

DLR-IB-BT-AU-2024-168

BayLu25 Projekt LIGHT

Schlussbericht

Projektlaufzeit 2021-2024

Stefan Jarka



DLR

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt



Gefördert durch
Bayerisches Staatsministerium für
Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie



Schlussbericht

Bayerisches Luftfahrtforschungs- und Technologieprogramm

Verbundvorhaben

LIGHT

„Entwicklung einer multidisziplinär optimierten Hubschraubertür der nächsten Generation“

Förderkennzeichen: LABAY112C

Projektlaufzeit: 01.01.2021 - 30.06.2024

Berichtszeitraum: 01.01.2021 - 30.06.2024

Zusammengefasst von Stefan Jarka (DLR Projektleitung)

Mitgewirkt haben:

- Andreas Buchheim
- Dietfried Henning
- Toni Vogel
- Thomas Stefani
- Maximilian Heckl
- Benedikt Schaller
- Dominik Hogen

Augsburg, den 20.09.2024

Inhalt

1	Kurzdarstellung	3
1.1	Aufgabenstellung	3
1.2	Voraussetzungen für das Vorhaben	3
1.3	Planung und Ablauf	4
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand	5
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	11
2	Eingehende Darstellung	13
2.1	Erzielte Ergebnisse	13
2.2	Beitrag zu förderpolitischen Zielen	36
2.3	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit	37
2.3.1	Erfindungen und Schutzrechtsanmeldungen	37
2.3.2	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten	37
2.3.3	Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten	38
2.3.4	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	38
2.4	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	39

1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Im Vorhaben „LIGHT“ sollen für die nächste Generation von mittelschweren Hubschraubern neue Hubschraubertüren entwickelt werden. Hierfür werden verschiedene Konzepte hinsichtlich der Einzelteilfertigung, Montage und Funktionsintegration erarbeitet und anhand von kritischen Technologiebausteinen validiert werden. Bei diesem Vorgehen soll eine frühzeitige und konsequente interdisziplinäre Zusammenarbeit der bauteilspezifischen Struktur-, System-, Herstellungs- und Montage-Anforderungen harmonisieren. Die Projektpartner bringen zur Erarbeitung der Konzepte ihre jeweilige Fachexpertise ein. Konkret werden – basierend auf den definierten Anforderungen und Bewertungskriterien – unterschiedliche Türkonzepte erarbeitet, die ausgehend von einer lokalen Optimierung für spezielle Themenfelder zu Gesamtkonzepten ergänzt und deren kritische technologische Lücken identifiziert werden. Anhand der Bewertungsergebnisse wird ein ganzheitlicher Entwurf erarbeitet, welcher sowohl hinsichtlich der konstruktiven Merkmale als auch der produktionstechnologischen Elemente der Prozesskette detailliert und reifgemacht wird. Zur Bewertung der integrierten Variante werden einzelne kritische Technologiebausteine physikalisch validiert. Durch die Kombination der Projektergebnisse soll eine Optimierung erreicht werden mit dem Ziel die Fertigungskosten einer zukünftigen Hubschraubertür erheblich zu reduzieren.

Im Vorhaben „LIGHT-DLR“ werden neben der Konzeption zur Fügung und Integration der Türstruktur auch neuartige Industrialisierungsansätze für Verbindung und Integration federführend erarbeitet, und mittels Machbarkeitsstudien bewertet. Zielsetzung ist dabei, die Erstellung gesamtheitlich schlüssiger Gesamtkonzepte vom Design bis zur Industrialisierung zu entwickeln.

Das DLR beteiligt sich mit dem Institut für Bauweisen und Strukturtechnologie am Standort Augsburg. Durch die breite Aufstellung des Zentrums für Leichtbauproduktionstechnologie kann in den Bereichen der Presstechnologie und der Fügetechnik eine Schlüsselrolle eingenommen werden. So werden anwendungs- und prozessoptimierte Fertigungsrouten bewertet und entwickelt, für die Anforderungen ausgesuchte Halbzeuge verarbeitet, Fügeprozesse bewertet und die Prozesse optimiert. Es wird sichergestellt, dass das DLR weiterhin Vorreiter bei neuartigen Technologien im Bereich der Luftfahrt bleibt.

1.2 Voraussetzungen für das Vorhaben

Das DLR und insbesondere die beteiligte Abteilung AQP des Instituts BT verfügt über lange Erfahrung im Bereich der Faserverbundwerkstoffe und das Alleinstellungsmerkmal, in Zusammenarbeit von der Werkstoffanalyse und -optimierung, über das Design und die Auslegung bis hin zur Produktionstechnik die Entwicklungskette für FVK-Anwendungen abzudecken. Dafür stehen umfangreiche Fertigungsanlagen (Heißpressen, Autoklave, Heiztische, Öfen, Tapeleger, universelle Roboterzellen gem. Produktionsstandard) und Analysetechniken (mechanische Prüfungen, NDT-Methoden, Laser Tracker, uvm.) zur Verfügung. Diese interdisziplinären Kompetenzen, speziell für Luftfahrt-Primärstrukturen vom Entwurf bis zur Herstellung, bringt das DLR in das Projekt ein. Erfahrungen aus abgeschlossenen und parallellaufenden DLR-internen, LuFo- und EU-Projekten können miteingebracht werden:

- EU-Projekt ICASUS → vorintegrierbarer Flugzeugrumpf
- EU-Projekt MFFD → Rumpfdemonstrator
- LuFo-Projekt AZIMUT → Automatisierbare Technologien für CFK-Rümpfe
- LuFo-Projekt HoTStuff → Prozesse für ratenfähige Thermoplaststrukturen
- DLR-Projekt FRAME → Energieeffizienter Rumpf
- DLR-Projekt Factory Of The Future → Herstellung eines Druckschotts inkl. Digitalem Zwilling

Das Konsortium, neben dem DLR bestehend aus dem Konsortialführer Airbus Helicopters, dem Fraunhofer IGCV, der Universität der Bundeswehr in München und der Codronic GmbH ist breit mit Kompetenzen im Bereich von Materialien, Bauweisen, Design, Fertigungstechnologien, Systemintegration und Produktion von CFK Luftfahrtstrukturen aufgestellt.

1.3 Planung und Ablauf

Das Verbundvorhaben LIGHT gliedert sich in vier Hauptarbeitspakete, gemäß folgendem Projektstrukturplan:

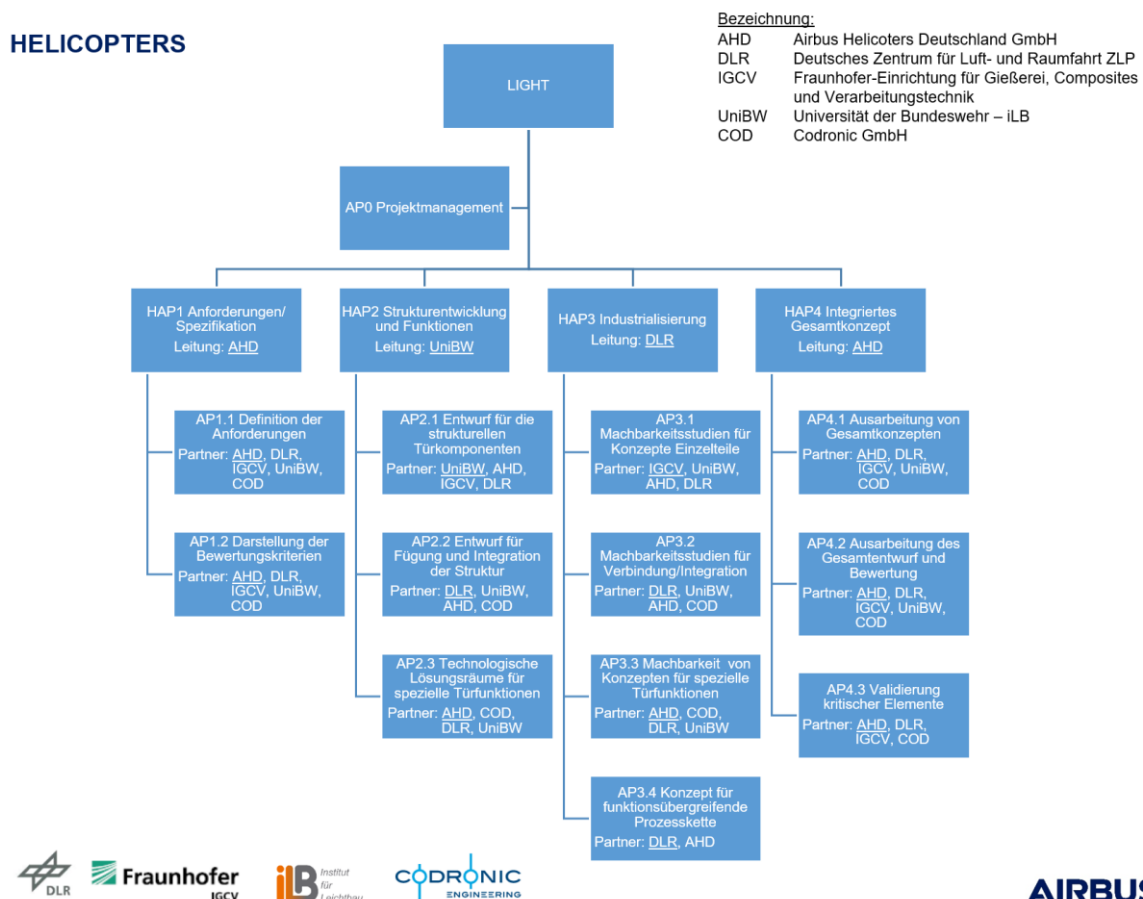


Abbildung 1: Gesamtprojektstrukturplan des Verbundvorhabens (oben) und zugehörige Legende (rechts)

Im HAP 1 werden unter Leitung von AHD die definierten Vorgaben und Rahmenbedingungen von AHD mit den Projektpartnern diskutiert und festgelegt. Darauf aufbauend werden gemeinsam mit den Projektpartnern AHD, DLR IGCV, UniBW und Codronic entsprechende Anforderungen an die Hubschraubertür definiert. Hier bringt jeder Projektpartner seine jeweilige Fachexpertise ein. Anschließend werden gemeinsam Bewertungskriterien festgelegt anhand welcher die in HAP4 erarbeiteten Konzepte systematisch bewertet werden.

Im HAP2, welches die UniBW als HAP-Leiter koordiniert, entwickelt das DLR in enger Abstimmung mit dem Verbundführer AHD und den weiteren Partnern Entwürfe zur Fügung und Integration der Türstruktur. Bei diesen Entwürfen geht es u.a. um die Auswahl maßgeschneiderter, materialspezifische Fügemethoden, die Erarbeitung geeigneter Fügenaht-Designs, und die intensive Abstimmung mit den Partnern hinsichtlich der Integration zusätzlicher Türfunktionen. Neben der konsequenten Weiterentwicklung von Leichtbauprinzipien soll so auch die Funktionsintegration berücksichtigt und umgesetzt werden. Parallel zu der rein konstruktionsgetriebenen Betrachtung in HAP2 werden durch den häufigen Austausch mit HAP3 Aspekte der Industrialisierung eingebunden.

In HAP 3 werden parallel zu HAP 2 die neuartigen Hubschraubertürkonzepte zu Entwürfen weiterentwickelt. Im Gegensatz zu HAP 2 liegt hier der Fokus auf einem produktionsoptimierten Design. Hierbei bringt das DLR seine Expertise im Bereich der industriellen Fertigung und Montage von Luftfahrtstrukturen und die Betrachtung von Gesamtprozessketten ein.

Im HAP4 werden zunächst verschiedene Gesamtkonzepte ausgearbeitet, welche die Grundlage für die Detaillierung in HAP 2 und HAP 3 darstellen. Die dort erarbeiteten Entwürfe münden schließlich wieder in das AP 4.2. Sowohl die Konzepte als auch der Gesamtentwurf werden entsprechend der in HAP 1 definierten Anforderungen und Kriterien bewertet. Ziel hierbei ist es ein gemeinsames Gesamtoptimum zu erarbeiten.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Im Bereich der Bewertung von Hubschraubern in frühen Entwicklungsphasen hat das DLR in den vergangenen Jahren eine anerkannte Kompetenz aufgebaut. Im Rahmen der internen Projekte EDEN (Evaluation and Design of Novel Rotorcraft Concepts, 2014-2016) und TRIAD (Technologies for Rotorcraft in Integrated and Advanced Design, 2018-2020) wurde in Zusammenarbeit unterschiedlicher Institute die integrierte Entwicklungs- und Bewertungsumgebung IRIS (Integrated Rotorcraft Initial Design (Weiland, Schmid, Buchwald, & Schwinn, 2018)) entwickelt, in der Konzeptentwurf sowie spezifische Aspekte des Vorentwurfs von Hubschraubern in klassischen und neuartigen Konfigurationen bewertet werden können. In Abbildung 2 ist ein prinzipieller Durchlaufplan des Prozesses dargestellt. In dem skizzierten Prozess wird ein Entwurf unter Berücksichtigung des Anforderungskatalogs in Form von TLARs (Top Level Aircraft Requirements) über verschiedene Entwurfsphasen (Level 0 bis 2) weiterentwickelt und dimensioniert.

