da diese signifikant bessere mechanische Eigenschaften, wie zum Beispiel Festigkeitswerte als Metalle und ein deutlich besseres Ermüdungsverhalten aufweisen. Ein nicht unerheblicher Nachteil ist jedoch, dass das Recycling sehr aufwändig ist. Dies führt zu hohen Kosten des Recyclates, was wiederum mit einem sehr schlechten Preis-Performance-Verhältnis einhergeht.

Daher ist das Hauptziel des Verbundprojektes, die Steigerung der mechanischen Eigenschaften von recycelten Kohlenstofffaserhalbzeugen (rCF) durch einen hohen Ausrichtungsgrad der Fasern. Dadurch sollte das oben genannte Verhältnis verbessert werden, um den Werkstoff für die Nutzung in der Luftfahrt einerseits attraktiver zu machen und andererseits den Kreislaufwirtschaftsgedanken nicht außer Acht zu lassen. Im Projektkonsortium war die CTC GmbH (kurz CTC) für die Koordination der deutschen Projektpartner, die Ermittlung und Bewertung der mechanischen Kennwerte des rCF Halbzeuges, für Auswahl eines geeigneten Zielbauteiles und die abschließende Herstellung eines Bauteildemonstrators zuständig.

Zunächst hat das CTC im Rahmen des Projektes durch den Link zu Airbus als OEM der Luftfahrt die Definition eines geeigneten Zielbauteiles übernommen. Dabei wurden zunächst Randbedingungen definiert, unter denen die Fertigung und der mögliche spätere Einsatz eines Bauteiles aus rCF Material in der Luftfahrt möglich wäre. In Abstimmung mit der OEM Airbus Stade wurden die Möglichkeiten für ein Zielbauteil aus dem Luftfahrtbereich weiter eingegrenzt und bewertet. Schlussendlich wurde die oberste Rippe in dem Seitenleitwerk (kurz VTP) des A320 als vielversprechendstes Bauteil für die Umsetzung als Demonstrator ausgewählt.

Nach der Fertigung des rCF Halbzeuges durch das Sächsische Textilforschungsinstitut e.V. (kurz STFI) übernahm das CTC die Herstellung von Probekörper zur anschließenden zerstörenden Prüfung durch die GMA-Werkstoffprüfung Stade GmbH (kurz GMA). Insgesamt wurden 7 verschiedene Vliese untersucht, die aus 5 verschiedenen Ausgangsmaterialien hergestellt wurden. Dazu wurden zunächst je 2 ebene Platten je Halbzeug hergestellt und an die Firma GMA zur Ermittlung der Kennwerte übergeben. Abschließend wurde in diesem Arbeitspaket die Ergebnisse ausgewertet und eine Materialselektion anhand der Kennwerte durchgeführt. Diese Kennwerte übertrafen die eingangs geplanten Zielkennwerte teilweise deutlich und übertrafen somit die Erwartungen. Im Gespräch mit den Projektpartnern der C.A.R. FiberTec GmbH und dem STFI stellte sich heraus, dass durch alle Projektpartner gleichermaßen, die selben Materialien als Favoriten ausgewählt hatten.

Weiterhin befasste sich die CTC GmbH mit der Fertigung des ausgewählten Demonstratorbauteiles. Dazu wurde auf ein bereits vorhandenes Werkzeug zurückgegriffen, da im Projekt für die Beschaffung eines komplexen Werkzeuges, wie es die Rippe benötigt, kein Budget vorhanden war. Für die erste Beurteilung der Fertigbarkeit des neu entwickelten rCF Vlieses, wurden verschiedene schichtweise Aufbauten realisiert, anschließend im Werkzeug mit Harz injiziert und abschließend ausgehärtet. Insgesamt wurden 7 Demonstratoren gefertigt und einer Sichtprüfung unterzogen. Eine Analyse der inneren Bauteilqualität konnte im Projekt nicht mehr realisiert werden. Im Anschluss an die Fertigung der Demonstratoren erfolgte die Bewertung der gefertigten Bauteile hinsichtlich ihrer Qualität. Die sieben Bauteile zeigten im Laufe der Iterationsschritte deutlich Qualitätsverbesserungen. Vor allem die letzten Bauteile lassen den Schluss zu, dass die Kombination aus Herstellungsverfahren (RTM) und den hochausgerichteten rCF Halbzeugen für die Fertigung von Luftfahrtbauteilen geeignet erscheinen. Diese These wird durch die hohen mechanischen Materialkennwerte gestützt.

v

„HiPeR“

„High Performance Recycled Carbon Fiber Materials“

im Verbund HiPeR

Schlussbericht

Zuwendungsempfänger: CTC GmbH

Förderkennzeichen: 03INT713AA

Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2020 – 31.03.2023

Berichtszeitraum: 01.04.2020 – 31.03.2023

Erstellungsdatum: 20. September 2023

Berichtersteller:

Tassilo Witte, CTC GmbH

Freigegeben:

Marc Fette, CTC GmbH

Autor:

Tobias Barth, CTC GmbH

INHALTSVERZEICHNIS

Teil II: Eingehende Darstellung	3
Wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	18
Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten	18
Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	18
Relevante Forschungsergebnisse von anderen Stellen	19
Veröffentlichungen im Rahmen des Vorhabens	19
Teil III Erfolgskontrollbericht	20
1 Änderung der Aussichten auf Zielerreichung	20
2 Sind oder werden Änderungen in der Zielsetzung notwendig	20

Teil II: Eingehende Darstellung

Vom Konzept zum realen Anwendungsdemonstrator

Zunächst wurden die Bauteile auf die Auswirkungen bei möglichem Versagen hin betrachtet. Dazu wurden die Bauteile gemäß der folgenden in vier Klassen eingeteilt. Angefangen mit der niedrigsten Klasse, der nicht fliegenden Bauteile und der Klasse der fliegenden Bauteile mit den drei Untergruppen niedrig, gering und hochlasttragend, den sogenannten Design Assurance Level (kurz DAL) A bis C.

In der niedrigen Klasse wurden Bauteile zur Fertigung von Luftfahrzeugen zusammengefasst, das heißt, sie werden nicht im fliegenden Flugzeug verbaut. Im Speziellen ist dies zum Beispiel Hilfsvorrichtungen zum Setzen von Bohrungen. Hierbei sind die Lasten eher gering, da Bauteildicken und Gewicht weit weniger restriktiv vorgegeben sind, als in den höheren Klassen. Sollten diese Bauteile während der Nutzung versagen, hätte dies keine gravierenden Auswirkungen, wie Verletzungen oder gar der Verlust von Menschenleben, zur Folge. Ein Austausch wäre innerhalb kürzester Zeit möglich und hätte einen überschaubaren Einfluss auf die Folgekosten.

