

## Schlussbericht

Zuwendungsempfänger: <b>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.</b>	Förderkennzeichen: <b>20H1309C</b>
Vorhabenbezeichnung: <b>Integrierte Gesamt-Prozesskette für Hubschrauber-Oberdeckstrukturen (IPrO)</b>	
Laufzeit des Vorhabens: <b>01.01.2014 – 31.12.2017</b>	
Berichtszeitraum: <b>01.01.2014 – 31.12.2017</b>	Erstellt am: <b>22.06.2018</b>

Augsburg, den 22.06.2018

Andreas Buchheim  
Projektleiter IPrO

Dominik Deden  
Philipp Gänswürger  
Florian Krebs  
Thomas Stefani

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)  
Institut für Bauweisen und Strukturtechnologie

## Inhaltsverzeichnis

I.	Kurzdarstellung.....	3
1.	Aufgabenstellung.....	3
2.	Voraussetzungen.....	4
3.	Planung und Ablauf .....	5
4.	Wissenschaftlicher und technischer Stand bei Vorhabensbeginn .....	6
5.	Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	7
II.	Eingehende Darstellung .....	9
1.	Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse .....	9
2.	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	10
3.	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	10
4.	Voraussichtlicher Nutzen.....	11
5.	Fortschritt bei anderen Stellen im Themengebiet des Vorhabens .....	12
6.	Veröffentlichungen.....	12

## I. Kurzdarstellung

Ein Hauptansatzpunkt bei der Entwicklung neuer Hubschrauberprogramme ist die Gewichtsreduktion des Gesamtsystems. Getrieben wird diese Vorgabe durch das Ziel, Leistungsverbesserungen zu Vorgängermodellen und Produkten von Wettbewerbern zu erreichen. Steigende Anforderungen an das Zellengewicht resultieren auch aus der erforderlichen Reduktion des Leistungsbedarfs, die für die Umsetzung von zukünftigen hybriden Antriebskonzepten (Kombination von Turbotriebwerk und Elektromotor) oder reinem elektrischen Antrieb notwendig ist. Dabei ist die Senkung des Strukturgewichts in den meisten Fällen mit einer Kostensteigerung verbunden, die durch den Einsatz von Leichtbauwerkstoffen und den damit verbundenen höheren Material- und Fertigungskosten verursacht werden. Letztere basieren bei der Herstellung von Strukturen aus faserverstärkten Kunststoffen aktuell auf einem großen Anteil manueller Fertigungsprozessschritte. Eine Verbesserung der Kostensituation kann über den Ansatz der Automatisierung erfolgen. Die vollständige Automatisierung des Herstellprozesses ist bei kleinen Stückzahlen dabei selten die optimale Lösung, da die Kosten zur Realisierung nicht durch die erzielten Kosteneinsparungen ausgeglichen werden. Aus diesem Grund ist eine Analyse des gesamten Fertigungsprozesses erforderlich, um geeignete Prozessschritte für eine Automatisierung zu identifizieren. Eine Steigerung des Anteils automatisierter Prozessschritte stellt aber nur einen Schritt bei der Zielsetzung dar, zukünftigen Anforderungen nach wirtschaftlichen Leichtbaustrukturen aus faserverstärkten Kunststoffen zu genügen. Zusätzlich ist eine gesamtheitliche Betrachtung des Entwicklungs- und Herstellungsprozesses notwendig, bei der ausgehend von der Berücksichtigung von Systemaspekten bei der Strukturarchitektur auch die Möglichkeiten einer durchgängig validierten Prozesskette vom Halbzeug bis zur finalen Prüfung des fertiggestellten Bauteils genutzt werden. Dieser Ansatz wurde im Vorhaben IPrO – Integrierte Gesamt-Prozesskette für Hubschrauber-Oberdeckstrukturen – umgesetzt.

### 1. Aufgabenstellung

Das übergeordnete Ziel aller im Vorhaben beteiligter Partner war das Aufzeigen von Methoden zur Kosten- und Gewichtsreduktion bei der Herstellung von Bauteilen aus carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK). Dies sollte realisiert werden durch den Einsatz von innovativen Architekturkonzepten, der Automatisierung von Prozessschritten sowie der Entwicklung und Optimierung von Materialien und Verfahren entlang der gesamten Prozesskette. Dabei wurde eine hohe Prozessreife angestrebt, die u.a. eine dauerhafte Reproduzierbarkeit für den industriellen Einsatz gewährleistet. Um die Übertragbarkeit der entwickelten Ansätze zu gewährleisten, wurde als Zielbaugruppe eine zentrale Struktur eines Hubschraubers definiert. Zu Beginn des Vorhabens basierten die Arbeiten auf der Entwicklung einer Oberdeckstruktur einer Hubschrauberzelle. Im Vorhabensverlauf erfolgte eine Anpassung auf die Entwicklung eines Integrierten Stators für den Heckrotor.