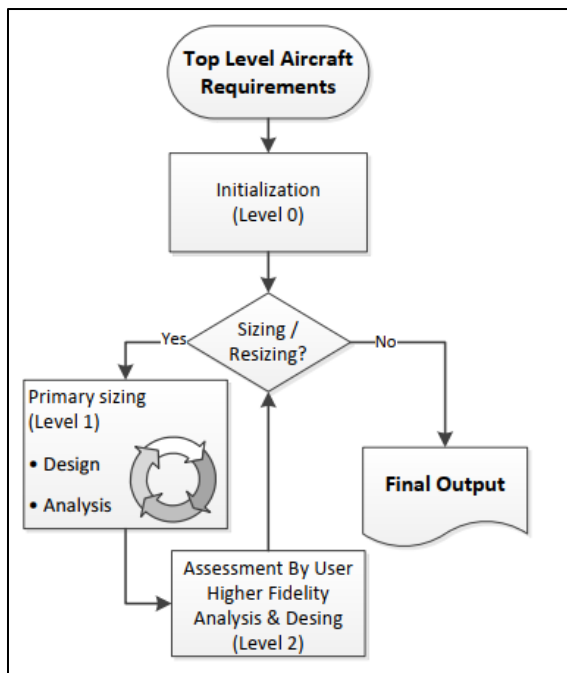


Abbildung 2: Durchlaufplan mit den Hauptfunktionen der IRIS Entwurfsumgebung (Weiland, Schmid, Buchwald, & Schwinn, 2018)

Die interdisziplinäre Auslegung von Hubschraubern wird im aktuellen LuFo VI-2 Vorhaben COBAIN derzeit weiterentwickelt und bietet die Basis für einen fruchtbaren Austausch.

Darüber hinaus ist die Entwicklung von Bauweisen und Strukturbauteilen für Luftfahrtanwendungen ein weiterer Schwerpunkt des DLR, der einen wichtigen Beitrag für das hier beschriebene Vorhaben leisten soll. So wurde beispielsweise im LuFo-IV Vorhaben CompTAB eine geschlossene Entwicklungskette für Composite-Bauteile mit Beachtung der fertigungsinduzierten Abweichungen entwickelt und erfolgreich validiert (Horn, Wille, & Hein, 2013). Die Beachtung der Fertigungstechnologie und die daraus resultierenden Abweichungen bei tatsächlich gefertigten Bauteilen stellen auch einen wichtigen Aspekt für zukünftige Hubschraubertüren dar.

Das DLR verfügt somit über detaillierte Kenntnisse in der Auslegung, Konstruktion und Herstellung von Bauteilen aus Faserverbundwerkstoffen.

Seit 1991 arbeitet das Institut für Bauweisen und Strukturtechnologie auf dem Gebiet der automatisierten Fertigung von Composite Strukturen. In den vergangenen 30 Jahren wurden verschiedene Projekte mit Fokus auf Bauweisen und Fertigungstechnologie bearbeitet und darüber ein breites Wissen im Gebiet der Ver- und Bearbeitung von Faserverbund-Strukturen erarbeitet.

Exemplarisch hierfür ist z.B. das DLR-interne Projekt Protec NSR zu nennen (Malecha & Full, 2019). In diesem Projekt wurde die Herstellung einer karbonfaserverstärkten Druckkalotte auf deren Optimierungs- und Automatisierungsmöglichkeiten hin erforscht. Dabei wurde die gesamte Prozesskette – von der Erstellung der Zuschnittsgeometrien bis hin zur Infiltration, Aushärtung und Endbesäumung des Bauteils – betrachtet. Der Prozessablauf ist schematisch in Abbildung 3 dargestellt. In diesem Projekt wurden verschiedene Preform-Technologien, genauer die Pick-and-Place Ablage gegen die

kontinuierliche rollende Ablage, hinsichtlich deren Ablege-Rate, Qualität und Reproduzierbarkeit untersucht und verglichen. Abschließend wurde der gesamte entwickelte automatisierte Herstellungsprozess hinsichtlich der Produktionskosten ausgewertet und zusätzliche Optimierungspotentiale herausgearbeitet.

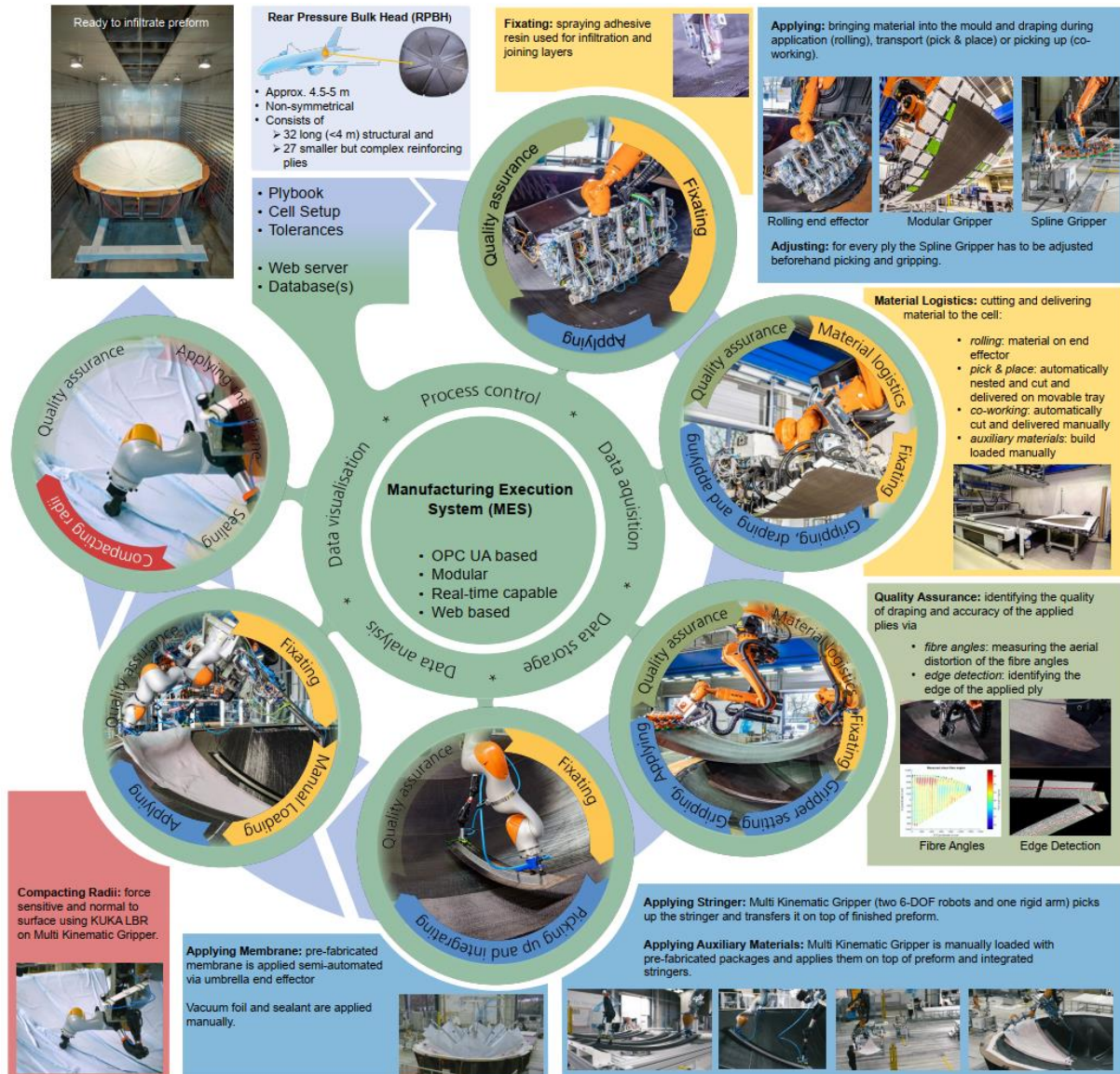


Abbildung 3: Prozesskette zur Herstellung einer Druckkalotte mittels Trockenfaser-Infusionstechnologie (Malecha & Full, 2019)

Im DLR Vorhaben TRuTh wurden Technologien zur Herstellung einer Flugzeug-Rumpfstruktur aus karbonfaserverstärkten Thermoplasten erforscht. Hierbei wurde ebenfalls die gesamte Prozesskette - von der automatischen Zuschnittserkennung bis zur fertig gefügten Baugruppe – anhand eines Rumpfsegments untersucht und der gesamte Prozessablauf technologisch bewertet (Fischer, et al., 2017). Im Zuge des Vorhabens wurden die Technologien der automatischen Pick-and-Place Ablage auf einen höheren

Technologiereifegrad gehoben und das roboterbasierte, kontinuierliche Ultraschallschweißen zur Montage von Versteifungsstrukturen (Stringern) weltweit erstmalig demonstriert.

Im Rahmen des Clean Sky 2 Großprojekts Large Passenger Aircraft (LPA) wird aktuell ein vollmaßstäblicher (engl. full-scale) multifunktionaler Rumpfdemonstrator (MFFD) entwickelt (Large Passenger Aircraft, kein Datum).

Das Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie in Augsburg (ZLP-AU) wird zusammen mit Airbus, Premium Aerotec und Aernnova die 8 m lange obere Halbschale für den Rumpfdemonstrator der nächsten Generation aus karbonfaserverstärkten Thermoplasten liefern. Das DLR befasst sich in diesem Zusammenhang mit der Entwicklung von zukunftsweisender in-situ-Faserablage (engl. advanced fiber placement, kurz AFP) mit einem innovativen Blitzlampenheizsystem, sowie der Weiterentwicklung von Schweißtechnologien – insbesondere des kontinuierlichen Ultraschall- und Widerstandsschweißens – für eine staubfreie Endmontage (Fischer & Larsen, 2020).

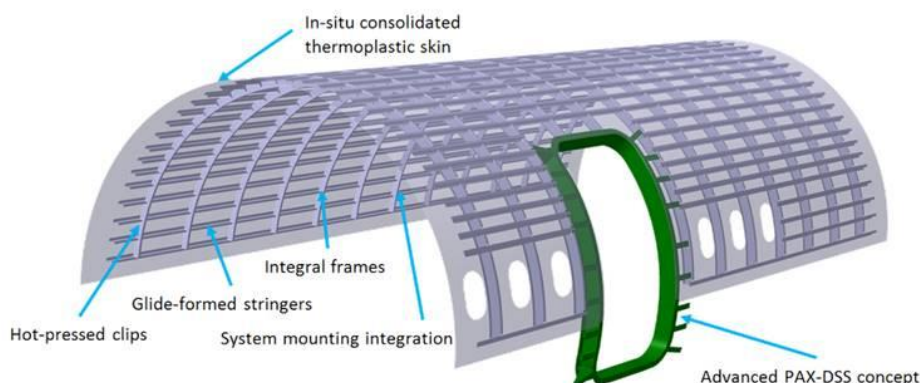


Abbildung 4 MFFD Rumpfhalschalen mit Schwerpunkt auf Fertigung und Montage (Fischer & Larsen, 2020)

Im Projekt INSTRUKT wurde gemeinsam mit AHD daran geforscht, mittels automatisierter Prozesse beim Fügen von Kohlenstofffaserverbundbauteilen einen Kostenvorteil durch einen reduzierten Fertigungs- und Montageaufwand zu erreichen (Larsen & Gänswürger, 2014). Zur Validierung der Technologien wurde im Projekt die Umsetzung der Montage einer Hubschrauberbodenstruktur mit automatisierten Methoden umgesetzt. Als Versuchsbauteil des Projektes INSTRUKT diente hierbei die Bodenstruktur eines Hubschraubers. Bei dieser wurde das Framework mit den Frames und der Bodenschale (Hubschrauberäußenhaut) verklebt. Der Fügeprozess, bei welchem eine Klebraupe mittels eines Endeffektors aufgebracht wurde, erfolgte vollautomatisiert, wobei der Greifer neben dem reinen Bauteil-Handling zusätzlich für die Fügekräfteinleitung diente. Anschließend wurde eine punktuelle Aushärtung des Klebstoffs mittels Induktionsendeffektor durchgeführt. Abbildung 5 zeigt das Fügen eines Testbauteils während des Projektes INSTRUKT. In diesem Projekt konnten somit bereits erste Erfahrungen im Bereich alternativer automatisierter Montagemethoden bei der Herstellung von Hubschrauberstrukturen gesammelt werden.



Abbildung 5: Automatisierte Montage einer Hubschrauberbodenstruktur (Larsen & Gänswürger, 2014)

Im Rahmen des LuFo-Projektes IPro wurde gemeinsam mit dem Konsortialführer AHD an der Erhöhung des industriellen Reifegrades einer CFK-Prozesskette für hochdrapierte Geometrien geforscht. In diesem Projekt wurde eine vollautomatisierte Prozesskette vom Zuschnitt bis zur fertig fixierten Preform realisiert. Die Preform wurde anschließend an den Projektpartner AHD zur weiteren Verarbeitung übergeben. Für die Erarbeitung des Drapier- und Aktivierungsprozesses wurden spezielle, beheizte Werkzeuge entwickelt, welche zugleich einen Teil des aktiven Drapiervorgangs darstellen (Stefani, Buchheim, Deden, Gänswürger, & Larsen, 2019) (Deden, Gänswürger, Buchheim, & Stefani, 2019) (Deden, Buchheim, & Stefani, EVALUATION OF AN ADDITIVELY MANUFACTURED TOOLING WITH INTEGRATED FUNCTIONALITY FOR THE PRODUCTION OF CARBON FIBER TEXTILE PREFORMS, 2018).