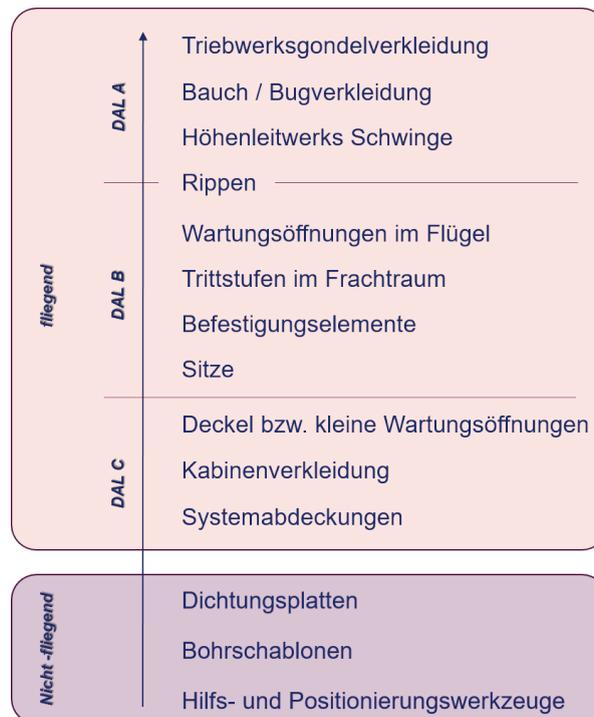


Abbildung 4: Übersicht möglicher Zielanwendungen

Die nächsthöhere ist die erste Klasse der fliegenden Bauteile (DAL C), allerdings mit den geringsten Lasten aller fliegenden Bauteilen. Als Beispiel hierfür sei unter anderem Dichtungsplättchen genannt. Diese befinden sich im Tank des Höhenleitwerkes, um dem Kerosin einen Widerstand beim Fließen innerhalb des Tanks entgegenzubringen. Des Weiteren handelt es sich bei Einhausungen oder Abdeckungen von Systemen auch um Bauteile dieser Klasse. Ein Ausfall eines der Bauteile in dieser Klasse stellt weder eine unmittelbare Gefahr für den Menschen dar, noch würde es die Sicherheit des Flugzeuges signifikant gefährden. Dennoch würde der Austausch eines Bauteils dieser Klasse mit einem Ausfall des Flugzeuges einhergehen. Somit ist das wirtschaftliche Risiko nach wie vor überschaubar, aber dennoch höher als bei den nicht-fliegenden Teilen.

In der wiederum nächsthöheren Klasse (DAL B) wurden ebenfalls fliegende Bauteile zusammengefasst. Diese sind bereits deutlich höheren Belastungen durch Luftkräfte, dem Gewicht der Passagiere oder der Fracht ausgesetzt, als in der vorher genannten. Ein mögliches Versagen im Flug wäre unmittelbar sichtbar, hat aber dennoch überschaubare Auswirkungen auf die Flugsicherheit. Dennoch würde durch die Sichtbarkeit der Schäden das Image der Fluggesellschaft in Mitleidenschaft gezogen werden. Als Beispiel seien hier u.a. die Trittstufen im Frachtraum des Flugzeuges oder die Sitze der Passagiere genannt. Eine Bauteilgruppe, welche an dieser Stelle bereits etwas mehr Aufmerksamkeit geschenkt werden soll, sind die sogenannten Rippen. Die finden in Flugzeugen an diversen Stellen Verwendung, u.a. auch im Seitenleitwerk. Hierbei handelt es sich um Verstärkungselemente die vereinfacht betrachtet zwei dünnwandige Schalenelemente miteinander verbinden. Ihre Aufgaben sind die Formgebung und die Übertragung von Scherkräften. Aufgrund ihrer Vielseitigkeit existieren Rippen mit einem sehr weiten Bereich auf auftretenden Kräfte, wodurch diese in mehr als nur einer Klasse gelistet werden können.

In die höchsten Gruppe (DAL A) der hier gewählten Klassifizierung zählen Bauteile wie zum Beispiel die Höhenleitwerksschwinge, welche bei einem Ausfall auch den Verlust des gesamten Flugzeuges bedeuten könnten.

Auswahl und Abgrenzung

Betrachtet man die oben genannte Klassifizierung zukünftiger Zielbauteile wird offensichtlich, dass Bauteile, welche höhere Lasten ertragen müssen, gleichzeitig höheren Anforderungen an die Flugsicherheit gegenüber stehen. Das bedeutet zugleich, dass ein deutlich höheres Risiko für eine Materialentwicklung, durch höhere Aufwände in der Zulassung kompensiert werden müssen. Aus diesem Grunde wurde sich stärker auf die mittlere Belastungsklasse (DAL B) der fliegenden Bauteile konzentriert. Hierbei stellten sich besonders die Rippen als ein vielseitiges Bauteil heraus. Gleichzeitig bieten die Rippen eine relativ große Bandbreite an zu übertragenden Lasten, so dass eine sehr geplante Auswahl als Zielbauteil auch hinsichtlich Fertigbarkeit und Umsetzbarkeit durch Bauteilabmessungen sehr gezielt möglich ist.

In zahlreichen Besprechungen mit dem Engineering des Airbus Standortes in Stade wurde die oben angeführte Eingrenzung des Zielbauteiles detailliert diskutiert. Im Gespräch wurden dann die Rippen des Seitenleitwerkes (engl. Vertical Tail Plane, kurz VTP) näher beleuchtet.



Abbildung 5: Seitenleitwerk eines A320

Der Aufbau des VTP ist in der folgenden Abbildung dargestellt, wobei die Rippen gelb markiert wurden. Diese sind dünnwandige monolithische Bauteile, welche die beiden VTP-Schalen miteinander verbinden. Die Rippen haben hierbei die Aufgabe, Schubkräfte zwischen der Schalenhälften zu übertragen. Diese sind mit mehreren geschlossenen Sicken ausgestattet, um die Beulsteifigkeit zu erhöhen und die geometrische Ausdehnung der Beulfelder erheblich zu verringern. Um die Kosten im Projekt überschaubar zu halten, wurde die Rippe 10 eines A320 VTP ausgewählt, da für diese Rippe bereits ein Versuchswerkzeug verfügbar ist. Das genannte Werkzeug kann mittels geringer Modifikationen für weitere Tests und den Bau von Prototypen verwendet werden.

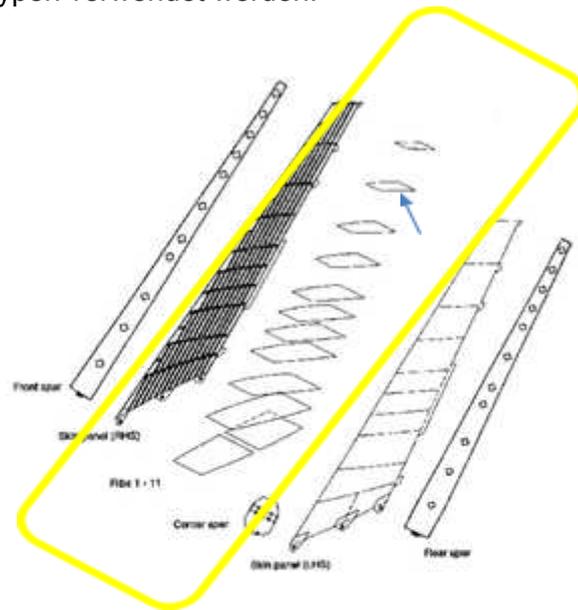


Abbildung 6: Aufbau eines VTP mit Markierung an Rippe 10



Abbildung 7: Rippe 10 eines A320 VTP

Für den weiteren Projektverlauf bedeutet dies, dass alle weiterführenden Anstrengungen zur Herstellung eines Prototypen aus gerichteten Recyclingfasern sich auf dieses Bauteil konzentrieren werden.

Für Mitte 2021 sind bereits erste Fertigungsversuche mit einem vom STFI gelieferten Versuchsmaterial geplant. Dieses gerichtete Vlies dient zunächst nur dazu, die Drapiereigenschaften des Materials kennenzulernen und ggf. benötigte Anpassungen in der Bauteilgeometrie frühzeitig erkennen zu können.

Definition der Materialanforderungen

Bauteilbezogene Anforderungen an das Material

Das ausgewählte Zielbauteil wird heute aus mehreren Einzellagen CFK-Gewebe Prepreg aufgebaut und hat nach der Härtung eine Bauteilstärke von ca. 1,2mm. Im Regelfall wird Gewebe als Material für Bauteile gewählt, um speziell die guten Eigenschaften der Drapierfähigkeit auszunutzen, auch wenn Gewebe durch den gekrümmten Faserverlauf grundsätzlich geringere Materialperformance liefert als gleichwertige Tapes.