Basierend auf dem ganzheitlichen, multidisziplinären Ansatz konnten vier technische Arbeitspakete abgrenzt werden. Diese sind in Abbildung 1 dargestellt. Die Arbeiten des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) im Vorhaben sind in den Arbeitspaketen AP3100, AP3200 und AP4300 angesiedelt. Die Aufgabenstellungen in den Arbeitspaketen waren dabei wie folgt:

#### AP3100 – Analyse heutiger Prozesse

In einer Analysephase sollte der Stand der Technik beim automatisierten Preforming von Faserhalbzeugen in der Produktion von Hubschrauberstrukturen erfasst werden. Dazu sollten eine Auswahl von Prozessvarianten für die Preforming-Prozessschritte Handhabung (Aufnahme, Transport und Ablage von Zuschnitten), Drapierung auf formgebende Werkzeugform und Aktivierung des Binders zur Fixierung der Preform mit verschiedenen für die Herstellung der Zielbaugruppe in Frage kommenden trockenen Fasertextilien untersucht werden. Die Untersuchung sollte auch den sogenannten Pick-Drape-Activate (PDA) Endeffektor einschließen. Mit diesem im Vorhaben INSTRUKT entwickelten Prototyp können alle betrachteten Prozessschritte mit einem Werkzeug ausgeführt werden. Auf Basis dieser Untersuchung sollte eine Bewertung erfolgen, welche Prozess- und Anlagenvarianten sich für die Anwendung bei der

Zielbaugruppe eignen und welche Anpassungen und Optimierungen für den automatisierten Einsatz in der industriellen Produktion notwendig sind.

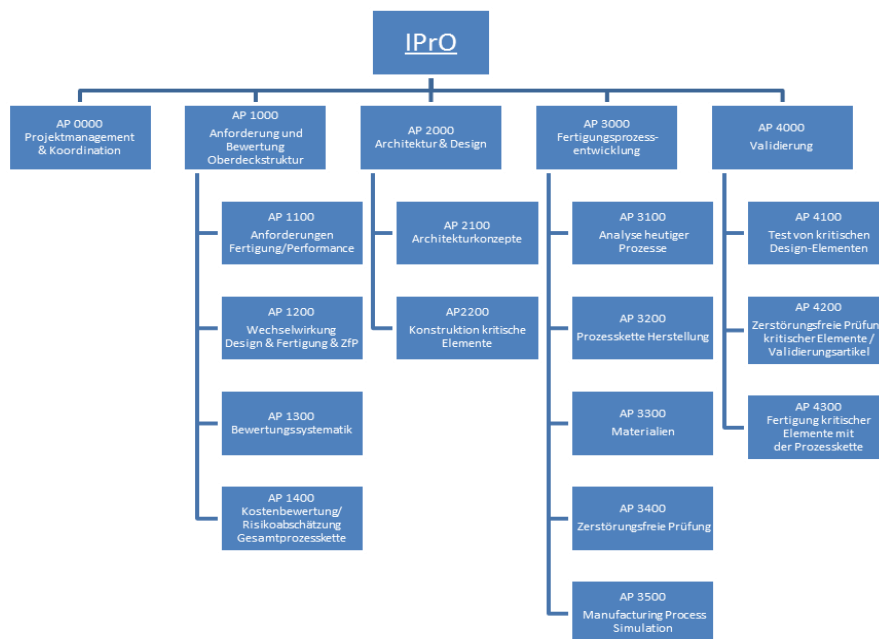


Abbildung 1: Arbeitspaketstruktur

#### AP3200 – Prozesskette Herstellung

Abhängig vom Ergebnis der in AP3100 erstellten Evaluation bestanden zwei Szenarien mit unterschiedlichen Schwerpunktsetzungen für die Folgearbeiten in AP3200. In Szenario 1 sollte der PDA-Endeffektor zu einem höheren Technologiereifegrad weiterentwickelt werden, um einen industriellen Einsatz zu ermöglichen. Dazu sollte u.a. eine Software zur Offlineprogrammierung der Bewegungstrajektorien (Aufnehmen, Ablegen und Drapieren auf doppeltgekrümmten Flächen) und Ansteuerung der integrierten Prozessfunktionen entwickelt werden. In Szenario 2 sollte die Entwicklung und Fertigung eines Systems für die (teil-)automatisierte Durchführung der Prozessschritte Handhabung, Drapierung und Binderaktivierung für ein Bauteil der Zielbaugruppe erfolgen.

#### AP4300 – Fertigung kritischer Elemente mit der Prozesskette

Die entwickelte Software (Szenario 1) bzw. Hardware (Szenario 2) sollte experimentell mit exemplarischen Zuschnitten eines Bauteils der Zielbaugruppe getestet und die prinzipielle industrielle Einsatzfähigkeit nachgewiesen werden. Darüber hinaus sollten allgemeine und bauteilspezifische Prozessparameter bestimmt und optimiert werden.