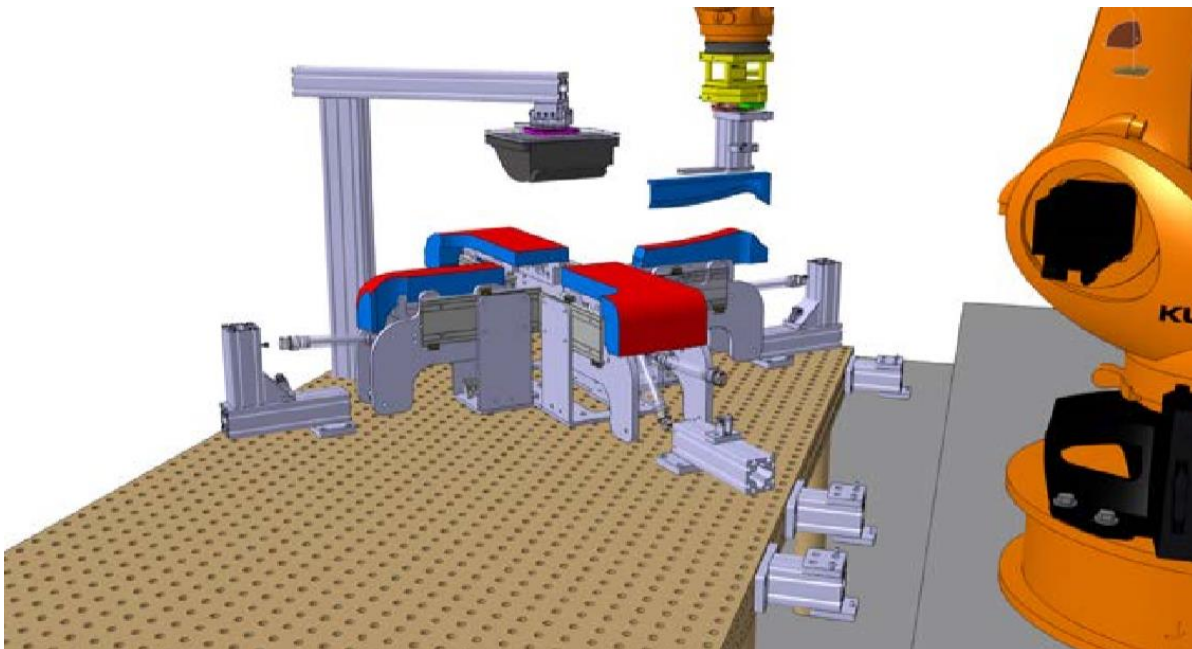


Abbildung 6: Simulation des automatischen Drapiervorgangs (Stefani, Buchheim, Deden, Gänswürger, & Larsen, 2019)

Zusätzlich zu den für das Vorhaben LIGHT relevanten Erfahrungen mit unterschiedlichsten Produktions- und Fügetechnologien im Compositebereich aus abgeschlossenen und

aktuellen Projekten bietet das DLR mit seiner einzigartigen industriellen Forschungsumgebung ideale Voraussetzungen um kritische Technologieelemente in industrieller Umgebung abzubilden und zu validieren. Hierfür steht unter anderem die so genannte Multifunktionale Roboterzelle zur Verfügung, in welcher bis zu 6 Industrieroboter gemeinsam an einem Bauteil arbeiten können. Dies ermöglicht es auch hochkomplexe Fertigungs- und Montageschritte abzubilden.



Abbildung 7: Multifunktionale Zelle (MFZ) beim DLR-ZLP Augsburg (30m x 15m x 7m)

Durch die direkte Zusammenarbeit mit dem OEM Airbus Helicopters Deutschland GmbH können die in den oben genannten Projekten und Vorhaben erarbeiteten Fähigkeiten nun direkt in die Entwicklung einer neuartigen Hubschraubertüre eingebracht werden. Die Basis für die Weiterentwicklung der Auslegung der Hubschraubertür selbst sind natürlich auch die Erkenntnisse des OEM aus verschiedenen Projekten des vergangenen Jahrzehnts zu Hubschraubertüren (Ladstätter, Radlmaier, Manten, Hooning, & Kölzer, 2013) und Flugzeugtüren (Wolf, Türen in Composite Technologie - Nächste Generation TCT-NG: Schlussbericht, 2013) (Wolf, RENO - TuENO: Türentwicklung, 2015).

Dies und die Reifmachung von kritischen Technologieelementen über den Stand der Technik hinaus wird die Entwicklung neuer Türkonzepte ermöglichen.

Das Risiko einer Ergebnisverwertung aufgrund von vorhandenen Schutzrechten Dritter wird derzeit nicht gesehen.

Literatur

- [1] P. Weiland, M. Schmid, M. Buchwald und D. B. Schwinn, „A distributed design environment for rotorcraft,“ in *Deutscher Luft- und Raumfahrt Kongress*, Friedrichshafen, Germany, 2018.
- [2] M. Horn, T. Wille und R. Hein, „Novel Composite Tool Chain and its Application for Fibre Reinforced Thermoplastics,“ in *Sampe Europe, SETEC Conference*, Wuppertal, 2013.
- [3] R. Keck, W. Machunze, W. Dudenhausen und P. Middendorf, Design, analysis and manufacturing of a carbon-fibre-reinforced polyetheretherketone slat, *The Journal of Aerospace Engineering*, Volume 223, Issue 8, pages 1115 - 1123, 2009.

- [4] M. Malecha und T. Full, „HIGHLY AUTOMATED MANUFACTURING PROCESS,“ in *ICCM22*, Melbourne, Australia, 2019.
- [5] F. J. C. Fischer, C. Frommel, A.-H. Thellmann, T. Stefani, M. Kühnel, M. Beyrle, A. Schuster, T. Gerngross und M. Kupke, „Tailor-made Thermoplastics: Production Technology and Quality Assurance of a Thermoplastic Aircraft Fuselage Skin Segment,“ in *Proceedings of the 21st International Conference on Composite Materials (ICCM21)*, Xian, China, 2017.
- [6] „Large Passenger Aircraft,“ [Online]. Available: <https://www.cleansky.eu/large-passenger-aircraft>. [Zugriff am 13 08 2020].
- [7] F. Fischer, „MFFD – Produktionstechnologie für den thermoplastischen Rumpf von morgen,“ DLR BT, 2020. [Online]. Available: https://www.dlr.de/zlp/desktopdefault.aspx/tabid-15354/24923_read-62324/#/gallery/33694.
- [8] L. Larsen und P. Gänswürger, „Abschlussbericht Instruk AP 4700,“ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Augsburg, 2014.
- [9] T. Stefani, A. Buchheim, D. Deden, P. Gänswürger und L. Larsen, „DRAPE FORMING METHODS FOR THE AUTOMATED PREFORMING OF COMPOSITE HELICOPTER STRUCTURES,“ in *SAMPE Europe Conference*, Stuttgart, 2019.
- [10] D. Deden, P. Gänswürger, A. Buchheim und T. Stefani, „Industrial concept for the automated production of small batch series preforms for Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) components,“ in *SAMPE Europe Conference*, Stuttgart, 2019.
- [11] D. Deden, A. Buchheim und T. Stefani, „EVALUATION OF AN ADDITIVELY MANUFACTURED TOOLING WITH INTEGRATED FUNCTIONALITY FOR THE PRODUCTION OF CARBON FIBER TEXTILE PREFORMS,“ in *CAMX*, Dallas, 2018.
- [12] E. Ladstätter, V. Radlmaier, D. Manten, S. Hoening und P. Kölzer, „Development of a Ecological friendly final consolidation step using Thermoplastic Fibre Placement for a helicopter door,“ CORDIS, <https://cordis.europa.eu/project/id/287103/>, 2013.
- [13] C. Wolf, „Türen in Composite Technologie - Nächste Generation TCT-NG: Schlussbericht,“ Eurocopter Deutschland GmbH, Donauwörth, 2013.
- [14] C. Wolf, „RENO - TuENO: Türenentwicklung,“ Airbus Helicopters Deutschland GmbH, Donauwörth, 2015.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Verbundprojekt LIGHT ist von seiner Arbeitsstruktur von vornherein auf eine enge und intensive Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern ausgelegt, die vom Vorhaben LIGHT-DLR übernommen wird. Die Art der Beteiligung der einzelnen Projektpartner in den jeweiligen APs kann dem Strukturplan (siehe Abbildung 1) entnommen werden.

Durch die räumliche Nähe der Projektpartner wird ein intensiver Austausch mit den Partnern angestrebt. Hierbei ist der direkte Austausch vor Ort bei den jeweiligen Partnern und die daraus resultierenden Einblicke in deren Produktionstechnologien und Arbeitsweisen ein wichtiger Bestandteil. Im Rahmen des Verbundvorhabens LIGHT wird unter der Koordination der Airbus Helicopters Deutschland GmbH mit den Partnern Fraunhofer IGCV, Universität der Bundeswehr München, Codronic GmbH sowie mit dem Verbundführer AHD zusammengearbeitet.

Die Zusammenarbeit orientiert sich dabei an den inhaltlichen Beschreibungen der Aufgabenstellung und den zu erreichenden Zielen. Es werden regelmäßige, meilensteinorientierte, technische Arbeitstreffen sowie Fortschritts- und Ergebnis-Reviews mit den Verbundpartnern durchgeführt.

Es bestehen stetige, bilaterale Kooperationsarbeiten zwischen Airbus Helicopters und dem DLR, die durch dieses gemeinschaftliche Projekt gestärkt werden. Im Rahmen des Vorhabens im Verbund LIGHT sind keine Unterbeauftragungen geplant und keine assoziierten Partner vorgesehen.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Erzielte Ergebnisse

Im Folgenden werden die mit der Zuwendung realisierten Arbeiten und erzielten Ergebnisse unter Zuordnung der Projektstruktur und gegenüber den gesetzten Zielen detailliert beschrieben.

HAP1 Anforderung und Spezifikation

Im HAP 1 wurden unter Leitung von AHD die definierten Vorgaben und Rahmenbedingungen von AHD mit den Projektpartnern geteilt und abgestimmt. Darauf basierend wurden gemeinsame Kriterien zur Bewertung der anschließend zu entwickelnden Türkonzepte erarbeitet.

Die von AHD vorbereitete und innerhalb des APs abgestimmte Anforderungsliste bildet die Basis für die weitere Konzeptionierung einer Hubschraubertür. Die Aufstellung beinhaltet über 80 Positionen, clustert alle Positionen nach technischen, ökologischen, wirtschaftlichen, kunden- oder missionsbetreffenden Anforderungen, beschreibt diese und ordnet Attribute und Werte zu. Die Anforderungsliste steht allen Projektpartnern in Form einer Excel-Datei zur Verfügung und ist Ergebnis des APs.

Mithilfe der Ergebnisse aus AP1.1 konnte im Konsortium eine Bewertungsmatrix erstellt und die Gewichtung aller Kriterien für eine zukünftige Hubschraubertür und deren Bauweise erfolgen. Die vom Projektpartner UniBW aufbereitete Zusammenstellung der Bewertungskriterien und die Auswertung selbst stehen allen Projektpartnern in Form einer Excel-Datei zur Verfügung und sind Ergebnis des APs. Folgende Tabelle zeigt das konsolidierte Ergebnis der Bewertung.

Tabelle 1: Ergebnis der Bewertungskriterien zu einer zukünftigen Hubschraubertür

als wichtiger	Anforderungen	Statistisches Mittel
Prozess	Prozesszeiten	2,92%
	Prozessstabilität	7,84%
	Reperaturfähigkeit	6,08%
	Montageaufwand	5,96%
	Automatisierbarkeit	5,50%
	Möglichkeiten für Materialkombination	3,04%
	Umweltfreundlichkeit/ primärer Ressourcenaufwand	1,99%
	Technologiereife	4,44%
	Ausschussrisiko	8,07%
Bauteil technisch	Gewicht (Einsparung Treibstoff)	7,72%
	Einzelkomponenten-austausch	6,55%
	nachträgliche Änderungsmöglichkeiten	4,09%
	Designfreiheit	2,57%
	Möglichkeiten für Postprocessing	4,44%
	Aufwand Qualitätssicherung	7,02%
	lange Inspektionsintervalle	5,85%
Bauteil wirtschaftlich	Kosten pro Bauteil	8,19%
	Innovationsgrad	3,98%
	Investitions-notwendigkeit	3,74%

HAP2 Strukturentwicklung und Funktionen

Im HAP2, welches die UniBW als HAP-Leiter koordiniert, entwickelte das DLR in enger Abstimmung mit dem Verbundführer AHD und den weiteren Partnern Entwürfe zur Fügung und Integration der Türstruktur. Bei diesen Entwürfen geht es u.a. um die Auswahl maßgeschneiderter, materialspezifische Fügemethoden, die Erarbeitung geeigneter Fügenaht-Designs und die intensive Abstimmung mit den Partnern hinsichtlich der Integration zusätzlicher Türfunktionen. Neben der konsequenten Weiterentwicklung von Leichtbauprinzipien sollte so auch die Funktionsintegration berücksichtigt und umgesetzt werden.

Es wurden die Überlegungen zur strukturellen Umsetzung einer Schalenbauweise, wie sie in AP4.1 zusammengefasst wurde, erarbeitet. Ein besonderes Augenmerk liegt auf der dadurch erforderlichen, bauteilumlaufend vorzusehenden Fügezone zur Verbindung der beiden

Schalen. Darüber hinaus besteht bei der Umsetzung von rippenförmigen Versteifungsstrukturen das Erfordernis deren Fügung zwischen den Schalen.