Ein wichtiger Punkt, den es bei den Anforderungen an das Material berücksichtigen gilt, ist der Fakt, dass die Steifigkeit bei der Bauteilauslegung der Rippe dominierend ist und nicht die Festigkeit. Da die Rippe Schubkräfte zwischen den VTP Schalenhälften überträgt, muss das sich ergebende Beulfeld mit geschlossenen Sicken global abgesichert werden, um die Beulfelder möglichst klein zu halten. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, eine ausreichende Drapierfähigkeit um die Kontur der Rippe ablegen zu können. Hierbei sei noch bemerkt, dass die Bereitschaft, die geometrische Ausprägung der Rippe bzw. der Sicken anzupassen, bereits durch das Airbus VTP-Engineering signalisiert wurde.

Erste Materialkennwerte aus der durchgeführten Vergleichsstudie des ICGV liegen vor. Aus heutiger Sicht sollten mit den gerichteten Vliesen folgenden Kennwerte realisieren lassen:

- Zugfestigkeit 0°: 400Mpa, Zugmodul 0°: 30GPa
- Biegefestigkeit 0°: 400MPa, Biegemodul: 30GPa
- Druckfestigkeit: 0°: 350MPa, Druckmodul 0°: 45GPa

Mit diesen Zielwerten wird ab dem zweiten Quartal 2021 mit den VTP-Engineering von Airbus ins Gespräch gegangen, um frühzeitig das Delta zwischen angenommenen Materialkennwerten und den aktuell IST-Kennwerten des Rippenmaterials zu identifizieren.

Durch die Änderung des Zielmaterials vom vorimprägnierten Tape, welches auf Automated Fiber Placement-Anlagen verarbeitet werden sollte, hin zu gerichteten trockenen Vliesen, ergeben sich neue Herausforderungen. Die maschinelle Verarbeitung von Tapes ist heutiger Stand der Technik. Durch die Endlofasern ist es, vereinfacht ausgedrückt, möglich beliebig hohe Zugkräfte während des automatischen Ablegeprozesses auf das Material aufzubringen. Durch den Aufbau von Vliesen aus Kurzfasern, ist dies nicht ohne weiteres möglich und muss weiter untersucht werden. Zwar können die ertragbaren Zugkräfte der Halbzeuge durch einen höheren Binderanteil verbessert werden, allerdings sollte dieser nach heutigen Maßstäben nicht höher als 8% sein. Diesbezüglich müssen zukünftig weitere Untersuchungen folgen, um das Optimum zwischen maximalem Binderanteil und ertragbaren Prozesskräften während des Ablegens zu ermitteln.

Weiterhin ist der Faservolumengehalt eine entscheidende Größe bei der Charakterisierung von Composites. Von ihm hängen mehr oder weniger nichtlinear viele weitere Materialkennwerte ab. Sind heute 60% Faservolumengehalt (FVG) bei unidirektionalen Gelegen Stand der Technik, so hängt der maximal technisch sinnvolle Wert für Vliese stark vom Grad der Ausrichtung der Fasern ab. Da dies in dem hier vorliegenden Projekt ein Entwicklungszeit ist, ist auch der FVG diesbezüglich näher zu untersuchen. Ein angestrebtes Projektziel ist eine FVG von 40%.

Ein weiterer Parameter, den es näher zu untersuchen gilt, ist das Flächengewicht. Der heute für unidirektionale Gelege geltende Grenzwert liegt bei 3% Abweichung. Das heißt ,das Flächengewicht einer Einzelprobe darf maximal 3% vom Sollwert abweichen. Ein für Vliese anzustrebender Wert der maximalen Abweichung liegt bei 5%, wobei die Erreichbarkeit dieses Zielwertes noch untersucht werden muss.

Materialcharakterisierung

Ein weiterer nennenswerter Punkt betrifft die Charakterisierung der Verarbeitbarkeit der Rohstoffe und die Gewinnung erster Materialkennwerte. Dabei werden 5 verschiedene Ausgangsmaterialien von C.A.R. FiberTec GmbH an das STFI geliefert. Diese verarbeiten die 5 Materialien zu 7 gerichteten rCF Vliesen, wobei zwei der Ausgangsmaterialien mit einer zusätzlichen Modifikation des Streckwerkes produziert wurden. Anschließend werden daraus am CTC Prüfkörper mittels Harzinfusion hergestellt. Die Durchführung der Prüfungen, Auswertung und Dokumentation wird die u.a. in Stade ansässige Firma GMA-Werkstoffprüfung GmbH übernehmen. Die Vorgehensweise zielt darauf ab, die Auswirkungen von verschiedenen Ausgangsmaterialien auf die Verarbeitbarkeit der Rohstoffe in den Textilmaschinen des STFI und den sich daraus ergebenden Materialkennwerte detailliert zu verstehen. Bereits zum jetzigen Stand ist Seitens des STFI bekannt geworden, dass es bei der Verarbeitung von Fasern ohne Schlichte zu einer 18% höheren Abfallentstehung in den Textilmaschinen kam. Das heißt, sollten abgelaufene Prepregs oder ausgehärtete Bauteile pyrolysiert werden, ist es bereits aus der Sicht des Halbzeugherstellers notwendig, erneut eine Schlichte zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit aufzutragen.

Diese und weitere Erkenntnisse sollen nach Auswertung der Ergebnisse in optimierte Fertigungskette zurückfließen. Um auch die Auswirkungen verschiedener Ausgangsfasern auf die Verarbeitbarkeit zu charakterisieren, werden unterschiedliche Fasertypen (z.B. HT, HM, oder IM) untersucht. Aus diesen beiden Kenngrößen (Fasertyp und Verarbeitungsmethode für das Vlies) soll später der beste Kompromiss zwischen Verarbeitbarkeit und maximalen Materialkennwerten ermittelt werden. Dabei ist das grundsätzliche Vorgehen wie in der folgenden Abbildung dargestellt geplant.

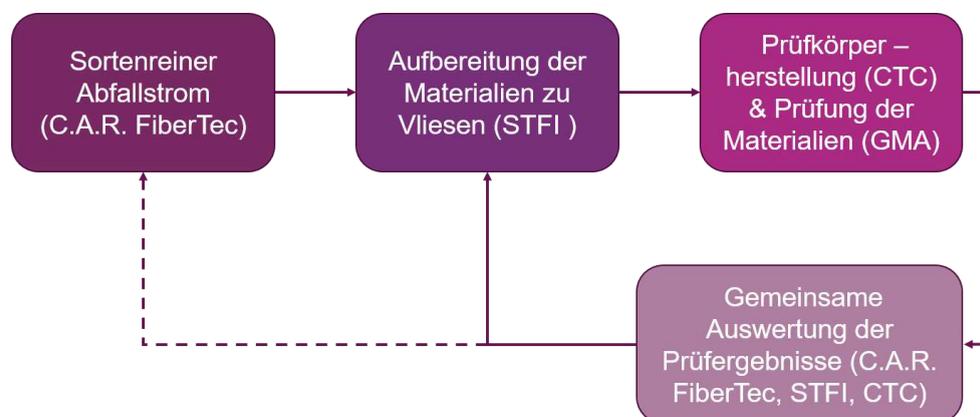


Abbildung 8: Vorgehensweise erste Materialcharakterisierung

Anschließend wird aus den Ergebnissen eine Material- und Verarbeitungsrouten ausgewählt, um den späteren Rippen-Prototypen zu fertigen.

Probenherstellung

Ziel war es, fünf verschiedene Tapes vom Projektpartner STFI zu Platten auszuhärten, um daraus mechanische Kennwerte zu generieren. Als trockene rCF Tapes wurden folgende Materialien geliefert: M01 in den Varianten 01a und 01b, M02, M03 in den Varianten 01a und 01b, M04 und M07.