## 2. Voraussetzungen

Das Institut für Bauweisen und Strukturtechnologie (BT) des DLR verfügt über lange Erfahrung im Bereich der Faserverbundwerkstoffe. Das Spektrum reicht von der Auslegung der Bauteile, der Entwicklung und Verbesserung von Fertigungsverfahren bis hin zur Herstellung von qualitätsgesicherten Prototypen. Dafür stehen umfangreiche Fertigungsanlagen (u.a. Heißpressen, Heitzische, Öfen, Tapeleger) und Analysetechniken (u.a. Thermographie, Computertomographie, Ultraschall, Faserwinkelmessung, Laser Tracker, Universalprüfmaschinen) zur Verfügung. Seit 1991 arbeitet das Institut auch auf dem Gebiet der Automatisierung bei der Herstellung von Faserverbundwerkstoffe. Dabei werden bauteilspezifische Fertigungsverfahren neu entwickelt und etablierte Verfahren, wie das Legen von Prepreg-Tapes und das Wickeln, z.B. für die Herstellung von Tanks, weiterentwickelt, um Ablegerate, Prozesssicherheit und -genauigkeit zu erhöhen. Mit Gründung des Zentrums für Leichtbauproduktionstechnologie (ZLP) 2009 in Augsburg als Teil von BT wurden diese Aktivitäten intensiviert. Die Zielsetzung ist dabei, durch die Umsetzung einer

Automatisierung von (Teil-)Prozessen auf Basis der Full-scale Bauteile den Reifegrad der Verfahren zu erhöhen (Zielwert: Technology Readiness Level – TRL 5-6), so dass der finanzielle und zeitliche Aufwand bis zu einem industriellen Einsatz sinkt. Hier setzten die Arbeiten des DLR im Vorhaben an. Der betrachtete Prozessschritt des Preformings weist hohe Anforderungen an die Genauigkeit auf und ist durch die meist manuelle Ausführung kostenintensiv. Durch die Erarbeitung von Ansätzen für eine (teil-)automatisierte Umsetzung kann eine Reduzierung der Fertigungskosten erreicht werden. Auf diese Weise ist die Nutzung der Vorteile einer Composite-Bauweise (u.a. Gewichtsreduktion) möglich. Die im Vorhaben erarbeiteten Lösungen sollten damit einen Beitrag zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Luftfahrtindustrie leisten.

Bei der Bearbeitung der Vorhabensinhalte konnte auf Seiten des DLR Augsburg auf eine umfangreiche Forschungsinfrastruktur mit verschiedenen Roboteranlagen als flexible Werkzeuge für die Umsetzung von Automatisierungsansätzen zurückgegriffen werden. Des Weiteren konnten das Wissen und die Erfahrungen aus verschiedenen Vorhaben genutzt werden, in denen ebenfalls die Kostenreduktion in der Faserverbundfertigung durch Prozessautomatisierung untersucht wurden.

#### Vorhaben mit thematischem Bezug (Auswahl):

- INSTRUKT:** Entwicklung einer Vorrichtung und Roboterendeffektoren für die automatisierte Montage und das Kleben einer Hubschrauberbodenstruktur  
Entwicklung des PDA-Endeffektors (IWB) für automatisiertes Preforming
- AZIMUT:** Entwicklung und Validierung von drei verschiedenen Endeffektoren für Verstärkungslagen zur Herstellung einer doppeltgekrümmten Preform (Druckkalotte)
- ROCK:** Entwicklung einer Automatisierungslösung für die Ablage von Blitzschutzmaterial auf doppelt gekrümmten Rumpfoberflächen  
Erarbeitung einer Vorrichtung für das Preforming eines Spants der Türumgebungsstruktur aus Gelege (Non-Crimp Fabric - NCF)

### **3. Planung und Ablauf**

Das Vorhaben wurde in Abstimmung mit dem Konsortialführer Airbus Helicopters (AHD), ehemals Eurocopter (ECD), geplant und schloss sich thematisch an das Vorhaben INSTRUKT an. Die dort erzielten Ergebnisse (u.a. PDA-Endeffektor) sollten im Vorhaben IPrO an einer weiteren zentralen Hubschrauberstruktur weiterentwickelt werden. Unverändertes Ziel war, die Wirtschaftlichkeit bei der Fertigung von komplexen Hubschrauberstrukturen aus Faserverbundwerkstoffen durch die Betrachtung der gesamten Prozesskette zu verbessern. Für einen möglichst breiten Ansatz bestand das Konsortium aus Partnern u.a. aus den Bereichen Material- und Verfahrensentwicklung, Fertigung, Automatisierungstechnik und Prüfmethode (siehe Abschnitt I.5.). Die Laufzeit des Vorhabens bei Antragsstellung war der Zeitraum 01.01.2014 – 31.03.2017.

Beim DLR war die Zielsetzung in AP3200 und AP4300 von der Verfahrensbewertung in AP3100 und der innerhalb des Projekts zu definierenden Zielbaugruppe abhängig. Aus diesem Grund wurden zwei Szenarien für die Folgearbeiten definiert (siehe Abschnitt I.1.). Die Ergebnisse aus AP3100, die auf der Untersuchung von zwei repräsentativen Bauteilen der Oberdeckstruktur basierten (Spantsegment und Versteifungsstruktur), bildeten die Grundlage für die Ende des ersten Quartals 2015 zusammen mit AHD getroffene Entscheidung, Szenario 2 zu verfolgen und eine Neuentwicklung für das automatisierte Preforming umzusetzen. Im weiteren Verlauf des Jahres 2015 wurde eine Änderung der Zielbaugruppe hin zur Umsetzung eines Integrierten Stators für den Heckrotor beschlossen. Diese Anpassung und die damit einhergehende höhere Komplexität der Oberflächengeometrie führte zu einem zeitlichen Mehraufwand, da u.a. die Entwicklung einer neuen Werkzeugform und zusätzliche Versuche zur Validierung der Übertragbarkeit der Ergebnisse aus AP3100 und der damit verbundenen Entscheidung für Szenario 2 notwendig wurden. Auf Grund dieser veränderten Voraussetzungen wurde eine kostenneutrale Verlängerung um 9 Monate beantragt und bewilligt, so dass das Vorhaben beim DLR am 31.12.2017 endete. In Abbildung 2 ist der Projektplan des DLR nach der Verlängerung mit den erfolgten Anpassungen graphisch dargestellt. Dieser orientierte sich am Gesamtzeitplan des Vorhabens, da die einzelnen