Im vom DLR geleiteten AP2.2 wurden unterschiedliche Verfahren für die Fügung der Schalen und Versteifungen vorgestellt, diskutiert und in Abhängigkeit der Eignung und des Technologiereifegrades sowie dessen Verfügbarkeit beurteilt. Dabei wurden die Anforderungen an den Fügeprozess bei der Gestaltung der Komponenten und der Materialauswahl berücksichtigt.

Es wurden der Stand der Technik und die Erfahrungen am DLR mit Schweißverfahren für Laminathalbzeuge vorgestellt und im Kontext der geplanten Anwendung diskutiert. Dabei sind die hier relevanten Fügemethoden; das elektrische Widerstandsschweißen, das Ultraschallschweißen in statischer und kontinuierlicher Prozessführung, das Induktionsschweißen und das Co-Konsolidieren, besonders bei lokaler Aufheizung, vertieft worden. Letztlich wurde herausgearbeitet, dass das Ultraschallschweißen das geeignetste Fügeverfahren für den Anwendungsfall darstellt. Die besonderen Herausforderungen beim Schweißen von Laminaten wurden dabei hervorgehoben und in Zusammenhang mit der Anwendung gebracht.

Alternative Fügemethoden der Schalen sind das weniger anzustrebende mechanische Fügen über Nieten und/oder Verschraubungen.

Bei duroplastischer oder Thermoplast-Duroplast-Mischbauweise kommt außerdem das Fügen durch den sogenannten FIDJ-Prozess in Betracht. Dabei wird die Möglichkeit der chemischen Anbindung zwischen reagierendem Harzsystem und anlösbarem Thermoplast genutzt. Die Kompatibilität muss bei der Auswahl des Matrixwerkstoffs berücksichtigt werden, eine auch aus Zulassungsvoraussetzungen naheliegende Kombination: RTM6 und PEI. Eine Zusammenstellung möglicher Werkstoffe wurde durch den Konsortialführer zur Verfügung gestellt.

Es wurden spezielle Türfunktion und Anforderungen konkretisiert und ausgearbeitet. Der Partner Codronic zeigte die Gestaltungsmöglichkeiten elektrifizierter Türfunktionen auf. Die Begleitung dessen stellt sicher, dass die Zusatzfunktionen mit dem Gesamtentwurf zur Montage harmonisieren.

Designseitig konnten die Anforderungen Berücksichtigung finden, Details zur Bauweise/Design geht aus dem Bericht der UniBW hervor, Abbildung 12 liefert einen Eindruck zur Fügenahtgeometrie der Schalenbauweise, geeignet für Schweiß- und Klebprozess.

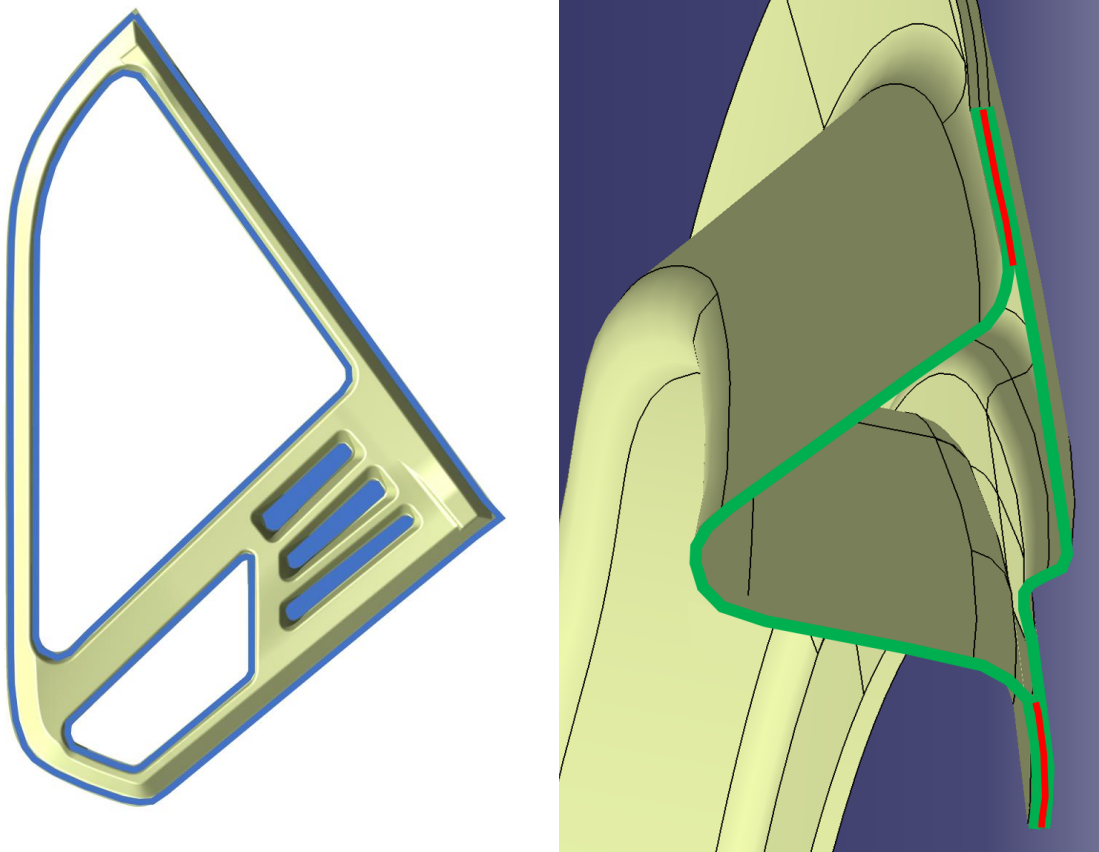


Abbildung 8: Hubschraubertür innenseitig, mit blauer Kennzeichnung der Bereiche der Fügezonen (links) und Flansch-Ausprägung zur Erzeugung einer flächigen Anbindung zwischen Innen- und Außenschale (rechts)

Für das Verbinden der Schalen konnten realistisch umsetzbare und den Festigkeits- und Gewichtsansprüchen genügende Fügeverfahren ausgewählt werden: Bei der Thermoset-Bauweise ein strukturelles Kleben mit pastösem Klebstoff, unterschiedliche Vorbehandlungsmethoden wurden über Coupon-Tests bei AHD geprüft. Bei der Thermoplast-Bauweise das Ultraschallschweißen per MultiSpot-Prozessführung mit folienförmigem Energierichtungsgeber.

HAP3 Industrialisierung

In HAP 3 wurden parallel zu HAP 2 die neuartigen Hubschraubertürkonzepte mit Fokus auf einem produktionsoptimierten Design weiterentwickelt. Hierbei wurde die Expertise im Bereich der industriellen Fertigung und Montage von Luftfahrtstrukturen und die Betrachtung von Gesamtprozessketten, im Speziellen DLR ZLP Augsburg, eingebracht.

Zur Erstellung von Konzepten für die Fertigung der festgelegten Bauweisen (HAP4) wurde intensiv gemeinsam diskutiert. Mit dem Projektpartner IGCV wurde gemeinsam eine Übersicht zu den Fertigungsmethoden erarbeitet und eine zu favorisierende Route zur Herstellung gekennzeichnet. In Arbeitstreffen mit dem gesamten Konsortium wurden die möglichen Prozesse verfeinert und ergänzt und sich auf Prozessrouten geeinigt. Dabei fließen zum einen die Vorstellungen für eine denkbare Anwendung ein, zum andern der

Forschungsbedarf der Institute sowie die Verfügbarkeit der Anlagentechnik, um praktische Versuche im Rahmen der Möglichkeiten dieses Projekts abbilden zu können.

Die Prozessrouten sind vier Bauweisen zugeordnet:

- Schalenbauweise aus thermoplastischem CFK
- Schalenbauweise aus Trockenfasern und nachgeschalteter Infusion
- Schalenbauweise aus duroplastischem CFK
- Profilbauweise aus thermoplastischem CFK

Es konnte festgehalten werden, dass die Herstellung der Einzelschalen aus thermoplastischen UD- und Vlies-Halbzeugen im AFP- und Pressprozess, das zwischengeschaltete Co-Konsolidieren und das nachgeschaltete Ultraschallschweißen für eine Umsetzung im Fokus stehen. Bei der Bauweise aus Trockenfasern wurde der Einsatz von RTM-Prozesstechnik und das nachgeschaltete Kleben präferiert. Bei der Herstellung aus Thermoset-Prepregs und SMC-Halbzeugen wurde die Verarbeitung im Pressprozess und das nachgeschaltete Fügen per FIDJ-Prozess angedacht.

Die erarbeiteten, unterschiedlichen Konzepte und Entwürfe wurden im intensiven Austausch mit den Projektpartnern im Rahmen der Arbeitstreffen bewertet und zu einer funktionsübergreifenden Gesamtprozesskette ausgearbeitet. Hierbei wurde das spezifische Wissen der Projektpartner zu relevanten Fertigungsprozessen genutzt um eine bestmögliche Bewertungsgrundlage zur Erarbeitung des Gesamtkonzeptes zu schaffen.

Im Zusammenhang mit den festzulegenden Prozessrouten galt es, diese in den Kontext einer Fertigungsabfolge zu bringen. Dabei laufen die verschiedenen Prozess- und Halbzeug- oder Komponentenanforderungen zusammen. So konnte eine integrative Fertigung der strukturellen und weitere funktioneller Komponenten aufeinander abgestimmt werden.

SMC-Pressen – Vorversuche mit Plattenwerkzeug

Erste SMC-Verarbeitungsversuche mit dem LyondellBasell Lytex Material haben bestätigt, dass ein enges Zeitfenster für ein ausreichendes Fließen einzuhalten ist. Andernfalls kommt es vor der Druckaufbringung zu ersten Vernetzungen, was das erforderliche Fließen zur Füllung der Kavität verhindert.

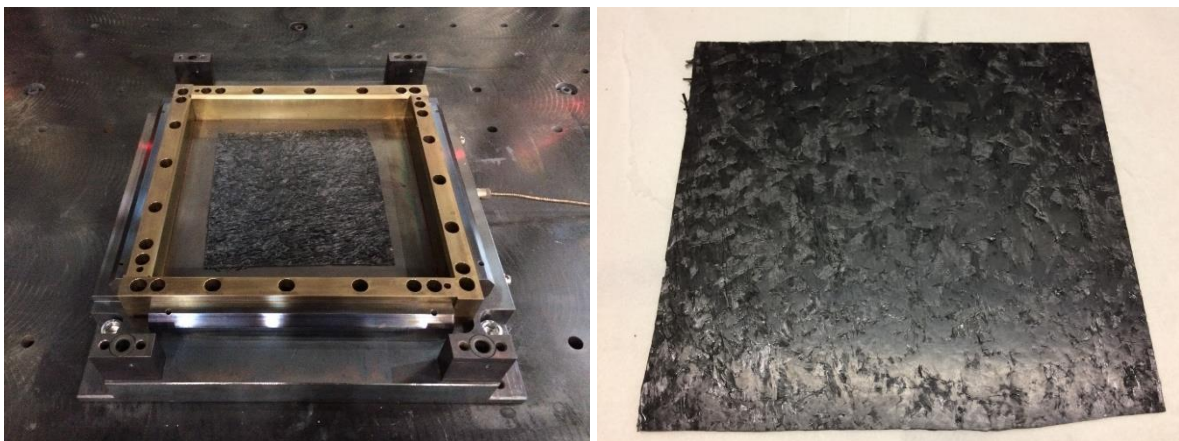


Abbildung 9: Erste Pressergebnisse des LyondellBasell Lytex Materials ohne nennenswertes Fließverhalten

Zur Prozessfindung und Beurteilung des Materialverhaltens wurden weitere Lamine gepresst. Dabei wurden Prozessparameter und Zielwandstärken über die Einwaage variiert. Eine Auswahl dieser SMC-Platten wurde schließlich für das Testlabor bei den Projektpartnern Airbus Helicopters und Universität der Bundeswehr München zur Verfügung gestellt. Dort erfolgten Analysen zur Mechanik des SMC und zu den Verbindungseigenschaften nach dem strukturellen Kleben.

Zu den Pressversuchen wurden Protokolle mit Prozessdaten, Bildern, Messergebnissen und sonstigen Vermerken erstellt und abgespeichert. Dies bietet auch die erste Basis für zukünftige Simulationen des Prozesses.

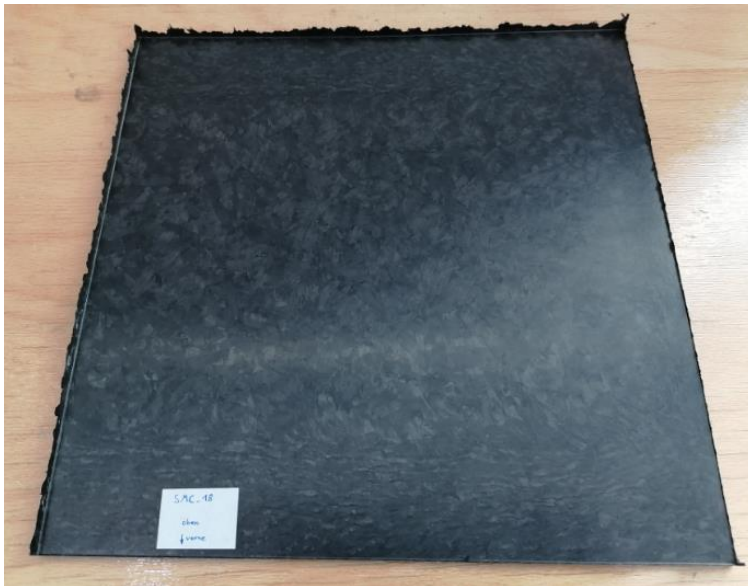


Abbildung 10: Exemplarische SMC-Platte für Materialverarbeitungsversuche und Analysen

Alle Versuchswerte wie eingestellt und gemessene Prozessgrößen, Protokolle, Messungen und Bilder werden gespeichert und stehen im Konsortium zur Verfügung.