Die thermisch konsolidierten Tapes wurden auf eine jeweilige Plattengröße von 300mm x 600mm zugeschnitten, mit einer 2K-Epoxidharz-Matrix mit dem Harz Biresin CR 81 und dem Härter Biresin CH 81-6 der Firma SIKA getränkt. Die Zieldicke betrug 2mm bei einem Faservolumengehalt von 30%. Dazu wurde die Herstellung mittels Infusionsverfahren ausgewählt. Dieses bietet durch den einseitig offenen Aufbau den Vorteil, dass während der Imprägnierung der Matrix der Prozess optisch überwacht und ggf. eingegriffen werden kann. Zudem ist für den Aufbau kein komplexes Werkzeug nötig. Nach Aushärtung und Entformung wurden die Platten mittels Dickentaster vermessen. Es wurde festgestellt, dass die Dicke von 2mm nicht einheitlich über die gesamte Plattengröße erreicht wurde. Die Platten waren zu dick und zusätzlich bauchig, das heißt in der Mitte dicker als am Rand. Nach mehrfacher Anpassung der Prozessparameter stellte sich das Infusionsverfahren als ungeeignet heraus, da es mit diesem nicht möglich war, gleichmäßig dicke Platten herzustellen. Dies konnte einerseits auf die inhomogene Grammaturnatur des Materiales, als auch auf den einseitig offenen Aufbau des Infusionsverfahren selbst zurückgeführt werden, mit dem es nicht möglich ist, einen höheren Differenzdruck als 1 bar einzustellen. Ein nicht unerheblicher Faktor stellt dabei auch das schwammartige Verhalten des Tapes selbst dar, welches unter Zugabe der Matrix bei Druckschwankungen, welches durch das Infusionsverfahren hervorgerufen wird, stark zurück federt.



Abbildung 9: Vakuumaufbau und Infusion zweier Prüfplatten



Abbildung 10: Detailansicht der Hilfsmaterialien der Infusion des Versuchsmaterials M01 B21/01a

Als Alternative zum Infusionsverfahren wurde das Nasspressverfahren ausgewählt. Dieses Verfahren nutzt ein beheizbares Werkzeug und eine Presse. Es zählt somit zu den geschlossenen Prozessen. Mit ihm ist es möglich, gleichmäßig dicke Probekörper herzustellen. Besonderheit dieses Verfahrens ist, dass die flüssige Matrix schichtweise auf das trockene Halbzeug gegeben wird, bevor das geheizte Aushärtewerkzeug geschlossen wird. Hierzu wurde die 2K-Epoxidharz-Matrix mit dem Harz Araldite 3585 und dem Härter Aradur 3475 der Firma Huntsman ausgewählt. Mit diesem Verfahren wurden jeweils Vorversuche für jedes einzelne oben genannte Material durchgeführt, um den maximal möglichen Faservolumengehalt einzustellen. Dies war vonnöten, da die Materialien untereinander ein jeweils unterschiedliches Flächengewicht aufweisen. Anschließend wurden jeweils 2 Platten hergestellt, aus denen dann die Probekörper für die Ermittlung der mechanischen Kennwerte entnommen wurden. Für 5 verschiedene Materialien und Untervarianten wurden insgesamt 14 Prüfplatten hergestellt.

Ermittlung der Materialkennwerte

Im weiteren Verlauf wurden die 14 mit dem oben genannten Verfahren hergestellten Platten an die Firma GMA Werkstoffprüfung in Stade zur Entnahme der verschiedenen Probekörper übergeben. Diese wurden mittels Wasserstrahl aus den Platten herausgetrennt. Im Folgenden wurden für insgesamt 7 Materialvarianten folgenden Kennwerte ermittelt:

- Zugfestigkeit jeweils in 0° und 90° Richtung nach DIN EN ISO 527-4
- Zugmodul jeweils in 0° und 90° Richtung nach DIN EN ISO 527-4
- Biegefestigkeit jeweils in 0° und 90° Richtung nach DIN EN ISO 14125
- Biegemodul jeweils in 0° und 90° Richtung nach DIN EN ISO 14125
- Faservolumengehalt DIN EN 2564 Methode B und DIN EN ISO 1183-1 Verf. A

Die folgenden Bilder zeigen beispielhaft die Probenentnahme aus der zuvor gefertigten Platten.



Abbildung 13: Probenanordnung am Beispiel B21-06



Abbildung 14: Zerstörte Zug-Prüfkörper hier am Beispiel B21/01a und B21/06

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick aller ermittelten Kennwerte, aufgeschlüsselt in Zug und Biegeproben, für die Richtungen 0° und 90° zur Vorzugsrichtung des Vlieses. Anhand der verwendeten Farbskala (gelb= niedriger Messwert, grün = hoher Messwert) können die Materialien untereinander gut verglichen werden.

Typ	Batch	Zug				Biegung				FVG								
		Zug-F. 0°	Zug-M 0°	Zug-F. 90°	Zug-M 90°	Biege-F. 0°	Biege-M. 0°	Biege-F. 90°	Biege-M. 90°									
M01	B21/01a	636	672	46.9	51.3	145	143	11.7	11.2	667	658	51	48.5	172	185	9.2	9.6	29.2
	B21/06	724	672	57.8	51.3	139	143	10.25	11.2	663	658	46	48.5	204	185	10.3	9.6	29.2
M02	B21/02	450	432	41	39.5	147	149	12.6	12.5	548	544	39	37.3	177	195	11.5	12	21.1
	B21/07	403	432	37	39.5	151	149	12.4	12.5	540	544	35.8	37.3	[274]	195	12.6	12	21.1
M03	B21/03a	538	566	45	48.3	120	123	10.8	10.5	672	648	46.7	43.7	185	177	11	10.8	25.8
	B21/08	606	566	52	48.3	126	123	10	10.5	625	648	40.7	43.7	169	177	10.7	10.8	25.8
M04	B21/04	531	550	44	45.5	110	111	9.4	9.6	614	642	41	42	163	170	9.6	9.9	30
	B21/09	578	550	47.8	45.5	113	111	10.1	9.6	670	642	43	42	176	170	10.2	9.9	30
M07	B21/05	706	728	44.8	46.5	115	115	8.4	8.5	627	620	37	38.3	226	213	10.6	10	27.6
	B21/10	762	728	49.1	46.5	114	115	8.6	8.5	615	620	39	38.3	200	213	9.3	10	27.6
M01	B21/01b	612	612	44.4	44.4	127	127	10.8	10.8	667	667	49.3	49.3	176	176	8.9	8.9	33.1
M03	B21/03b	559	559	50.8	50.8	110	110	9.5	9.5	732	732	49.4	49.4	161	161	9.7	9.7	29.2

Lengende:
niedrigster Wert
höchster Wert

Abbildung 15: Übersicht der ermittelten Zug- und Biegekenwerte

Interpretation der Messwerte

Zunächst einmal kann festgestellt werden, dass alle Messwerte plausibel erscheinen und den Erwartungen entsprechen. Bezogen auf die eingangs gewählten Zielkennwerte, lagen die gemessenen Werte deutlich über den Erwartungen.

Der Faservolumengehalt stellt für einen Faserverbundwerkstoff die entscheidende Basis dar und muss bei der Interpretation der weiteren Messwerte immer in Relation gesetzt werden. Da allerdings eingangs bei der Probenherstellung darauf abgezielt wurde, einen möglichst hohen Faservolumengehalt zu erreichen, führt der Messwert von 21,1% für den FVG zu einer deutlichen Abwertung der Materialvariante M02. Die für den Flugzeugbau besonders relevanten Werte der Zugfestigkeit in 0° sind der nächste wichtige Indikator für die angestrebte Materialauswahl. Diese liegt, abgesehen von der Variante M02, bei allen Materialien über 500 MPa und erreicht teilweise sogar Werte über 700 MPa. Die höchsten Werte erreichen hier die Varianten M01 und M07. Der dritte entscheidende Messwert ist das Zug-Modul in 0° Richtung. Bis auf die Variante M02 liegen alle Werte über 44 GPa. Die höchsten Messwerte erreichen hier die Varianten M01 und M03b.

Betrachtet man diese drei genannten Kennwerte, haben die Materialvarianten M01 und M07 das größte Potential auf eine Verwendung im Flugzeugbau.