Arbeitspakete in zeitlicher Abhängigkeit zueinander stehen. Die Balkenlänge repräsentiert die Bearbeitungszeit und ist nicht proportional mit dem Ressourcenbedarf.

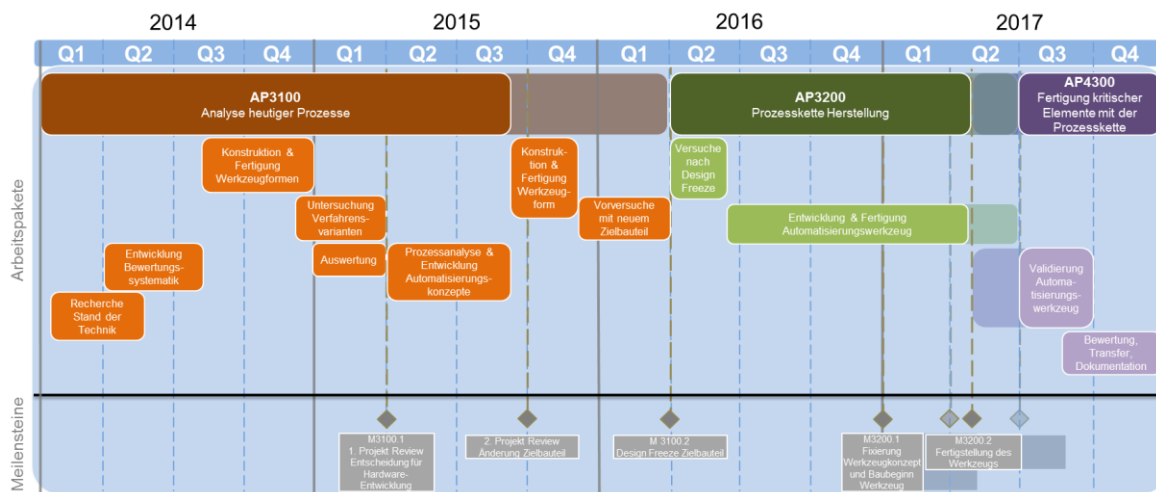


Abbildung 2: Projektplan DLR (Stand nach kostenneutraler Verlängerung)

#### 4. Wissenschaftlicher und technischer Stand bei Vorhabensbeginn

Im Bereich der Drehflügler spielt der Einsatz von Leichtbaustrukturen aus faserverstärkten Kunststoffen eine herausragende Rolle, die noch stärker ausgeprägt ist als im Flächenflug. Der Anteil am Gesamtstrukturgewicht inklusive der Rotorblätter hat bei Drehflüglern über 90% erreicht (Modell NH90). Eine weitere Reduzierung des Strukturgewichts stellt bei der Entwicklung neuer Hubschrauberprogramme eine Hauptanforderung dar, da mit diesem Ansatz der Verbrauch gesenkt bzw. die Nutzlast erhöht werden kann, so dass die Betriebskosten verringert werden. Dieser Faktor zusammen mit dem Vorteil, eine lastpfadgerechte Auslegung und Konstruktion zu ermöglichen, wird zu einem steigenden Anteil von faserverstärkten Kunststoffen führen.

Die Fertigungsprozesskette komplexer Composites-Strukturen in der Hubschrauberfertigung war zu Beginn des Vorhabens geprägt durch manuelle Prozesse und der primären Verwendung von duromeren Prepreg (preimpregnated fibers). Dabei werden mit einem Cutter erstellte Prepregzuschnitte auf der formgebenden Werkzeugform abgelegt und mit Verwendung eines Vakuumaufbaus im Autoklav ausgehärtet. Die hohen Fertigungskosten basieren neben dem großen Personalbedarf auch auf den hohen Materialkosten. Zusätzlich existieren durch die eingeschränkte Drapierbarkeit des Halbzeugs Einschränkungen bei der abbildbaren Oberflächengeometrie. Ein Alternativverfahren, das zu Vorhabensbeginn nur sehr begrenzt für die Fertigung von Hubschrauberstrukturen eingesetzt wurde, ist das Resin Transfer Molding (RTM). Hierbei wird ein trockenes konturnah vorkonfektioniertes Faserhalbzeug (Preform) in eine geteilte Werkzeugform eingelegt. Nach Schließen der Werkzeugform in einer Presse wird der Kunststoff injiziert und ausgehärtet. Den niedrigeren Materialkosten, kurzen Prozesszeiten und der Möglichkeit komplexe Geometrien herzustellen, stehen bei diesem Verfahren Herausforderungen bei der Herstellung der Preform und dem Einhalten einer konstanten Bauteilqualität entgegen.