Fügeversuche

Die Machbarkeit von Verklebungen konnte bereits bei Anwendungen bei Airbus nachgewiesen werden. Dies wurde ergänzt durch mechanische Tests eines kleinen Versuchsplans, bei dem SMC-Platten hergestellt und Versuchsproben verklebt und geprüft wurden. Die Ergebnisse liegen AHD vor.

Die Machbarkeit von Ultraschallschweißverbindungen im MultiSpot-Verfahren auf Coupon-Level und bei gekrümmten Strukturen konnte ebenfalls gezeigt werden. Hier sind jedoch noch Prozess- und Schweißwerkzeug-Optimierungen zur Vermeidung der Halbzeug-De-Konsolidierung durchzuführen.

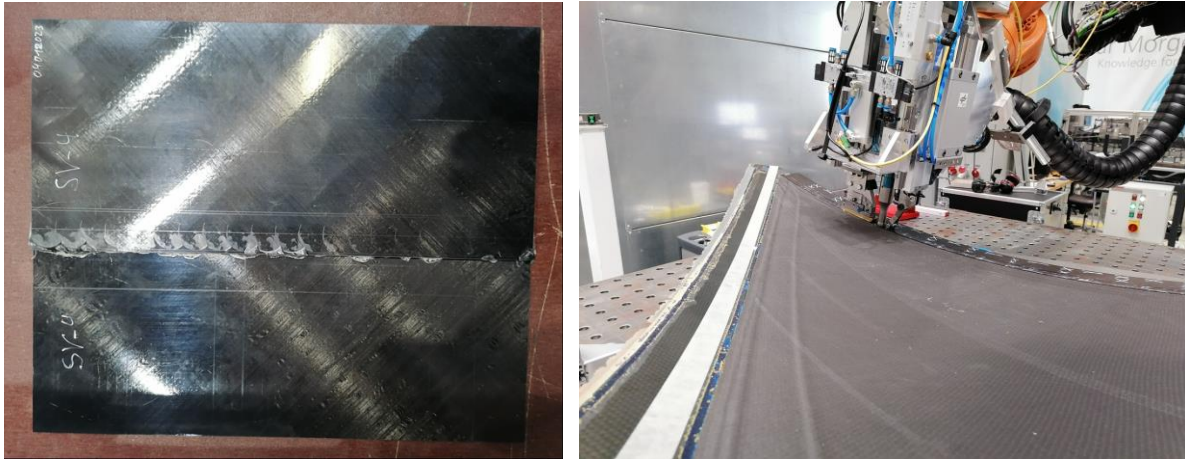


Abbildung 11: Ultraschallschweißversuche im MultiSpot-Verfahren (links) und an gekrümmten Strukturen (rechts)

Alle Versuchswerte, wie eingestellt und gemessene Prozessgrößen, Protokolle, Messungen und Bilder werden gespeichert und stehen im Konsortium zur Verfügung.

Die Verbindung der Hubschraubertür-Innenschale mit der Außenschale sollte im Projekt durch strukturelles Kleben erfolgen. Aufgrund der hohen Forschungsaufwände im Bereich der SMC-Technologie wird der DLR-Schwerpunkt beim Fügen deutlich reduziert. Gepresste Proben für Klebeversuche wurden zur Verfügung gestellt. Verklebungen auf Probekörper-Level mit eigens entwickelter Vorrichtung wurden am DLR durchgeführt.

Konzept für funktionsübergreifende Prozesskette

Es konnte eine funktionsübergreifenden Gesamtprozesskette mit Fertigungsabläufen ausgearbeitet werden, vgl. Anhang F6. Hierbei wurde das spezifische Wissen der Projektpartner zu relevanten Fertigungsprozessen genutzt.

Dem Konsortium stehen alle Prozessrouten, auch die verworfenen Varianten wie Spritzgießen von Halbzeugen für einen Co-Konsolidierungsprozess, zur Verfügung.

HAP4 Integriertes Gesamtkonzept

Im HAP4 wurden verschiedene Gesamtkonzepte ausgearbeitet, welche die Grundlage für die Detaillierungen in HAP 2 und HAP 3 darstellten. Sowohl die Konzepte als auch der Gesamtentwurf wurden entsprechend der in HAP 1 definierten Anforderungen und Kriterien bewertet. Ziel hierbei ist es ein gemeinsames Gesamtoptimum zu erarbeiten. Es wurden im Konsortium die in folgender Grafik zusammengefassten Bauweisen-Konzepte ausgearbeitet.

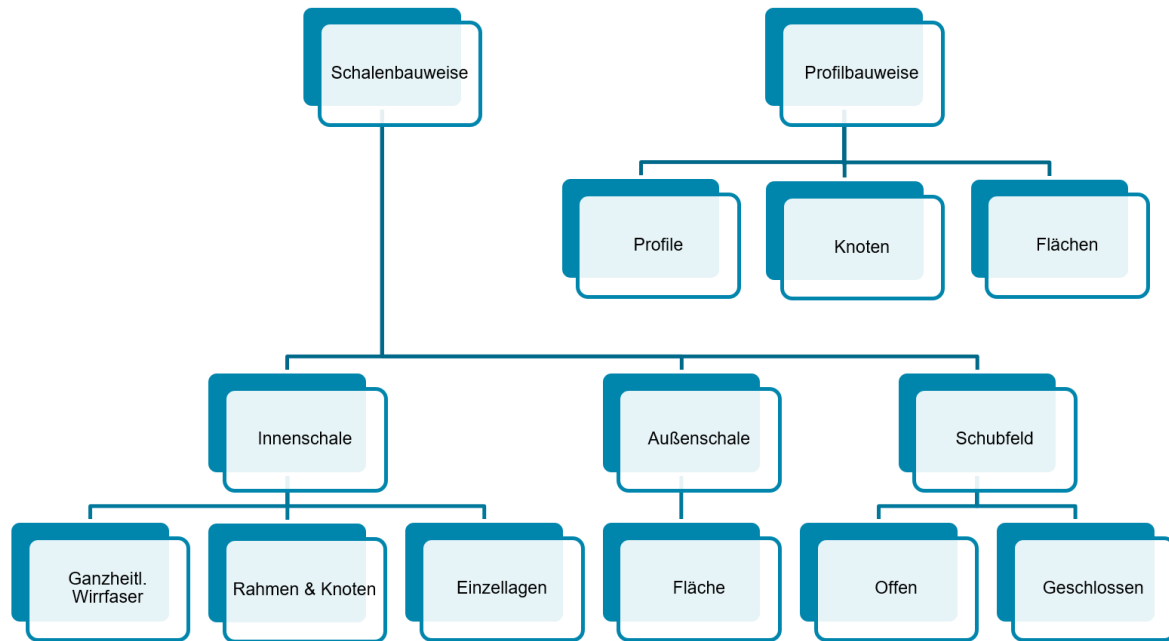


Abbildung 12: Bauweisen-Gesamtkonzepte einer zukünftigen Hubschraubertür

Die in der praktischen Umsetzung durch Versuche weiterzuverfolgende Bauweise ist vorrangig die dargestellte Schalenbauweise, zum einen gekennzeichnet durch eine innere Türschale mit hohen doppelten Krümmungen und der Aufnahme der meisten Funktionselemente der Tür. Zum anderen ist die außenseitige Türschale eher flächig und übernimmt durch die belastungsgerechte Anbindung an die Innenschale gemeinsam die hohen Anforderungen an das Abfangen auftretender Lasten und bildet die Außenhaut des Bauteils ab.

Ein anderes ebenso grundsätzlich denkbare Konzept einer Türstruktur bildet die Profilbauweise ab. Hierbei wird die Struktur gemäß ihrer Geometrie in profilmäßige, flächige und knotenartige Komponenten aufgeteilt. An den Knoten laufen flächige, profilmäßige und evtl. weitere Knoten zusammen. Dies erfordert jedoch eine umfangreiche konstruktive Anpassung der Türstruktur und würde voraussichtlich zu hohen Entwicklungsaufwänden bei den Fertigungsprozessen führen.

Das Ergebnis dieser Arbeiten stellte die Basis für die weitere Entwurfsphase in HAP 2 und HAP 3 dar, welche wiederum in einem Gesamtentwurf in AP 4.2 mündete.

Für die Umsetzung des SMC-Prozesses ist eine aufwändige Presswerkzeug-Technik erforderlich. Dafür erfolgte die Beauftragung eines SMC-Werkzeugs, bei der Erstellung des Lastenhefts konnte ein Entwurf mit Berücksichtigung der Bauteilanforderungen und der für die geplanten Verarbeitungsversuche und Validator-Herstellung einzusetzenden Peripherie (Großanlage Heißpresse, DLR ZLP Augsburg) beigesteuert werden.

Der besondere Aufwand für die Auslegung des Presswerkzeugs hängt mit den folgenden, kurzzusammengefassten Anforderungen zusammen:

- Herstellung von SMC-Halbzeugen mit geringer Wandstärke, um gewichtsseitig mit der herkömmlichen händischen Bauweise (UD-Prepregs, einteilig, „Schlauchtechnik“) konkurrieren zu können
- Abbildung der doppelten Krümmung (global und zusätzlich ausgeprägt lokal bei der Innenschale), der beidseitig geforderten hohen Oberflächenqualität (Sichtseite und Fügezonen-Seite) sowie einer günstigen Materialverteilung nach dem (Fließ-)Pressen
- Nutzung des Werkzeugs als Amboss bei der optionalen Fügung per Ultraschallschweißprozess (TP-Route) und als Vorrichtung zum Kleben (SMC-Route) unter Temperatureinwirkung (je nach Anforderung des ausgewählten Klebstoffsystems)
- Zuvor genannter Punkt erfordert außerdem die Ergänzung des Werkzeugs mit Haltevorrichtungen
- Nutzung des Werkzeugs für den SMC-Prozess (Auslegung erfolgt hierfür), aber auch Verwendung für die TP-Route (mit Abstrichen bei Formänderungen durch den Abkühlprozess)
- Nutzung des Werkzeugs für die Herstellung von Vorformlingen (betrifft vorrangig die Innenschale aufgrund der komplexen Form)

Prozess-Automation

Klassisches SMC setzt auf geringen Vorbereitungsaufwand des Halbzeugs aufgrund hoher Fließfähigkeit beim Pressen. Aufgrund der beschriebenen Herausforderungen, bauteil- und materialeitig, musste ein Konzept für den automatisierten, und somit wiederholbaren, schnellen und exakten SMC-Beschickungsprozess bei der Fertigung einer Hubschraubertür-Innenschale entwickelt und untersucht werden.

Prozessablauf ohne Details:

- SMC-Material auftauen
- Cuttern der definierten Einzelzuschnitte
- Positionierung auf Ablagetisch per Laserprojektion
- Transfer in die Presse per Roboterwerkzeug
- Auf die Beschickung abgestimmter Pressprozess

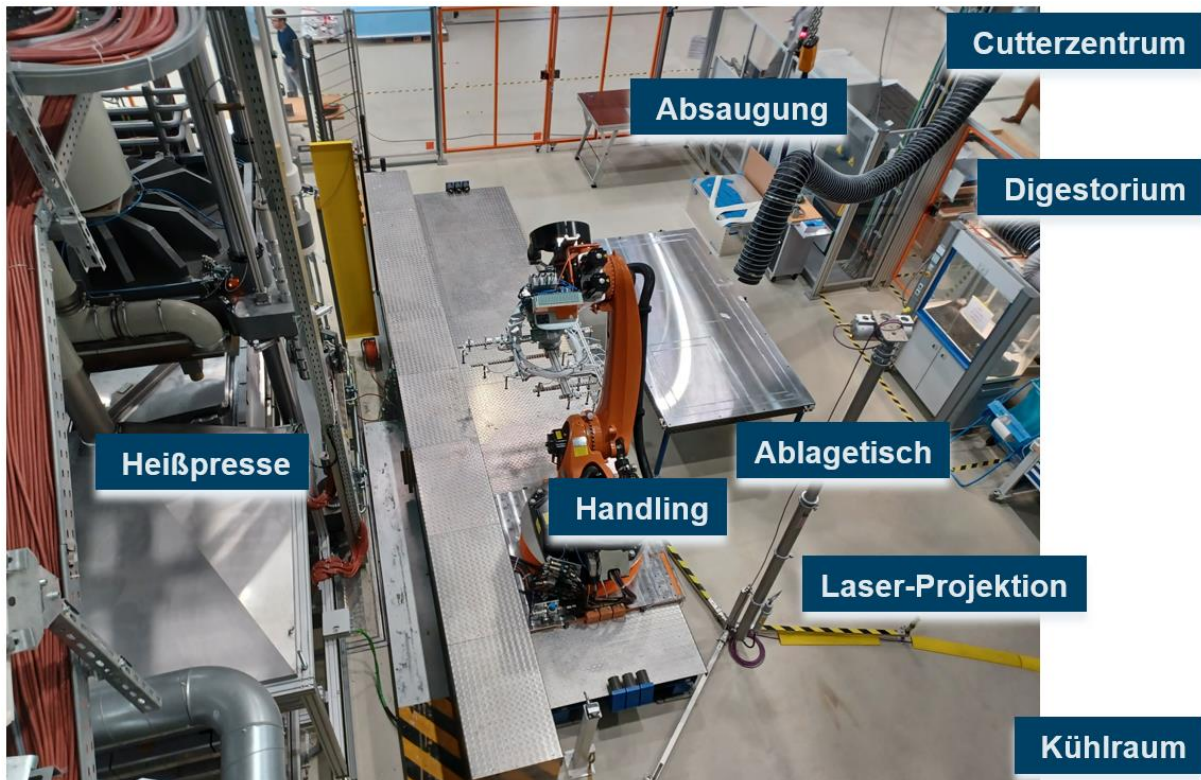


Abbildung 13: Gesamtanlage für das SMC-Pressen, mit Heißpresse und Roboteranlage als Hauptbestandteile, am DLR ZLP in Augsburg

SMC-Vorpack

Der Vorpack wurde gemeinsam mit dem Projektpartner Universität der Bundeswehr München gewichts- und positionsabhängig konzeptioniert und umgesetzt, um die geringen Wandstärken und geforderten Fließwege bei der Hubschraubertür-Innenschale zu erreichen. Es wurde ein Workflow zum voraussichtlich erforderlichen Optimieren der Vorpackeinzellagen (Geometrie, Lage, Anzahl) entwickelt. Der Zuschnitt der flächigen SMC-Ausgangsmaterialien erfolgt per Cutter am DLR, Vorversuche dazu sind mittels Testgeometrie erfolgt.