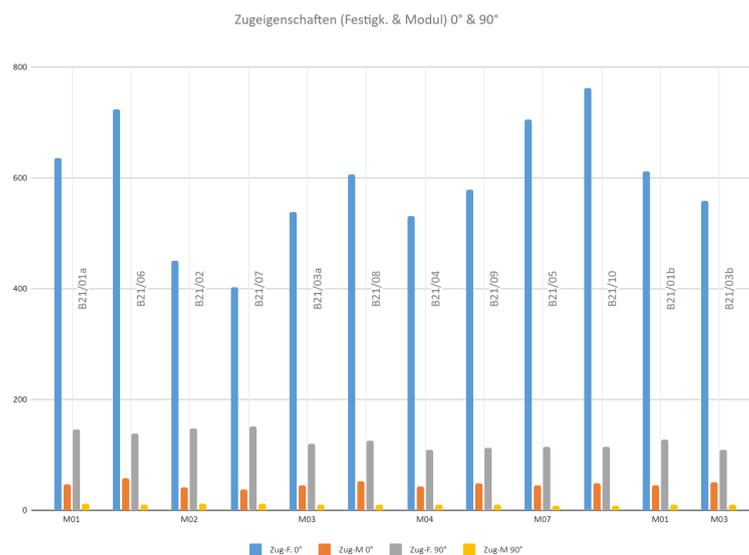


Abbildung 16: Übersichtsdiagramm der ermittelten Kennwerte der Materialvarianten M01-M07

Herstellung des Zielbauteiles

Auswahl des Faserhalbzeuges

Für die zu fertigenden Demonstratoren musste zunächst das Faserhalbzeug zur Herstellung ausgewählt werden. Da mit dem neu entwickelten Faserhalbzeug bisher keinerlei Vorerfahrungen für die Herstellung von lasttragenden Flugzeugbauteilen bestanden, musste davon ausgegangen werden, dass mehrere Bauteile zur Ermittlung geeigneter Prozessparameter benötigt werden, um ein Bauteil in akzeptabler Qualität zu erreichen. Die Anzahl wurde zunächst mit fünf Bauteilen abgeschätzt.

Dieses Kriterium führte bei der ausgewählten Rippe, selbst bei der Bauteilgröße von nur circa 700 mm Länge und einer Breite von circa 320 mm zu der Forderung, der ausreichend zur Verfügung stehenden Materialmenge. Für die Auswahl eines Faserhalbzeuges aus den 3 vorher genannten Materialien (M01, M03 und M07) stand daher die Verfügbarkeit mit einer

Mindestmenge von 20m² als ein Hauptkriterium im Vordergrund. Da grundsätzlich alle drei Materialtypen (M01, M02 und M07) für die Flugzeugbau geeignet erscheinen und die Abweichungen untereinander in Bezug auf die Abfallrate in der Produktionsstrecke beim Projektpartner STFI, der Grand der Ausrichtung der Fasern nach dem Streckwerk, die Handhabbarkeit und schlussendlich auch die gemessenen Materialkennwerte relativ gering sind, schien die als ein adäquates Vorgehen. Aus den im vergangenen Berichtszeitraum grundsätzlich für den Flugzeugbau geeigneten Materialkombinationen M01, M03 und M07 wurde schließlich das Fasermaterial M01 stellvertretend für den Bau der Rippe ausgewählt.

Auswahl des Herstellungsverfahrens

Das Herstellungsverfahren für lasttragende Bauteile im Flugzeugbau ist sehr eng an das jeweilige Bauteil selbst gekoppelt. In den meisten Fällen wurde das Verfahren aufgrund einer Vielzahl von Randbedingungen ausgewählt, um ein Optimum aus Performance, Kosten und Herstellbarkeit in der angestrebten Taktrate zu erreichen.

Dies geht oft mit sehr hohen Werkzeugkosten einher, auch für Bauteile mit vergleichsweise geringen Abmessungen wie der A320 Seitenleitwerksrippe. Da das Werkzeug der ausgewählten Rippe aus einem bereits abgeschlossenen Projekt bei Airbus Stade finanziert werden konnte und in dem Projekt HiPeR nicht genug Finanzmittel für ein eigenes Werkzeug zur Verfügung standen, wurde das Herstellungsverfahren der ursprünglichen Bestimmung als gegeben angesehen und hier nicht weiter betrachtet. Bei dem Verfahren handelt es sich um das sogenannte Resin Transfer Moulding (kurz RTM), welches eine sehr hohe Bauteilqualität aufgrund der beidseitig geschlossenen Werkzeughälften ermöglicht. Als weiterer nicht zu vernachlässigender Vorteil ist die jahrelange Erfahrung bei der Serienproduktion von fliegenden Bauteilen im Airbus Werk in Stade anzusehen, wobei das CTC Airbus hierfür mit zahlreichen grundlegende Entwicklungen unterstützt hat und somit ebenfalls über große Erfahrung im Umgang mit diesem Prozess und notwendige Maschinen und Anlagen, wie eine ausreichend große Presse und eine Injektionsanlage verfügt.

Vorüberlegungen zur Herstellung

Dem ausgewählten Herstellungsverfahren RTM liegt zugrunde, dass in eine geschlossene Kavität an einer Stelle flüssiges Harz unter Druck hineingegeben wird und an einer anderen Stelle (meist gegenüberliegend) mittels Vakuum wieder abgesaugt wird. Nun lässt man diesen Vorgang so lange ablaufen, bis auf der Seite des Vakuums das flüssige Harz blasenfrei austritt. Nach einer gewissen weiteren Zeitspanne, die je nach Bauteilgeometrie unterschiedlich lang ist, werden beide Seiten geschlossen und das Harz härtet (meist) unter Zuhilfenahme von Wärme aus. Für den Harzfluss von Einlass zur Absaugung mittels Vakuum sind sogenannte Fließkanäle im Faserhalbzeug nötig, in denen sich das Harz im Bauteil ausbreitet. Diese sind zum Beispiel in einem Multiaxialgelege besonders groß, wodurch sich dieses Faserhalbzeug für das RTM Verfahren besonders eignet.

Dem gegenüber steht das in diesem Projekt erzeugte hochausgerichtete rCF Vlies, welches über keine ausgeprägten durchgehende Fließkanäle verfügt. Zwar weist das hochausgerichtete rCF Vlies im Vergleich zu einem Standard-Vlies einen höheren Ausrichtungsgrad auf, allerdings sind im Vergleich zu anderen auf dem Markt verfügbaren Materialien, wie unidirektionalen- oder Multiaxialgelegten sind die entstehenden Fließkanäle vergleichsweise kurz bzw. nicht vorhanden.

Aus diesem Grund wurde das erste Bauteil, welches mittels des RTM Verfahren im Projekt hergestellt wurde, mit einem für den Belastungszustand unüblichen Lagenaufbau von 90° zur Bauteillängsachse ausgeführt. Üblich sind hier Faserwinkel von ±45°, um den auftretenden Schubkräften bestmöglich entgegenzuwirken. Da der Harzanguss auf einer Bauteillängsseite und die Absaugung auf der gegenüberliegenden Längsseite erfolgte, ergeben sich mit diesem Faserwinkel von 90° zur Bauteillängsachse der geringstmögliche Widerstand des Harzes beim Durchfließen des Faserhalbzeuges im geschlossenen Werkzeug während der Injektion. Die Grundidee dabei war, für das erste Bauteil den geringstmöglichen Widerstand

beim Durchfließen des Harzes durch das Bauteil zu erreichen. Um diese Idee zu unterstützen, wurde mit einem Faservolumengehalt von 20% begonnen, um die Anzahl der zu durchfließenden Faserschichten im Werkzeug möglichst gering zu halten. Der Faservolumenanteil gibt das Verhältnis von Fasern und Harz je normiertes Volumen für ein Bauteil an. Das heißt, es wurden im ersten Schritt 80% Harz und 20 % Fasern im Bauteil eingebettet. Als Ziel für die weitere Fertigung wurde ein Faservolumengehalt von 30% angestrebt.