Obwohl die Entwicklung automatisierter Verfahren für die Fertigung von Faserverbundbauteilen bereits Ende der 1980er Jahre begann, war zu Beginn des Vorhabens in der industriellen Fertigung von Hubschraubern zumeist nur die Automatisierung von einfacheren Teilprozessen realisiert (u.a. Halbzeugzuschnitt, Handhabung, zerstörungsfreie Prüfung). Für den beim Preforming von trockenen Faserhalbzeugen entscheidenden und komplexesten Prozessschritt der Drapierung waren bauteilspezifische oder für ein stark begrenztes Bauteilspektrum einsetzbare Technologien vorhanden, die zum großen Teil nur einen Entwicklungsstand von TRL 3-4 erreichten und noch nicht für den industriellen Einsatz geeignet waren. Eine Ursache war das nur eingeschränkt nutzbare Ergebnis der Simulation von Drapiervorgängen. Entsprechende Software war zwar verfügbar, aber die Genauigkeit der Algorithmen, Materialkennwerte und Randbedingungen war nicht ausreichend für die präzise Beschreibung des Materialverhaltens. Dadurch war die

Realisierung flexibler Automaten für das Drapieren schwer umsetzbar. Durch die im Vergleich zum Flugzeug- und Automobilbau kleinen Bauteilstückzahlen ist Flexibilität und Adaptierbarkeit der automatisierten Verfahren entlang der gesamten Prozesskette erforderlich, da der finanzielle Aufwand für die Automatisierung des Herstellungsprozesses spezifischer Bauteile nur in wenigen Fällen wirtschaftlich begründet werden kann.

Zu Beginn des Vorhabens war in mehreren Forschungsprojekten auf Basis unterschiedlicher Baugruppen der Ansatz verfolgt worden, durch Optimierungen und Neuentwicklungen entlang der Prozesskette die Kosten bei der Fertigung von Faserverbundbauteilen zu senken. Dabei stand auch die Entwicklung möglichst flexibel einsetzbarer automatisierter Systeme im Vordergrund. Im Vorhaben AZIMUT wurden dazu drei verschiedene Roboterendeffektoren für Handhabung und Drapierung von Gewebezuschnitten entwickelt. Durch eine integrierte Mechanik ist ihre Form veränderbar, so dass sie zur Herstellung doppeltgekrümmter Preformen (z.B. Druckkalotte Flugzeug) genutzt werden können. Auch im Vorhaben INSTRUKT wurde ein robotergestütztes Werkzeug (PDA-Endeffektor) für das Preforming (Handhabung, Drapierung, Binderaktivierung) aufgebaut. Hier war die Fertigung einer Hubschrauberbodenstruktur das Ziel. Beim PDA-Endeffektor ist die Adaptierbarkeit an verschiedene einfachgekrümmte Oberflächen nicht durch eine Mechanik realisiert, sondern durch seine Form (angenähertes Reuleaux-Dreieck) und die Verwendung von Schaumstoff an den Funktionsflächen. Alle Werkzeuge sind nur für Bauteile in einem begrenzten Bereich in Bezug auf Größe und Oberflächenradien nutzbar.

Die in Hubschraubern eingesetzten Faserverbundstrukturen hatten zu Vorhabensbeginn bereits einen hohen Entwicklungsstand erreicht. Der Fertigung war aber teilweise noch von der vom Werkstoff Metall geprägten Denkweise geleitet, die den Fokus auf eine separate Betrachtung von Prozessschritten setzt. Dabei war eine Umsetzung eines „design for manufacturing“, das die Eigenschaften des Faserhalbzeugs und aller Fertigungsschritte integriert betrachtet, noch nicht realisiert. Auch wurden in der Kleinserienproduktion nur begrenzt Analysen des Gesamtprozesses durchgeführt, um die im Hinblick auf Bauteilqualität und damit auch Wirtschaftlichkeit sinnvollsten Teilprozesse zu automatisieren.

Bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden:

In AP3100 wurden der vom Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb) im Vorhaben INSTRUKT entwickelte PDA-Endeffektor und eine von AHD betriebene Diaphragma-Anlage genutzt.

In AP3200 wurde ein Lasersinterverfahren für die additive Fertigung von Werkzeugformen aus Polyamid 12 angereichert mit Aluminiumpartikeln (Alumide) genutzt.

## **5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Die im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Arbeiten basierten auf den von AHD zu Verfügung gestellten Bauteildaten (CAD und Plybook). Auch wurden für die experimentelle Untersuchung in AP3100 Anlagen bei AHD in Donauwörth genutzt. Hierdurch war ein regelmäßiger vertrauensvoller Austausch über aktuelle Ergebnisse und den Stand der Arbeiten mit AHD gegeben. Auch wurden wichtige Entscheidungen (u.a. Szenariowahl in AP3100, Auswahl Zielbauteil in AP3200) in Absprache getroffen. Durch das Vorhaben war es möglich, die Zusammenarbeit mit AHD nach Abschluss des Vorgängervorhabens INSTRUKT weiter zu vertiefen. In Einzelthemen erfolgte auch ein Austausch mit Airbus Group Innovations (AGI), ehemals EADS Innovation Works (IW), und der iSAM AG. Durch regelmäßige Treffen des Konsortiums war auch der aktuelle Stand der Arbeiten der weiteren Projektpartner Fraunhofer Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP), Airbus Operations GmbH (AI), Momentive und den Unterauftragnehmer bekannt. In Abbildung 3 ist die Zusammenarbeit der Partner in den Arbeitspaketen dargestellt.