Abbildung 14: Testgeometrie zur Absicherung der Schneidfähigkeit des eingesetzten SMC-Halbzeugs am zu verwendenden Cutter am DLR in Augsburg

Vorpack-Gewicht		IST (Case 1)	IST (Case 2)	SOLL
unten	Lage 01	0,770		
	Lage 02	0,458		
	Lage 03	0,060		
	Lage 11	0,009		
Patch unten links	Lage 12	0,019		
Patch unten rechts	SUM	1,316		1,236
A-Säule unten	Lage 04	0,145		
	Lage 05	0,062		
	SUM	0,207		0,230
A-Säule oben	Lage 06	0,096		
	Lage 07	0,032		
	Lage 10 (50%)	0,020		
	SUM	0,148		0,128
B-Säule	Lage 08	0,174		
	Lage 09	0,108		
	Lage 10 (50%)	0,020		
	SUM	0,302		0,301
Patch oben rechts	Lage 10	0,039		
		Summe SOLL		1,894

Abbildung 15: Geometrie (links) und gewichtstechnische Zusammensetzung des Vorpacks für eine Hubschraubertür-Innenschale

Der Zuschnitt erfolgte nach dem Auftauen am DLR Cutterzentrum, Zwischenlagerung in einem Digestorium.



Abbildung 16: Cutter-Zentrum am DLR in Augsburg (links), Vorpack für ein Bauteil im Digestorium

Vorpack-Varianten

Der Prozess und das Material für die Hubschraubertür-Innenschale erfordert einen genauen Vorpack-Zuschnitt und dessen exakte Positionierung auf einem Ablagetisch. Dafür wurde eine Laserprojektion in Betrieb genommen, mit Hilfe transferierter und exportierter Daten aus dem Vorpack-CAD.

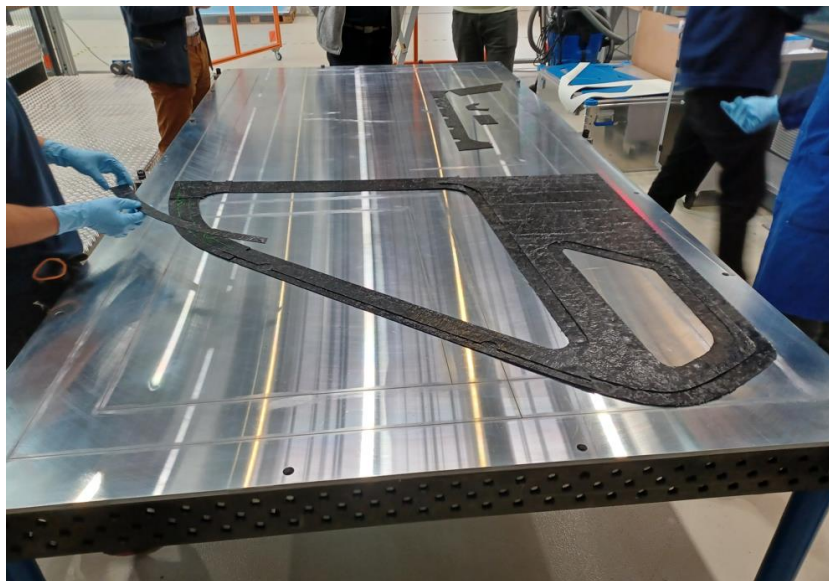


Abbildung 17: Laserprojektionsgestützte Positionierung der Vorpack-Einzelteile auf dem Ablagetisch

Angepasst wurde der Vorpack mehrfach:

- Verlagerung der ergänzenden Lagen zu den Grundlagen im Randbereich, anstatt, wie zunächst, im mittleren Bereich (vgl. *Abbildung 18*). So sollten die Fließweglängen weiter reduziert werden.



Abbildung 18: Anpassung der oberen Lagen von mittig (links, Lytex) nach außen (rechts, HexMC)

- Zunächst lokal konzentriertere Positionierung der Pressmasse im Bereich des unteren Türscharniers, wegen unzureichender Füllung



Abbildung 19: Vorpäck im Bereich des Türscharniers, mit sechs großen Lagen (links) und später mit 18 entsprechend kleineren Lagen (rechts), beides bei gleicher Masse

- Ersetzen des Vorpäck-Materials im Bereich des kritischen unteren Türscharniers und Ersatz durch 3D-gedrucktes PEI-Bauteil. Das 3DDruck Bauteil wurde unmittelbar vor dem Pressprozess in der offenen Werkzeugkavität eingesetzt. Durch den chemischen

Anbindungsprozess von Epoxid an amorphe Thermoplaste konnte hiermit eine augenscheinlich feste Hybrid-Anbindung gezeigt werden.



Abbildung 20: 3D-Bauteil (links) bildet die Türscharnier-Aufnahme ab, bei starker Anbindung an das SMC-Material (rechts)

- Letztlich wurde das Gewichtsverteilungskonzept aufgrund der Abweichungen beim Flächengewicht der Halbzeuge nochmal neu aufgesetzt, indem bei der Vorpackplanung das Bauteil in 15 Bereiche eingeteilt wurde und die Schwankungen beim Aufbau lokal genauer kompensiert werden.



Abbildung 21: Vorpackkonzept mit 15 Grundlagenbereichen, stoßartig aneinander geordnet, für exaktere lokale Gewichtsverteilung, hier aus Polynth Material

- Zugabe von 10% bis 20% des Zielgewichts, um ein zwar dickeres, aber dafür im höheren Grad gefülltes Bauteil zu ermöglichen

Vorpack-Transfer

Das Handling des Vorpacks erfolgt mit einem extra für diesen Zweck entwickelten, robotergeführten Werkzeug, welches mit Sauggreifern den exakt zugeschnittenen und per Laserprojektion positionierten Vorpack aufnimmt und definiert im geöffneten Presswerkzeug platziert.

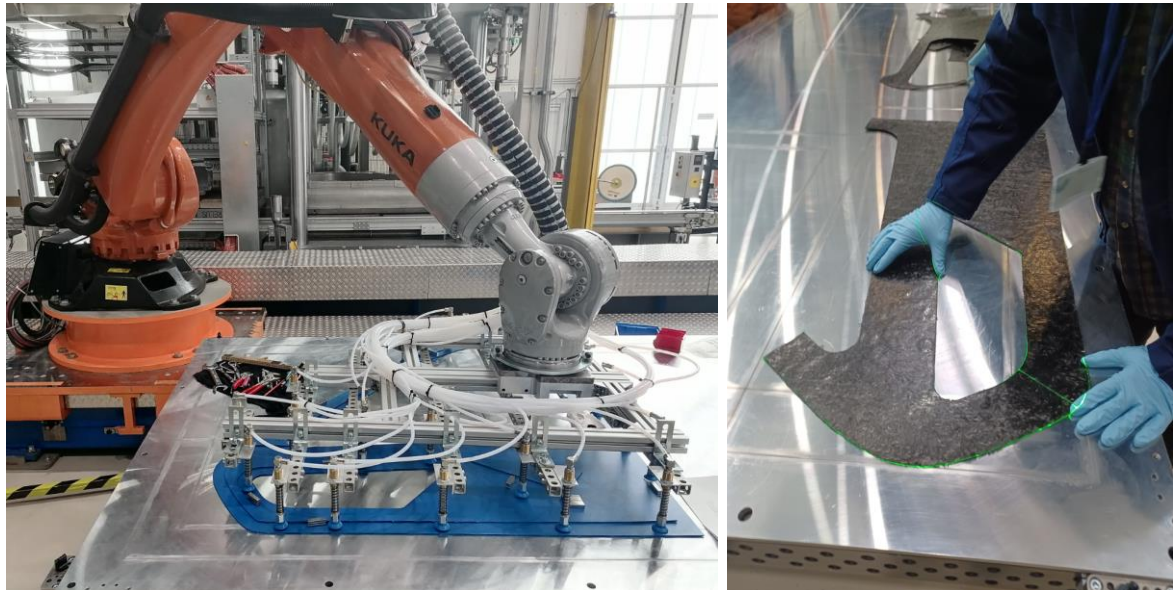


Abbildung 22: Automatisiertes Vorpack-Handling mit Sauggreifer-Endeffektor (links) und Laserprojektion zur Positionierung (rechts)

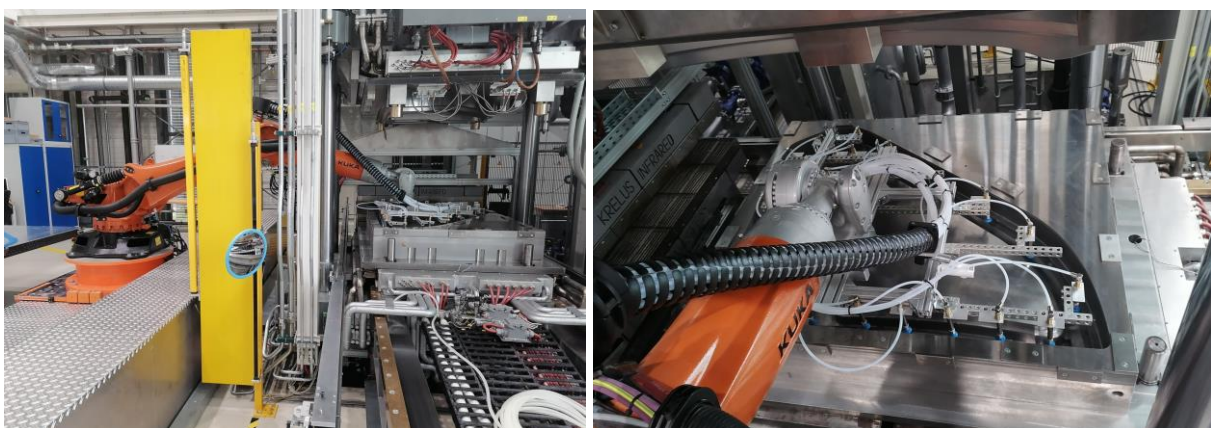


Abbildung 23: Vorpack-Transfer in die Presse per Endeffektor

Eine Studie zur Greifer-Halbzeug-Kombination wurde durchgeführt, um das Anheben und Transferieren des Vorpacks vom Aufnahmetisch in das Pressenwerkzeug sicherzustellen.

Ein vollständiger Bericht wurde erstellt und steht für zukünftige Anwendungsfälle zur Verfügung.