Zuschnitt des Faserhalbzeuges

Im ersten Schritt wurden die Fasern wie oben beschrieben ausgerichtet und mittels einer Schnittschablone für das Werkzeug passend mit einer Schere manuell zugeschnitten.

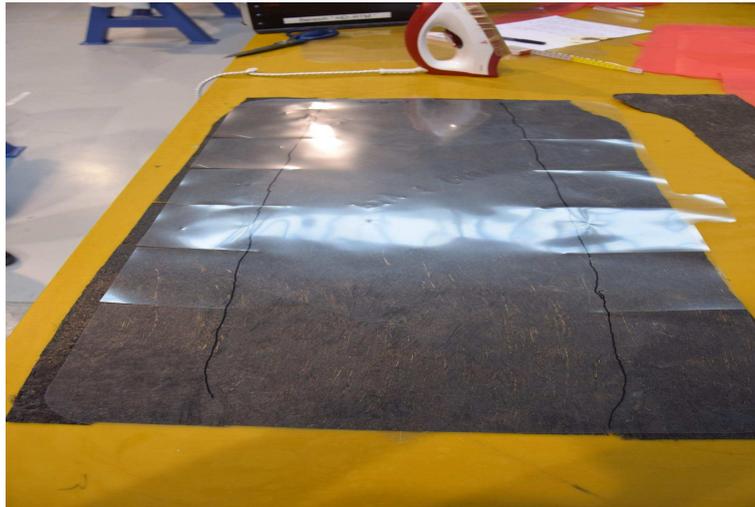


Abbildung 17: Zuschnitt mittels Schablone

Um den ausgewählten Faservolumengehalt von 20% zu gewährleisten, wurde eine Lagenanzahl von 8 kalkuliert. Um diese 8 Faserschichten untereinander geeignet zu fixieren, wurden zunächst noch Vorversuche mittels verschiedener Bindertypen durchgeführt. Als erstes wurde ein Pulverbinder untersucht. Dieser Binder in Pulverform wurde auf das Faserhalbzeug aufgetragen und mittels eines Bügeleisens und dessen Wärme aufgeschmolzen. Nach dem Abkühlen fixierte der Binder die Faserschichten untereinander. Es wurde festgestellt, dass nicht wie gewünscht nur 2 Schichten sondern alle Faserschichten miteinander verklebt werden. Dies führte zu einer signifikanten Verschlechterung der Drapierfähigkeit des Faserpaketes. Somit konnte festgestellt werden, dass sich Binder auf Pulverbasis für dieses Verfahren nicht eignet. Anschließend wurde ein PA-Bindervlies der Firma Spunfab in verschiedenen Flächengewichten untersucht. Dabei stellte sich das leichteste Bindervlies mit ca. 10g/m² als bestmöglicher Kompromiss zw. Fixierungsstärke und Drapierfähigkeit heraus, siehe folgende Abbildungen.



Abbildung 18: untersuchtes Bindervlies



Abbildung 19: Bindervlies nach dem Aufschmelzen mittels Bügeleisen

Injektion mittels RTM der erste Rippe

Die oben beschriebenen fixierten Faserschichten wurden als sogenannter Preform in das zunächst noch kalte RTM Werkzeug eingelegt und die Abmessungen überprüft. Nach kleineren Anpassungen der Schnittschablone und des Preforms wurde das Werkzeug auf 120°C und das Harz auf 80°C aufgeheizt. Als Harzsystem wurde das bei Airbus für RTM-Bauteile qualifizierte und weit verbreitete "HexFlow® RTM 6" Harz von Hexel eingesetzt.



Abbildung 20: Preform im Werkzeug

Die anschließende Injektion und insbesondere die fortlaufende Dokumentation der Prozessparameter zeigte bereits in diesem Stadium, dass sich das Bauteil wie zunächst befürchtet nicht mit dem Harz infiltrieren ließ. Nach dem Abkühlen des Werkzeuges über Nacht konnte das Bauteil wie unten gezeigt entformt werden. Dabei zeigten sich großflächige Bereiche, welche nicht vom Harz erreicht wurden. Die Fasern sind somit in diesen Bereichen nicht in Harz eingebettet, somit ist das Bauteil Ausschuss.



Abbildung 21: Fehlversuch der ersten rCF Rippe

Injektion weiterer Rippen

Beim Reinigen des Werkzeuges und insbesondere der Harzauslässe konnte festgestellt werden, dass diese von einer vorherigen Bauteilherstellung noch verschlossen waren und zu Beginn der Fertigung nicht wie geplant gereinigt und geöffnet wurden. Diese wurden für den zweiten Versuch geöffnet und das Werkzeug wie üblich gereinigt. Aufgrund dieser Feststellung wurde der exakt gleiche Faseraufbau wie beim ersten Bauteilversuch angewandt, um möglichst keine weiteren Parameter für die zweite Bauteilherstellung zu ändern.



Abbildung 22: zweiter Faserpreform im Werkzeug

Nach dem erneuten Zuschnitt der Faserschichten, der Aufheizung der Werkzeughälften und des Harzes wurde das zweite Bauteil ohne weitere Vorkommnisse mit Harz injiziert. Die Dokumentation der Prozessparameter verlief ebenso ohne Auffälligkeiten. Nach dem oben bereits bekannten Abkühlen der Werkzeughälften konnte die zweite Rippe entformt werden.

Diese Rippe zeigte nach der optischen Sichtprüfung eine sehr gute oberflächliche Durchtränkung der Fasern. Diese lässt zwar keine eindeutige Aussage über die innere Qualität zu, ermöglicht jedoch eine hinreichend genaue Indikation derer. Die außerordentlich gute Qualität der Rippe übertraf die Erwartungen deutlich.

Wie das folgende Bild darstellt, zeigten sich allerdings auch Bereiche, in denen das schlecht drapierfähige rCF Vlies zu Falten in den Faserschichten führte. Diese Falten waren auf der Bauteiloberfläche mit der optischen Sichtprüfung erkennbar.



Abbildung 23: Rippe Nummer zwei

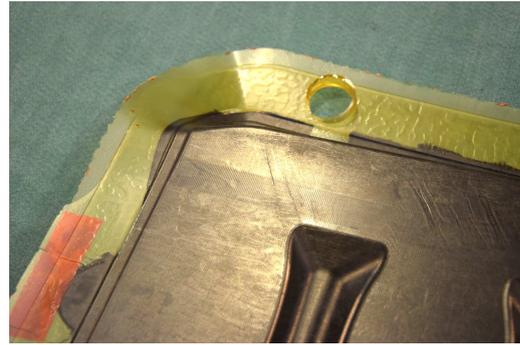


Abbildung 24: Detail von Falten in der obersten Faserschicht der zweiten Rippe

Weitere Demonstratorbauteile

Bei der Herstellung weiterer Rippen wurden dann unter anderem die gezeigten Falten durch ein Anpassen der Zuschnitte und gezielte Einschnitte im trockenen Prefrom minimiert. Dies führte zu einer deutlichen Verringerung der Faltenbildung im Bauteil bzw. wurden die Falten so weit in den Außenbereich des Bauteiles verlagert, dass sie nach der Umrisssbearbeitung kaum mehr relevant waren. Ganz verhindern ließen sich die Falten allerdings auch nicht mit allen Maßnahmen gemeinsam.