	Airbus Operations					
	DLR	ECD	FhG IZFP	ISAM	IW	Momentive
AP1000						
Anforderung und Bewertung UDS						
AP1100 Anforderungen Fertigung/Architektur						
AP1200 Wechselwirkung Design & Fertigung & ZfP						
AP1300 Bewertungssystematik						
AP1400 Kostenbewertung/ Risikoabschätzung						
Gesamtprozesskette						
AP2000 Architektur						
AP2100 Architekturkonzepte						
AP2200 Konstruktion kritischer Elemente						
AP3000 Fertigungsprozessentwicklung						
AP3100 Analyse heutiger Prozesse						
AP3200 Prozesskette „Herstellung“						
AP3300 Materialien						
AP3400 Zerstörungsfreie Prüfung						
AP3500 MPS						
AP4000 Validierung						
AP4100 Test von kritischen Design-Elementen						
AP4200 Zerstörungsfreie Prüfung kritischer Elemente / Validierungsartikel						
AP4300 Fertigung kritischer Elemente mit der Prozesskette						

Abbildung 3: Zusammenarbeit der Projektpartner in den Arbeitpaketen



## II. Eingehende Darstellung

### 1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

In Tabelle 1 sind die im Antrag aufgeführten Ziele (vgl. Abschnitt I.1.) den während der Laufzeit des Vorhabens erreichten Ergebnissen in den jeweiligen Arbeitspaketen gegenübergestellt.

**Tabelle 1:** Gegenüberstellung Ziele mit im Vorhaben erzielten Ergebnissen

Arbeitspaket	Teilziel	Erzieltes Ergebnis
AP3100 Oberdeckstruktur	Erfassung des Stands der Technik von Prozessen und Anlagen für die Handhabung, Drapierung und Aktivierung (Preforming) trockener Faserhalbzeuge	Recherche durchgeführt und drei Verfahren (Diaphragma, Doppel-Diaphragma, Hauben/Stempel) zusätzlich zum PDA-Endeffektor zur Untersuchung ausgewählt
	Untersuchung und Bewertung der Eignung und des Potentials der Prozesse für Preformfertigung von Zielbaugruppe	Experimentelle Untersuchung auf Basis von exemplarischen Zuschnitten und konstruierten Hilfsmitteln (u.a. Werkzeugformen, Hauben) durchgeführt und mit der entwickelten Bewertungssystematik ausgewertet
	Zusammenstellung von Optimierungsansätzen für Verfahren	Verbesserungsansätze identifiziert; Konzepte zur Umsetzung aufgeführt
AP3100 Integrierter Stator	Konstruktion und Herstellung einer teilbaren Werkzeugform inkl. Möglichkeit zur Binderaktivierung	Mehrfachsegmentierte Werkzeugform zur flexiblen Untersuchung aller Ablagegeometrien erstellt; Verfahren für Binderaktivierung ausgewählt
	Durchführung von Drapierversuchen an neuem Zielbauteil	Experimentelle Untersuchung durchgeführt; Übertragbarkeit des Ergebnisses der Verfahrensbewertung auf das neue Zielbauteil nachgewiesen
	Ermittlung einer zur Automatisierung günstigen Preformaufteilung	Möglichkeiten und Einschränkungen des neuen Faserhalbzeugs auf Zielgeometrie bestimmt; Konzept für Aufteilung der Sub-Preformen erstellt; Bewertung zum Potential einer automatisierten Herstellung jeder Sub-Preform erstellt und zu realisierende Struktur ausgewählt (Statorblatt)
AP3200	Ermitteln von Aufnahme- und Ablagestrategie von Zuschnitten auf dem Zielbauteil und Festlegung von Geometrie und Funktionsweise des Werkzeugs	Konzepte für die Handhabung der Zuschnitte erstellt; Werkzeug konstruiert
	Test des Werkzeugs zur Handhabung der Zuschnitte	Versuche durchgeführt und Funktion nachgewiesen
	Entwicklung einer Kinematik für die Drapierung auf doppeltgekrümmten Flächen des Zielbauteils	Mehrere Konzepte entwickelt und in Versuchen validiert; Bewertung durchgeführt und spezifisches Verfahren für jede Sub-Preform ausgewählt; Werkzeug konstruiert
	Anpassung der Werkzeugformen nach Design Freeze des Zielbauteils	Konstruktion an finale Form des Zielbauteils angepasst