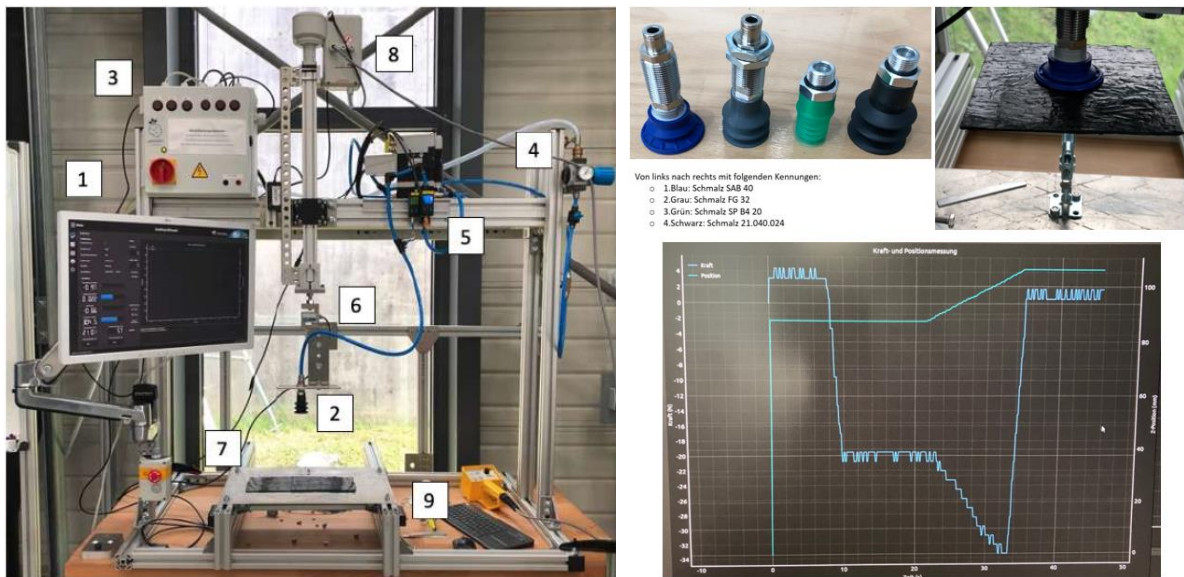


Abbildung 24: Wirkflächenprüfstand mit Monitoring (1), Sauger (2), Proben­tisch (7) und Kraftmessung (6) zur Auswahl geeigneter Greifersysteme (links), Saugertypen (oben) und exemplarische Kraft-Weg-Messkurve

Kamerasysteme ermöglichen die online-Überwachung der korrekten Materialablage im geöffneten Werkzeug, um ein Schließen beim fehlerhaften Ablegen durch Prozessstopp zu vermeiden. Die Tauchkanten des Werkzeugs sollten nicht mit dem Vorpack belegt sein, da das rausragende Material sonst abgeschert wird und nicht Teil des Bauteils wäre. Die Bilddokumentation kann außerdem gesichert werden, um später den Herstellprozess nachvollziehbarer zu machen.



Abbildung 25: Auszug aus der Kameraüberwachung des Endeffektors, Kamera im Fensterbereich (oben) und im unteren Türbereich (unten)

SMC-Pressen von Hubschraubertür-Innenschalen

Es erfolgten Pressversuche zur Herstellung der Hubschraubertür-Innenschale mit unterschiedlichen Materialien und der beschriebenen Prozesstechnik.

LyondellBasell

Vorab wurden am Presswerkzeug Anschlagplatten, die die minimale Bauteildicke vorgeben, angepasst. Pressversuche validierten die Anpassung.

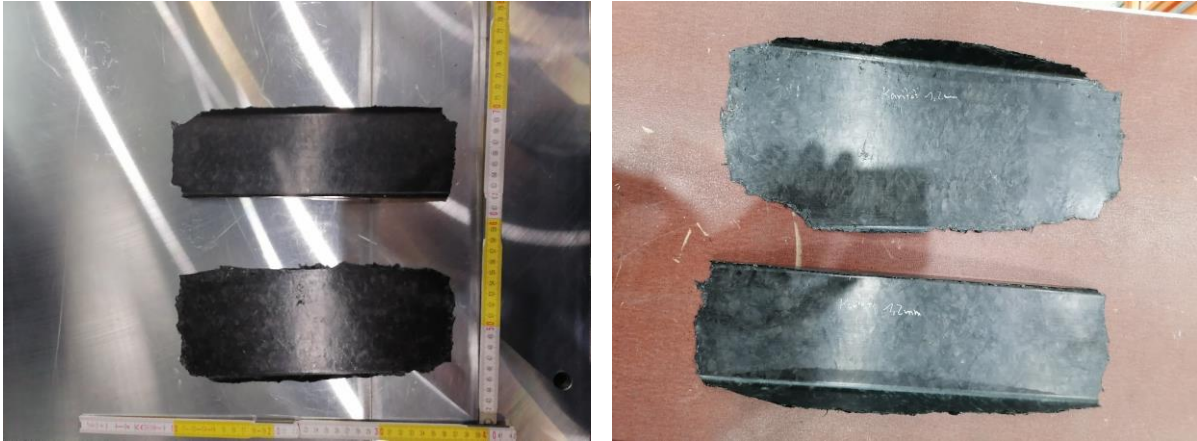


Abbildung 26: lokale SMC Einleger zum Prüfen der Werkzeugkavitat-Dicke, zunächst 1,8mm (links), nach der Anpassung 1,2mm gemäß Zieldicke

Die ersten Innenschalen wurden noch Ende 2023 mit LyondellBasell SMC Material Lytex 41549 BK hergestellt (140°C WZ-Temperatur, 75bar Pressdruck, Protokolle enthalten alle Details).



Abbildung 27: Bauteil nach ersten SMC-Pressversuchen am DLR in Augsburg, aus LyondellBasell SMC Material

In 2024 wurden weitere Türinnenschalen aus dem LyondellBasell SMC Material gepresst. *Abbildung 28* zeigt das beste Ergebnis mit dem Lytex Material.



Abbildung 28: Bestes Ergebnis mit Lytex Material (Tür #14) mit Fehlstellen an den Fließwegen, lokal faserangereicherten Stellen und 0,2 bis 0,4mm zu hoher Wandstärke

Hexcel

In 2024 wurden weitere Türinnenschalen aus dem Material Hexcel HexMC AS4 1900 8552R gepresst und der Prozess weiter optimiert. Dieses Material erfordert ein vorgeschaltetes Wärmebehandeln, um zum einen das passende Fließverhalten zu erzeugen, zum anderen einen verkürzten Pressprozess zu ermöglichen.

Die Wärmevorbehandlung des Vorpacks erfolgte zunächst im Ofen, wurde dann aber in den Pressprozess integriert. Dabei wird der Vorpack ohne Druckaufbringung im fast geschlossenen, ohnehin bei Zieltemperatur befindlichen Werkzeug für eine definierte Zeit getempert. Dabei macht man sich den Nebeneffekt zunutze, dass das Material dann im sicher durchgewärmten Zustand verpresst wird. Dies reduziert die Viskosität im Material und lässt eine erhöhte Fließweglänge erhoffen. Alle weiteren Parameter entsprechen etwa denen vom Lytex Material, Prozessdetails in den zur Verfügung stehenden Protokollen.

Vorversuche auf Plattenbasis sind dazu am IGCV erfolgt. Die Vorheizzeit orientiert sich an der Menge des Reinharzes, welches über die Tauchkante austritt und gewichtsmäßig zugeordnet werden muss. Dabei gibt es einen zu erreichenden Richtwert.



Abbildung 29: Pressplatte mit abzuwiegendem Harzaustritt [FhG IGCV, Augsburg]

Die Pressparameter waren weitgehend vergleichbar mit denen von LyondellBasell, die Werkzeugtemperatur lag jedoch bei 180°C. Das zusätzliche Wärmebehandeln wurde bei gleicher Temperatur, und nach Vorversuchen für 6min durchgeführt.



Abbildung 30: Bestes Ergebnis mit Hexcel (Tür #12) mit Fehlstellen an den Fließweg-Enden, lokal faserangereicherten Stellen und bis 0,2mm zu hoher Wandstärke

Polyth

Als drittes Material wurde das Automotive-etablierte SMCarbon 24 CF60-12K eingesetzt. Verarbeitungsparameter waren hier wieder vergleichbar, Details aus den Protokollen entnehmbar. Die Werkzeugtemperatur lag wieder bei 140°C, der Druck bei 75bar, eine Vorbehandlung ist hier nicht vorgesehen. Die Verarbeitbarkeit erwies sich aber als bestenfalls gleich schwierig, bei gegebener Bauteilgeometrie, wie bei den zwei anderen Materialien.



Abbildung 31: Bestes Ergebnis mit Polyth (Tür #22) mit Fehlstellen an den Fließweg-Enden, lokal faserangereicherten Stellen und bis 0,2mm zu hoher Wandstärke

Zusammenfassend kann für die verwendeten Materialien festgehalten werden:

- Stark ausgeprägte Dreidimensionalität ist problemlos herstellbar, auch aus einem 2D-Vorpack
- Die gesamte Prozesskette ist wiederholbar abbildbar
- Erkenntnisse zum Zusammenspiel von Vorpackdesign und Pressbauteil konnten gewonnen werden. Besonders der Umgang mit Materialschwankungen
- Der Einsatz eines Materials, welches ein thermisches Vorbehandeln erfordert, bietet das Potential, die Vorbehandlung in den Pressprozess zu integrieren, wobei ein Durchwärmen des Materials als positiver Nebeneffekt Nutzen beim Fließen bringt.
- Bei vorliegendem Werkzeug und anhand Empfehlungen und Erfahrungen erarbeiteter Prozessführung ist die Herstellung eines fehlerfreien Bauteils nicht möglich

- Die Fließweglängen sind mit dem Vorpackkonzept nicht abbildbar. Ein 3D-Vorpack könnte hier für eine Reduktion der Fließweglänge sorgen, basiert aber dann auf einem völlig neuartigen Konzept
- Die geringen Wandstärken von 1,2mm sind mit dem verarbeiteten Material an der Grenze der Herstellbarkeit, da sich zum einen vermutlich lokal pressbedingte Entmischung von Faser und Matrix ergeben und daraus ein zum Erliegen kommen des Fließens resultiert. Zum andern sind die SMC-Halbzeuge aus den Tape-Schnipseln recht großformatig, dass in den dünnwandigen Bereichen im Extremfall Orientierungen der Fasern in kaum mehr als eine Richtung ergeben können.
- Komplexe Geometrien, die lange Fließwege erfordern, in diesem Bauteil die Anbindung der Türscharniere, alternativ Verrippungen, sind schwerlich abbildbar.

Thermomechanische Analysen von SMC

Mit der Universität Augsburg konnte im Unterauftrag das thermomechanische Verhalten des SMC-Werkstoffs, in Abhängigkeit mit den Prozessbedingungen beleuchtet und diskutiert werden. Der ausführliche Bericht liegt vor und wurde dem Konsortium vorgestellt und zur Verfügung gestellt. Es hat sich dadurch herausgestellt, dass besonders das Materialverhalten beim SMC-Pressen von Bedeutung ist, weshalb eine weitere Vertiefung zur Prozessfindung sinnvoll ist. Die Simulation des SMC-Prozesses zur Bauteil- und Werkzeugauslegung erscheint für zukünftige Aktivitäten in dem Bereich als unumgängliche Vorgehensweise.

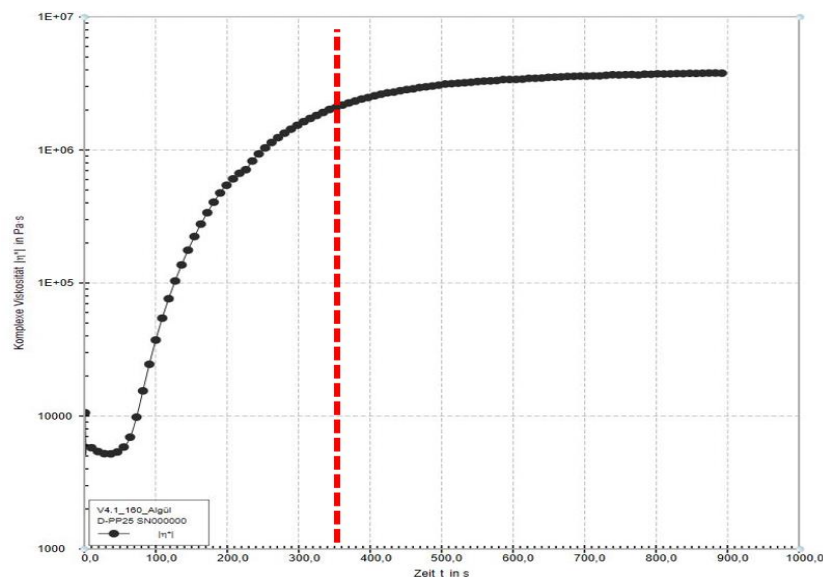


Abbildung 32: Viskosität des SMC-Materials bei Temperaturen und zeitlichen Bedingungen analog zum Pressprozess [Uni Augsburg]

Dem Konsortium zur Verfügung gestellte Daten im Projekt

- Technischer Input: Schweißen von Laminaten
- Tabellarische Zusammenfassung der Prozessrouten aller Bauweisen
- Technische Datenblätter der verwendeten Materialien

- Ergebniszusammenfassung Materialanalyse der Universität Augsburg
- Protokoll zur Studie der Greiferauslegung
- Protokolle, Daten und Bilder zu allen SMC-Versuchen mit Plattenwerkzeug
- Protokolle, Daten und Bilder zu allen SMC-Versuchen mit Türenwerkzeug

Die Daten werden über den gemeinsamen Austauschserver zur Verfügung gestellt und können von allen Projektpartnern gesichert werden. Die Verwendung obliegt der Regelungen im Kooperationsvertrag, weitere Verwendung ist mit dem DLR abzustimmen.

DLR-intern wird die Datenspeicherung und Verfügbarmachung über die standardmäßig verwendeten Server sichergestellt.

Wichtigste Positionen der Projektfinanzierung

Es sind insgesamt Kosten in Höhe von 446.459,- Euro entstanden, die Vorkalkulation sah Kosten in Höhe von 447.200,- Euro vor. Im Verbundprojekt LIGHT konnte das DLR mit den zur Verfügung stehenden Mitteln die Ziele der im Konsortium festgelegten Ausrichtungen erreichen.