Abbildung 25: Falten in der Decklage des Bauteil außerhalb des relevanten Bereiches

Weiterhin wurde der zunächst optimale Fall der Faserausrichtung so verändert, dass der schlechtest mögliche Fall der Faserausrichtung in allen Faserschichten im Bauteil enthalten war. Hierbei sollte der schlechtest mögliche Fall der Faserorientierung erzeugt werden, um beide Extrema überprüft zu haben. Das heißt die Faserorientierung wurde um 90° so gedreht, dass die Fasern genau quer zur Fließrichtung des Harzes lagen. Dies entspricht der 0° Richtung zur Bauteillängsachse. Mit dieser Faserorientierung wurde ein weiteres Bauteil gefertigt. Auch dieses Bauteil konnte ohne erkennbare Abweichungen in den Prozessparametern während der Injektion infiltriert werden. Dieses Ergebnis zeigte sich auch in der guten Oberflächenqualität der Rippe.



Abbildung 26: : Bauteil mit 0° Faserorientierung zur Längsachse

Da nun auch der schlechteste Fall der Faserorientierung mit mehr als zufriedenstellendem Ergebnis durchgeführt werden konnte, wurde ein weiteres Bauteil mit einer realistischen Faserorientierung von $\pm 45^\circ$ zur Bauteillängsachse ausgeführt. Weiterhin wurde der FVG von 20% auf 30% erhöht um auch diesen Faktor abzuprüfen und zu bewerten.



Abbildung 27: Bauteil mit $\pm 45^\circ$ Faserorientierung

Die mit diesen Anpassungen hergestellte Rippe zeigte keine negative Veränderungen, welche durch die optische Sichtprüfung identifiziert werden konnten. Weiterhin konnte durch den höheren Faservolumengehalt eine Verbesserung in der Oberflächenqualität festgestellt werden. Diese zeigte sich in einer ebenen Oberfläche durch einen geringeren Volumenschwund des Harzes. Dieses Phänomen wurde so erklärt, dass durch den um 10% höheren Faservolumengehalt einerseits weniger Harz pro Volumen selbst schrumpfen kann und andererseits diese 10% durch Faser gefüllt werden, welche selbst nicht schrumpfen und zusätzlich dem Härteschwund des übrigen Harzes entgegenwirken. Eine komplett ebene Oberfläche, wie bei Bauteilen aus jungfräulichen UD-Laminaten, lässt sich mit diesem Material aufgrund des stark schwankenden Grammaturs leider nicht erzeugen.

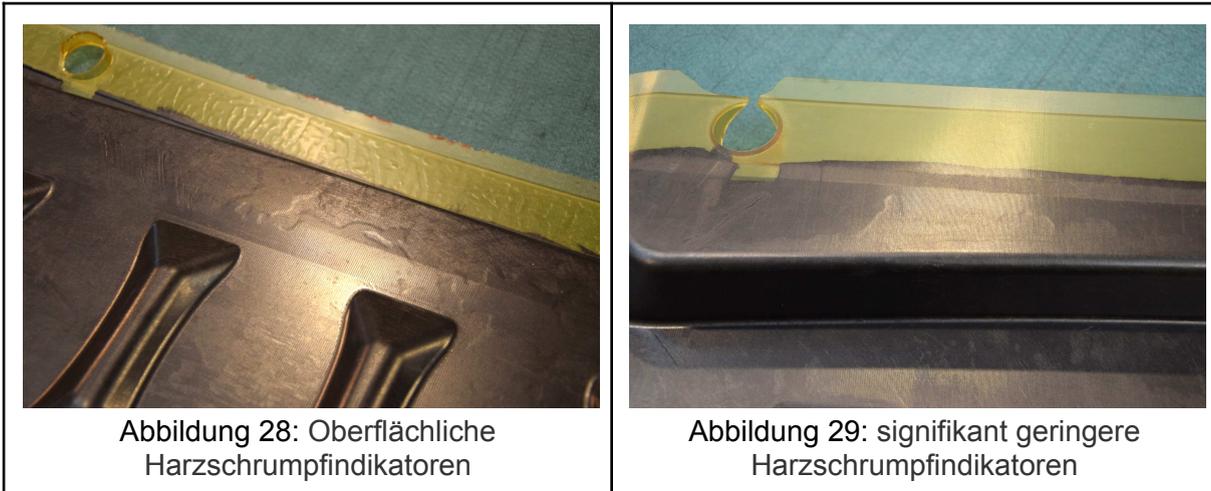


Abbildung 28: Oberflächliche Harzschumpfingern

Abbildung 29: signifikant geringere Harzschumpfingern

Demonstrator aus japanischen Material

Um einen Vergleich zwischen Materialien aus der deutschen Recyclingroute ohne Pyrolyse und der japanischen Recyclingroute mit Pyrolyse zu ermöglichen, wurden zwei Bauteile aus Material hergestellt, das von CFRI pyrolysiert wurde..

Dabei zeigte sich, dass bei der Bauteilherstellung in Bezug auf die Handhabbarkeit und der Drapierfähigkeit vor der Infiltration im RTM Verfahren keine Unterschiede zwischen den Materialrouten mit und ohne Pyrolyse feststellbar waren. Auch bei der Gegenüberstellung der ausgehärteten Bauteile zeigten sich keine Unterschiede, welche mit der Sichtprüfung identifizierbar waren.

Zusammenfassung

Bezüglich der zu Projektbeginn anvisierten Materialkennwerte mit Zugfestigkeit in 0° von 400 Mpa bzw. 30 GPa für den Zugmodul in 0° Richtung kann festgehalten werden, dass trotz einer für den Flugzeugbau üblichen Streuung in den mechanischen Kennwerten der Einzelproben die Ziele deutlich übertroffen wurden. Zwei Materialien erreichten Zugfestigkeiten in 0° Richtung von über 600 MPa, womit beide Materialvarianten 50% über den anvisierten Kennwerten lagen. Zeitgleich zeigten beide Varianten eine gute Handhabbarkeit, wobei die Drapierfähigkeit zukünftig weiter untersucht werden müsste.

Es lässt sich weiterhin feststellen, dass die zu Beginn des Baues der Demonstratoren vermuteten Herausforderungen bei der Infiltration während des RTM-Verfahrens weit weniger Auswirkungen auf das Material und somit die Qualität haben, als zunächst angenommen. Die Drapierfähigkeit stellt für nicht flächige Bauteile eine signifikante Einschränkung der möglichen Geometrien dar und muss für zukünftige Anwendungen weiter untersucht und ggf. verbessert werden, ohne dabei die Kennwerte zu verschlechtern. Die allgemein bekannte Zielgröße des Faservolumengehaltes von ca. 30% für Vliese zeigte in den Bauteilen zwar eine gute Qualität, allerdings kann nicht davon ausgegangen werden, dass dies bereits das Optimum für die in diesem Projekt entwickelten Materialien darstellt. Hier könnten zukünftig weitere Untersuchungen folgen.

Ebenso kann als sehr positiv festgehalten werden, dass sich die Vliese aus den zwei unterschiedlichen Materialströmen (pyrolysiert bzw. unpyrolysiert) aus Fertigungsgesichtspunkten nicht voneinander unterscheiden. Das heißt, für eine mögliche spätere Verwendung in einem fliegenden Serienbauteil muss für den Fertigungsprozess nicht

zwischen den Ausgangsmaterialien unterschieden werden. Weiterhin konnte ein Hauptziel dieses Projektes mit dem Bau der Demonstratoren erfolgreich abgeschlossen werden.



Abbildung 30: Übersicht hergestellter Seitenleitwerksrippen

Aus Sicht der Partner sind die folgenden Punkte entscheidende Projektergebnisse:

C.A.R. Fibertec

- Die auf eine textile Weiterverarbeitung abgestimmte Aufbereitung von rCF Produkten und die dafür entwickelte Verarbeitungstechnologie bringt messbare Qualitätsvorteile für das rCF Halbzeug
- Performance und Wirtschaftlichkeit der textilen Aufbereitung werden deutlich optimiert
 - vs. gering orientierte Vliesprodukte
 - vs. hoch orientierte Tape-Halbzeuge auf Basis pyrolysierter Ausgangsmaterialien
- Aufgrund der sortenreinen Aufbereitung konnte der Qualitätseinfluss von Basisfasertypen auf die Kennwerte von Prüfkörper ermittelt werden
- Grundlagenermittlung für eine methodisch abgestimmte industrielle Qualitätssicherung

Faserinstitut Bremen:

- Mit dem bildanalytischen Qualitätssicherungssystem kann der Ausrichtungsgrad der rCF Materialien sowohl im Labor als auch inline während der Herstellung automatisch bestimmt werden
- Unter Verwendung des gleichen bildgebenden Systems ist ein Ranking verschiedener Materialien bezüglich des Ausrichtungsgrades möglich
- Durch Verwendung eines Polarisationsensors kann bei der Messung zwischen Carbonfasern und anderen Fasern unterschieden werden, wodurch der Ausrichtungsgrades ausschließlich basierend auf den Carbonfasern ermittelt werden kann.