	Konstruktion, Auslegung und Zusammenbau aller Komponenten des Werkzeugs	Konzepte zum Anlagenlayout, Art des Manipulators, Sensorik und Prozesssteuerung erstellt und bewertet; Konzept für den industriellen Einsatz erarbeitet; Prozessablaufplan aufgestellt; Werkzeugwechselsystem und funktionsintegrierte Werkzeugformen entwickelt; Konstruktion, Auslegung und Aufbau durchgeführt
AP4300	Inbetriebnahme des Werkzeugs und Durchführung von Versuchen an Beispielzuschnitten des Zielbauteil zur Validierung der Funktionsweise inkl. Bestimmung von Prozessparametern	Prozessparameter iterativ ermittelt; Funktion des Werkzeugs durch automatisierte Herstellung mehrerer Statorblatt-Preformen nachgewiesen; Steigerung der Prozessrobustheit und weitere Optimierung Parameter ausstehend

Auf Grund der Vertraulichkeit der im Vorhaben durchgeführten Arbeiten ist eine detaillierte Darstellung der erzielten Ergebnisse nicht möglich.

## 2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der zahlenmäßige Verwendungsnachweis wurde am 20.02.2018 dem Projektträger übersandt.

## 3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Aus der fortdauernden Anforderung, das Gewicht von Luftfahrtstrukturen zu senken, wird der Anteil von Faserverbundwerkstoffen in der Struktur insbesondere bei Drehflüglern zunehmen. Viele Prozessschritte bei der Herstellung von faserverstärkten Bauteilen werden aktuell manuell ausgeführt, was neben den Materialkosten ein großer Kostenfaktor ist. Hier ist eine Senkung der Produktionskosten von Faserverbundbauteilen notwendig, um auch in Zukunft wettbewerbsfähige Produkte umsetzen zu können. Prozessautomatisierung ist ein Ansatz, um dieses Ziel zu erreichen. Dies wurde im Rahmen der im Vorhaben erfolgten Arbeiten an einer Teilstruktur realisiert. Hierbei wurde ein Prozess aufgezeigt, der in einer Lücke des Anwendungsbereichs von Automatisierung in der Fertigung von Faserverbundbauteilen ansetzt. Bisher wird Prozessautomatisierung in der Luftfahrzeugproduktion hauptsächlich für einfachere Strukturen mit hohen Stückzahlen eingesetzt. Eine (teil-)automatisierte Fertigung komplexer, hochintegraler Bauteile bzw. von Kleinserien findet kaum statt, so dass dieser Prozess immer noch von kostenintensiven manuellen Arbeiten geprägt ist. Die im Vorhaben umgesetzte Versuchsanlage zeigt, dass eine automatisierte Preformherstellung auch komplexer Strukturen möglich ist. Zudem konnte ein Konzept für Kleinserien dargestellt werden, dass auf der flexiblen und standardisierten Nutzung einer Roboterzelle aufbaut, wodurch ein Einsatz für unabhängige Anwendungen entlang der gesamten Prozesskette möglich wird. Durch diese im Vorhaben geleisteten Arbeiten konnte aufgezeigt werden, wie wirtschaftlich sinnvoll der Anwendungsbereich von Automatisierung in der Faserverbundfertigung erweitert werden kann und so die notwendige Kostenreduktion ermöglicht.

Durch die Änderung der Zielbaugruppe während der Laufzeit des Vorhabens wurden weitere bei Antragsstellung nicht absehbare Arbeiten notwendig. Trotz dessen wurde das Budget eingehalten und die Projektziele konnten nach kostenneutraler Verlängerung bis zum Vorhabensende erreicht werden. Durch die zusätzlichen Untersuchungen der neuen Zielbaugruppe konnten erweiterte Erkenntnisse zur Drapierung auf unterschiedlichen Bauteiloberflächen gewonnen werden. Bei den für das Erreichen der Vorhabensziele notwendigen Arbeiten wurden nach Verfügbarkeit kostengünstige Lösungen gesucht. So wurden zum Beispiel bestehende Anlagen genutzt, ein Werkzeugwechselsystem erarbeitet und ein Konzept für kostengünstige Werkzeugformen für das Preforming entwickelt und eingesetzt. Mit diesen war es auch möglich, bereits in Vorversuchen Teilprozesse zu validieren und zu optimieren, so dass eine hohe Wahrscheinlichkeit gegeben war, dass die auf dieser Basis ausgelegte Versuchsanlage erfolgreich eingesetzt werden konnte. Durch die erzielten Ergebnisse profitierte unmittelbar die Vorhabenspartner, sowie über die erfolgten Veröffentlichungen das gesamte Forschungsumfeld.

#### 4. Voraussichtlicher Nutzen

Neben dem schon bei Antragsstellung definierten Nutzen, der durch die Durchführung des Vorhabens unmittelbar erzielt werden sollte und durch das Erreichen des Vorhabenziels realisiert wurde, sind auch weitere nicht geplante Ergebnisse erreicht worden, die verwertet werden können. Zusammenfassend können folgende Hauptpunkte benannt werden:

- Die breit angelegte Recherche zu Drapierverfahren und die Ergebnisse der experimentellen Untersuchung verschiedener Faserhalbzeuge auf unterschiedlichen Bauteilgeometrien ist vom großen Wert für die Lösung ähnlich gelagerter Aufgabenstellungen in aktuellen und zukünftigen Projekten. Durch den allgemeinen Ansatz kann schneller ein für den jeweiligen Anwendungsfall geeignetes Verfahren ausgewählt werden.
- Durch den Nachweis der Funktionsfähigkeit der Versuchsanlage mit zugrundeliegendem Konzept für einen industriellen Einsatz ist die Voraussetzung geschaffen, die Ergebnisse in der industriellen Produktion von komplexen Bauteilen kleiner Stückzahlen zu nutzen und auf diese Weise die Fertigungskosten zu senken. Dabei sind viele Erfahrungen generischer Natur, so dass ein Übertrag auf andere Bauteile und Prozesse möglich ist.
- Das Zielbauteil stellte hohe Anforderungen an die Automatisierungslösung in Bezug auf Genauigkeit, Komplexität der Oberfläche und des Bauteilaufbaus (Sandwichstruktur). Durch die Arbeiten im Vorhaben konnten aus diesem Grund die Kompetenzen des DLR im Bereich der automatisierten Preformings für komplexe Bauteile ausgebaut werden.
- Das erarbeitete Konzept funktionsintegrierte in additiven Verfahren hergestellte Werkzeugformen für das Preforming zu nutzen, hat hohes Potential die Kosten bei der Herstellung von Bauteilen aus Faserverbundwerkstoffen zu senken. Dies wird erreicht durch niedrigere Fertigungskosten der Preformwerkzeuge, der Reduzierung von Prozessperipherie durch die Integration der Funktion in die Werkzeugformen und der Senkung von Prozessentwicklungszeit durch die Möglichkeit Werkzeugformen flexibel und schnell anzupassen. Durch die inzwischen weite Verbreitung von Anlagen für die additive Fertigung ist eine unmittelbare Umsetzung der Verbesserungsansätze beim DLR und den Industriepartnern gegeben. Es ist sehr wahrscheinlich, durch weitere Untersuchungen weitere Anwendungsfelder identifizieren und erschließen zu können.
- Die Umsetzung der Prozess- und Anlagensteuerung auf Basis von OPC UA bietet ein breites Spektrum von Anwendungsfällen zur weiteren Nutzung. Zum einen können die im Rahmen des Vorhabens erstellten Module (u.a. für Roboter und Werkzeugwechselsystem) direkt universell für weitere Projekte genutzt werden. Zum anderen wurden im Vorhaben auf Grund des großen Potentials der Technik viele Ansätze von Anwendungen erstmals realisiert, die in laufenden und zukünftigen Projekten genutzt und weiterentwickelt werden können, z.B. Inline-Prozess-Monitoring aller Prozessparameter zur Fehleranalyse und Dokumentation, Anwendung zur schnellen und einfachen Anpassung von Prozessabläufen in der Entwicklungsphase, Aufbau digitaler Zwilling der Roboterzelle mit der Möglichkeit zur virtuellen Prozessanalyse. Mit der Technik sind viele weitere Nutzungsmöglichkeiten gegeben, die großes Potential auch für einen industriellen Einsatz haben.
- Das im Vorhaben entwickelte Werkzeugwechselsystem kann für weitere Projekte genutzt werden.
- Mit dem direkten Austausch zwischen den Projektpartnern und den erfolgten Veröffentlichungen werden die Ergebnisse des Vorhabens für Industrie und die wissenschaftliche Gemeinschaft nutzbar gemacht. Dies führt unmittelbar zur Stärkung der Zusammenarbeit mit den Projektpartnern und zum Ausbau der wissenschaftlichen Vernetzung. Zudem bilden die Ergebnisse die Basis für die Akquise von Folgeprojekten und führen zu einer Stärkung der Wettbewerbsposition der beteiligten Industriepartner.
- Durch die Forschungsarbeiten im Vorhaben und den Austausch mit den Projektpartnern fand eine Weiterbildung und Qualifizierung in neue Themengebiete der beteiligten Mitarbeiter statt.

## 5. Fortschritt bei anderen Stellen im Themengebiet des Vorhabens

Im Themengebiet des DLR im Rahmen des Vorhabens, einer automatisierten Umsetzung des Preformings komplexer Sandwichstrukturen für Luftfahrtanwendungen, sind keine Fortschritte anderer Stellen bekannt.

## 6. Veröffentlichungen

Zu den Ergebnissen der im Vorhaben durchgeführten Arbeiten sind folgende Veröffentlichungen erfolgt bzw. stehen zum Zeitpunkt der Berichtserstellung noch an:

- Stefani, T.; Buchheim, A.; Deden, D.; Gänswürger, P.; Larsen, L.: **Drape forming methods for the automated preforming of helicopter structures**, SAMPE Europe Conference, 2017, Stuttgart
- Deden, D.; Gänswürger, P.; Buchheim, A.; Stefani, T.: **Industrial concept for the automated production of small batch series preforms for Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) components**, SAMPE Europe Conference, 2017, Stuttgart
- Krebs, F.: **Towards plug and work OPC UA as middleware of modern automation systems**, 50<sup>th</sup> International Symposium on Robotics (ISR), 2018, München
- Deden, D.; Buchheim, A., Stefani, T.: **Evaluation of an additively manufactured tooling with integrated functionality for the production of carbon fiber textile preforms**, The Composites and Advanced Materials Expo (CAMX), 2018, Dallas