Es wurde eine Mittelumwidmung in Höhe von 15.000,- Euro, von Personalmitteln (11.000,- Euro) und Reisemitteln (4.000,- Euro) für eine Unterbeauftragung der Universität Augsburg, AMU Anwenderzentrum Material- und Umweltforschung, beantragt und zugelassen: Es sollte eine materialwissenschaftliche Studie zum Aushärteverhalten von kurzfaserverstärkter Epoxidharzmatrix im Unterauftrag erfolgen. Das Erfordernis hat sich erst im Projektverlauf durch die Bewertung der potentiellen Materialien und Verarbeitungsprozesse ergeben. So zeigt sich der neuartige Anwendungsfall von Kohlefaser-SMC (Sheet Moulding Compounds) für sehr dünnwandige Bauteile als vielversprechend, aber prozessseitig als entwicklungsbedürftig. Um das Materialverhalten beim Verarbeitungsprozess zu verstehen und ein optimales Prozessfenster auf Grundlage thermomechanischer Materialkennwerte definieren zu können, bedarf es dieser externen Unterstützung. Dadurch kann der Verarbeitungsprozess zielgerichteter und wissenschaftlich fundiert ausgerichtet werden. Die gesteigerten Erkenntnisgewinne zum Materialverhalten stellten einen großen Mehrwert dar.

Es wurde eine kostenneutrale Verlängerung beantragt und bewilligt: Dauer der Verlängerung waren 6 Monate, entsprechende Verschiebung vom Projektende vom 31.12.2023 auf den 30.06.2024. Im Konsortium wurden die anstehenden Arbeiten bis zum geänderten Projektabschluss detailliert zusammengetragen. Es wurde erklärt, dass sich die inhaltliche Entwicklung des Projekts auf den ausgesprochen anwendungsrelevanten SMC-Prozess fokussiert, was Abhängigkeiten von dem zu verarbeitenden Material und dem erforderlichen Presswerkzeug mit sich gebracht hat. Um die Inhalte gewinnbringend für alle Partner abschließen zu können, waren die weiteren sechs Monate Laufzeit zwingend erforderlich. Im Rahmen der ursprünglichen Laufzeit hätten die wichtigen Ziele, wie die Darstellung der Wiederholbarkeit des Prozesses und die Analyse der SMC-Bauteil-Eigenschaften nicht zufriedenstellend abgebildet werden können. Mit den verfügbaren Mitteln konnte trotz der sich ergebenden Umstände bis zum Erreichen der Projektziele gehaushaltet werden.

Veröffentlichungen

Forschungsbericht:

- elib – electronic library des DLR, zugänglich für alle DLR-Mitarbeiter

Konferenzbeitrag:

- Jarka, Stefan et al.: Fügen von Thermoplast-Duroplast-Hybriden mit funktionsintegrativer Versiegelung. DLRK DEUTSCHER LUFT- UND RAUMFAHRTKONGRESS 2023, 19.-21.09.2023, Stuttgart, Deutschland.

Abschlussarbeiten:

- Analysen zur SMC-Simulation, geplant für das Sommer- und Wintersemester 2024/2025, gemeinsam mit Prof. Nils Meyer, Universität Augsburg, MRM

Einbindung in die Lehre:

- Prof Dr.-Ing. M. Kupke: Faserverbundkunststoffe für Ingenieure (Uni Augsburg), Eingebundene Inhalte aus HoTStufF: praktische Anwendungsfälle für Flugzeugstrukturen
- Dr.-Ing. S. Jarka – Fügetechnik für Faserverbundkunststoffe, Eingebundene Inhalte aus HoTStufF: Schweißtechnologien, Presstechnologien, Qualitätskriterien von Laminatfügungen, Luftfahrt-Anwendungen

Die Veröffentlichung der im Projekt erreichten Ziele in einem Fachartikel ist noch vorgesehen. Inhalte dafür liefern die SMC-Versuche mit der Neuheit der geringen Wandstärke, kombiniert mit doppelt gekrümmten Strukturen, dessen Machbarkeit und evtl. Materialkennwerte (Input Projektpartner UniBW erforderlich), Fügungen der SMC-Halbzeuge per FIDJ-Prozess, inkl. dessen Verbindungseigenschaften, sowie die Abbildung der Gesamtprozesskette des Anwendungsfalls.

2.2 Beitrag zu förderpolitischen Zielen

Für die Steigerung der Leistungsfähigkeit der Luftfahrt ist ein schnelleres und effizienteres Umsetzen von neuen technischen Konzepten im Rahmen von Hubschrauber-Kleinserien, aber auch Bauteilen mit zukünftig erwartbaren größeren Stückzahlen (Stichwort eVTOL) inklusive deren komplettierender Strukturelemente (wie etwa der Hubschraubertür) notwendig. Die Arbeiten in LIGHT-DLR dienen daher dem förderpolitischen Ziel 3; „Leistungsfähige und effiziente Luftfahrt“ und der LuFo-Fachdisziplin „Strukturen und Bauweisen“.

Besonders die Fokussierung auf die SMC-Fertigung macht eine Struktur-Herstellung am hochpreisigen Produktionsstandort Bayern für die Zukunft weiterhin realistisch. Mit der SMC- Presstechnologie und den damit automatisiert herstellbaren, hochfunktionellen Bauteilanwendungen können gesteigerte Raten bei geringerem Personalaufwand mit hoher Qualität produziert werden. Die mögliche Funktionenintegration macht es unabdingbar, alle Fertigungsschritte parallel zu betrachten. Denn die Integration einer Baugruppe in die Gesamtstruktur, die Ausrüstung einer Komponente mit Anbauteilen und die Abbildung

weiterer Funktionen über die Bauteilstruktur hinaus erfordert zwingend von Anfang an eine Abstimmung mit allen beteiligten Schnittstellen.

Den gesamtheitlichen Ansatz unter Berücksichtigung der gesamten Prozesskette konnte das DLR gemeinsam mit dem Konsortium abbilden. In enger Zusammenarbeit der Projektpartner konnte der neuartige Ansatz zur Entwicklung und Herstellung einer Hubschraubertür dargestellt und für eine industrielle Umsetzung bewertet werden. Eine durchgängige Herstellprozesskette als Verknüpfung der Einzelteilerfertigung, der Fügeverfahren und Funktionsintegration wurde konzipiert.

2.3 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit

Im Projekt LIGHT sind Technologien entwickelt und analysiert worden, die in der Wissenschaft und der wirtschaftlichen Anwendung, bei direkter Umsetzung oder perspektivisch für anschließende Arbeiten, großes Potential haben.

2.3.1 Erfindungen und Schutzrechtsanmeldungen

Das das Projekt mit der Herstellung einer Türstruktur sehr anwendungsnah ausgerichtet war, wurden keine Erfindungen und Schutzrechtsanmeldungen realisiert. Vielmehr lag der Fokus auf der Befähigung des Konsortiums, eine in anderen Branchen, z.B. Automotive, bereits etablierte Fertigungsmethode auf die Luftfahrtrelevanten Anforderungen bzgl. Material und Strukturdesign, zu übertragen.

Bei weiterer Verfolgung der Thematik des SMC-Pressens wird es seitens der Industrie voraussichtlich zu einem Materialeinsatz kommen, bei dem der Lieferant spezielle Luftfahrtzulassungen erfüllen muss. Dies geht aber über den Zeithorizont des Projekts hinaus.

Es ist denkbar, dass bei der Fertigung von Strukturkomponenten per SMC-Prozess, die zuvor z.B. aus Metall gefräst wurden, vom Hersteller ein Gebrauchsmusterschutz erfolgt. Auch dies geht über den Projekthorizont hinweg.

2.3.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Da das SMC-Pressen bereits in vielen weiteren Industriebereichen zum Einsatz kommt und an zahlreichen Stellen in der Luftfahrtindustrie und in mehreren aktuell laufenden Projekten weiterverfolgt wird (z.B. LuFo NATURE), ist die Hürde für die Akzeptanz dieser klassisch betrachtet neuartigen Technologie zwischenzeitlich geringer geworden und aufgrund der zahlreichen denkbaren Anwendungsfelder und der sich verändernden Produktionsmengen (Stichwort eVTOL) naheliegend.

Die erreichten Erkenntnisse und Technologiereifen ermöglichen den frühzeitigeren Einsatz in der Produktion, da Produktentwicklungen zielgerichteter und schneller erfolgen können. Bei der Entscheidung für eine Fertigungstechnologie kann auf die Expertise aus dem Projekt zurückgegriffen werden. Durch die Skalierbarkeit der Technologien (Press- und Fügeverfahren betreffend) ist die Hürde für einen zeitnahen industriellen Einsatz in anderen Komponenten als der Hubschraubertür realistisch.

Der Konsortialführer Airbus Helicopters nutzt das aufgebaute Knowhow bereits, um potentielle Bauteile und dessen SMC-Fertigbarkeit zu identifizieren, zu bewerten und weiterzuverfolgen. So z.B. bei Airbus Helicopters im Projekt NATURE, gemeinsam mit dem DLR.

2.3.3 Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten

Die erreichten Ergebnisse des Projekts, das aufgebaute Knowhow, konkret die Erfahrungen in der Türauslegung und Fertigung in SMC-Technologie, und im allgemeinen das gesteigerte Knowhow in der SMC-Technologie und nicht zuletzt die durch all das nun praktisch gesetzte Beteiligung des DLR bei weiteren FuE-Aktivitäten der Industrie in den beschriebenen Themenfeldern sind ein wichtiger Mehrwert des betriebenen Aufwand.

Der wissenschaftliche Transfer in Form von Veröffentlichungen, universitären Abschlussarbeiten, der Einbindung in die Lehre, Ausbildung von Studenten während Ihrer Tätigkeiten im Institut trägt in erheblichem Maße zum wissenschaftlichen Erfolg bei. Mit dem aufgebauten Knowhow wird letztlich die Chance auf eine technische Umsetzung maßgeblich gefördert.

Es wird erwartet, dass weiterhin deutliche Steigerungen der Technologiereifen erreicht werden und der Wissensstand sowie die hergestellten Beziehungen zu den beteiligten Projektpartnern zu noch anwendungsnäher ausgerichteten Projektarbeiten führt.

2.3.4 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Die Betrachtung neuartiger Konzepte für Flugzeugstrukturen bildet eine Basis für die anstehenden Weiterentwicklungen, etwa im Themenfeld der elektrischen, urban einzusetzenden Luftfahrzeuge in größeren Stückzahlen, der Einbindung von Wasserstofftanks in die Struktur oder die hybride Strukturbaueise.

Der erreichte Stand der Wissenschaft im Bereich der Bauteilherstellung und -fügungen eröffnet dem DLR die Möglichkeit, an den folgenden, sehr aktuellen Forschungsthemen, eng gekoppelt mit den potentiellen Anwendern aus der Industrie weiterzuarbeiten.

Der in LIGHT erarbeitete Kenntnisstand kann etwa in den Projekten NATUR (LuFo6.3/LuFoKlima, Flugzeugrumpf mit SMC-Fensterrahmen) und NATURE (LuFo6.3/LuFoKlima, Nachhaltigkeit bei Hubschrauber-Strukturen) genutzt und ausgebaut werden.

Die nächsten innovatorischen Schritte ergeben sich aus den konkreten Anwendungsfällen im LIGHT-Projekt sowie in den laufenden Projekten mit SMC-Fokus. So ist ein vertieftes Prozessverständnis durch simulative Betrachtung des Materialerhaltens und letztlich der Bauteilherstellung angestrebt, speziell im genannten Projekt NATURE. Weiterhin ist ein Fokus auf der nachgeschalteten Fügetechnik von SMC-Bauteilen, durch eine in den SMC-Prozess integrierte Funktionalisierung der Fügekontaktstelle und ein dadurch mögliches thermoplastisches Schweißen (Projekt NATUR).

Weiter im Fokus sollten die Prozessdatenerfassung und Qualitätssicherung über den Prozess, bei gesteigerter Automation stehen, um der anstehenden höheren Ratenfähigkeit in der Produktion gerecht zu werden.

Durch die erreichte, sehr gute Vernetzung zu Airbus Helicopters und den weiteren Partnern im Projekt kann die Weiterentwicklung der industriellen Prozesse für eine praktische Anwendung effizient unterstützt werden.

2.4 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Der Fortschritt wurde ständig beobachtet und durch den Austausch über das Konsortium hinaus konnten Erkenntnisse genutzt und Ausrichtungen der Arbeiten erfolgen. Im Laufe des Projekts haben die SMC-Technologien ein sehr großes Interesse in der Forschungs- und Industrielandschaft des Luft- und Raumfahrtsektors gefunden. So lassen die SMC-Prozesse und deren Potentiale bei Luftfahrtanwendungen viele Aktivitäten in der anwendungsnahen Forschung und Entwicklung erkennen.

Die regelmäßigen Recherchen, die Teilnahmen der beteiligten Mitarbeiter an internationalen Konferenzen (z.B. SAMPE, ECCM, ITHEC, DLRK, AJP), die Netzwerkaktivitäten in den betroffenen Themenfeldern und die wissenschaftlichen Recherchen, etwa bei Abschlussarbeiten, zeigen aber keine Hinweise auf Ergebnisse von dritter Seite, die für die Arbeiten im Projekt nachteilig sind oder die Ausrichtung der Arbeiten im Projekt in Frage stellen würden.

Der wissenschaftliche Fortschritt zu den behandelten Themen wurde berücksichtigt. Dies erfolgt auch durch den Wissensaustausch zwischen Kollegen aus themenverwandten Projekten.