STFI:

- Alternativ aufbereitete recoverte Carbonfaserproduktionsabfälle erfordern keine weitere Faserbündelöffnung vor dem Kardierprozess.
- rCF aus dem Pyrolyseprozess benötigen zur Herstellung hochausgerichteter textiler Strukturen zwingend einen geeigneten Schlichteauftrag.
- Die Faserorientierung in Produktionsrichtung (MD) lässt sich mittels an die Halbzeuggeometrie angepassten Streckwerks explizit steigern.
- Zur Fixierung der Halbzeugstruktur ist ein thermoplastischer Zumischungsanteil von $\geq 8\%$ ausreichend.

Wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

In dem Berichtszeitraum sind folgende Ausgaben entstanden:

Position	geplant (EUR)	verausgabt (EUR)
Personal	164.116,10	198.901,25
FE-Fremdleistungen	59.000,00	26.380,80
sonstige Ausgaben	56.815,40	11.609,36
Gesamte Selbstkosten	279.931,50	236.819,41
dav. Eigenmittel	167.959,50	142.091,65

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Das CTC hat innerhalb dieses Projektes durch die enge Verknüpfung zu Airbus als Luftfahrt-OEM die Definition des Zielbauteiles aus recycelten und hochausgerichteten Kohlenstofffaserhalbzeugen übernommen. Durch diese enge Abstimmung in der Definitionsphase konnte sichergestellt werden, dass auch die dazugehörige Fertigungstechnologie für die Luftfahrt relevant ist und die potentielle Anwendung in Luftfahrzeugen erlaubt.

Durch langjährige Erfahrung beim Bau von Testbauteilen, die für die Zertifizierung von Luftfahrzeugen nötig sind, konnte das CTC seine Erfahrungen bei der Ermittlung der projektrelevanten mechanischen Kennwerten der entwickelten Materialkombinationen und der Herstellung der dazugehörigen Probekörper mit in das Projekt einbringen.

Weiterhin konnte das CTC umfangreiche Expertise bei der Fertigung von Prototypen in Luftfahrtqualität in das Projekt einbringen, indem unter anderem rechtzeitig vor Beginn der Fertigung der Demonstratoren auf kritische Faktoren besonderes Augenmerk gelegt wurde.

Abschließend konnte das CTC die Erfahrung aus zahlreichen Entwicklungsprojekten in der Luftfahrt nutzen, um die Qualität der hergestellten Demonstratoren zu bewerten und wichtigen Input für die Verbesserung zu geben.

Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Ergebnisse aus dem Projekt HiPeR sind ein wichtiger Meilenstein bei der Wiederverwendung von recycelten Kohlenstofffasern im Flugzeugbau. Mit den im Projekt

gewonnenen Kenntnissen über Recyclate mit hochausgerichteten Fasern ist es nun erstmals möglich, verlässliche mechanische Kennwerte für die zukünftigen Auslegungen von niedrig belasteten Bauteilen heranzuziehen. Mit diesen wichtigen Kennwerten sind erstmals valide Diskussionsgrundlagen geschaffen worden, um Kritiker der Nutzung von Recyclaten im Flugzeugbau vom großen Potenzial überzeugen zu können.

Als ein wichtiges Signal in diese Richtung plant Airbus 2024 das CTC für die Fertigung weiterer Demonstratoren zu beauftragen, mit dem Ziel, diese anschließend einer extra dafür entwickelten Testvorrichtung störend zu prüfen. Davon erhofft man sich eine weitere Detaillierung der Materialkenntnisse auf Bauteilebene.

Relevante Forschungsergebnisse von anderen Stellen

Im Jahr 2020 führte das Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik (IGCV Augsburg) die durch das CTC beauftragte Untersuchung „Benchmark-Studie für rCF-Vlieswerkstoffe mit hoher Faserorientierung“ durch. Diese hatte das Ziel, einen möglichst direkten Vergleich zwischen unterschiedlichen Technologien, bzw. Technologie-Varianten, die auf dem heutigen Stand der Technik (ohne größere weitere Entwicklungsarbeit) zur Erzeugung einer möglichst hohen Orientierung auf Vlieswerkstoffe aus recycelten Kohlenstofffasern (rCF) angewendet werden können. Dabei wurde dieselbe Materialbasis pyrolysiert und anschließend zu Composite-Verbunden weiterverarbeitet. Als wichtigste Vergleichsgröße wurden die mechanischen Eigenschaften der Vlieswerkstoffe, bzw. der Verbundwerkstoffe definiert. Der Fokus der Untersuchung lag dabei auf der Identifizierung des höchstmöglichen Leistungsniveaus. Ziel der Studie war auch eine erste Einschätzung zum aktuellen Stand der Technik, sowie eine erste Abschätzung zukünftig sinnvoller Entwicklungsrichtungen.

Insgesamt konnte verdeutlicht werden, dass die erreichten Leistungsniveaus der am stärksten orientierten Produkte dieser Studie auch im Vergleich zum Stand der Technik und Forschung sehr hohe Kennwerte erreichen. Somit ergibt sich hieraus die zukünftige Möglichkeit für rCF basierte Materialien zum Einsatz in semistrukturellen bzw. strukturellen Anwendungsfällen. Dies beweist anschaulich, dass auch diskontinuierliche Faserwerkstoffe bei einer ausreichend guten Kontrolle der Gesamtprozesskette, d.h. z.B. ausreichend langer Einzelfaserlänge sowie guter Faser-Matrix-Anhaftung, insgesamt sehr hohe mechanische Kennwerte erreichen.

Die Ergebnisse der oben genannten Querschnittsstudie des IGCV wurde im September 2021 gemeinsam mit dem IGCV Augsburg auf dem DLR Kongress veröffentlicht.

Zusammenfassend wurden in dem Vortrag folgende Aussagen getroffen:

- Die Möglichkeit, orientierte rCF-Halbzeuge in ausreichendem Umfang zu produzieren, wurde erfolgreich nachgewiesen.
- Explizite Verarbeitungsrouten wurden als besonders vielversprechend identifiziert.
- Insgesamt zeigen sich bereits jetzt vielversprechende mechanische Eigenschaften, die den Einsatz im Luftfahrtbereich aus technischer Sicht sehr interessant erscheinen lassen.
- Es existieren weitere Technologien die das Potential zum Einsatz im Luftfahrtbereich haben

Veröffentlichungen im Rahmen des Vorhabens

2022: Vortrag auf der Lightcon 2022 in Hannover mit dem Titel "Breathing new life into recycled carbon fibres: a cross-sectional study on highly aligned rCF", Barth/Witte/Sauer/Schumm, in Anlehnung an das Hiper-Projekt, mit inhaltlichen Überschneidungen der Werkstoffe (Querschnittsstudie sowie Hiper-Projekt arbeiten mit gerichteten Textilien des STFI).

2023: Das Projekt HiPeR wurde 2023 für den AVK Innovationsaward eingereicht und wurde als Gewinner ausgewählt. Der Preis wird am 24.10.2023 in Salzburg überreicht. Zum Zeitpunkt der Berichtserstellung wurde die genaue Platzierung noch nicht bekanntgegeben.