

Effiziente und Robuste Entwicklung komplexer Faserverbund-Triebwerkstrukturen

Sebastian Spitzer, Fabian Folprecht, Alrik Dargel, Christoph Klaus, Albert Langkamp, Maik Gude

Steigende Anforderungen an die Leistungsfähigkeit und Effizienz von Triebwerken lassen sich durch den Einsatz von Metall-Faserverbund-Bauweisen erfüllen. Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) mit ihren herausragenden und einstellbaren mechanischen Eigenschaften bieten das Potential, die Masse strukturell hochbelasteter Komponenten zu reduzieren. Durch die richtungsabhängigen Eigenschaften kann der FKV zielgerichtet für die Anwendung angepasst werden. Die Vielzahl der einstellbaren Parameter in Kombination mit der Entwicklung von komplexen Triebwerkstrukturen führt zu einem interaktiven und interagierenden Entwicklungsprozess. Im Rahmen dieses Beitrages wird ein Ansatz zur kombiniert virtuellen Entwicklung eines Triebwerk-Subsystems am Beispiel des Zwischengehäuses vorgestellt. Ein systematischer Prozess in Kombination mit virtuellen Methoden ermöglicht die effiziente Erarbeitung und modellhafte Abbildung des Gesamtsystems, bestehend aus relevanten Triebwerkselementen (System), dem darin integrierten Zwischengehäuse (Subsystem) und lastübertragenden Faserverbund-Leitschaufeln (Komponente). Durch Detaillierung im Entwicklungsprozess steigt kontinuierlich die Aussagegenauigkeit, wobei gleichzeitig auch der Aufwand erheblich zunimmt. Ein experimenteller Funktions- und Festigkeitsnachweis der Leitschaufel kann zur Reduktion des Entwicklungsrisikos beitragen. Die dafür benötigten Funktionsmuster lassen sich in einem kombinierten Verfahren, bestehend aus Additiver Fertigung und Resin Transfer Moulding, herstellen, wobei der 3D-Druck die Anpassung der realen Funktionsmuster an die Geometrie- und Werkstoffmodifikationen im Rahmen der virtuellen Entwicklung ermöglicht.

Keywords: Leichtbau-Triebwerkstruktur, Metall-Faserverbund-Bauweisen, virtuelle Entwicklung, Systeminteraktion, additives Prototyping, rekonfigurierbare Werkzeuge

Konstruktive Entwicklung hybrider Triebwerkkomponenten

Durch Massereduktion bei gleicher oder gesteigerter Funktionalität kann die Effizienz von Triebwerken gesteigert und somit ein Beitrag zur Erreichung der Ziele des European Green Deal [EU19] und der Vision des Flightpath 2050 in Bezug auf den Umweltschutz [EU11] geleistet werden.

Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) mit ihren herausragenden strukturmechanischen Eigenschaften bieten ein hohes Potential zur Lastfernübertragung bei minimaler Strukturmasse. Gleichzeitig werden komplexe Bereiche mit erhöhten thermomechanischen Beanspruchungen weiterhin in Metall ausgeführt. Zur Erfüllung der stetig steigenden Anforderungen ist eine optimale Kombination einer Vielzahl von Einzellösungen notwendig. Die Berücksichtigung unterschiedlicher Werkstoffklassen mit teilweise richtungsabhängigen und einstellbaren Eigenschaften stellt Ingenieure in diesem Kontext oftmals vor große Herausforderungen und bedarf einer methodischen Vorgehensweise.

Das Triebwerk-Zwischengehäuse als hochbelastete Struktur

Der im Triebwerk erzeugte Schub wird über das Zwischengehäuse (Intermediate Case, IMC, vgl. Abbildung 1, links) auf die Flugzeugstruktur übertragen (Hauptfunktion 1). Zwischengehäuse neuer Generationen übernehmen neben dieser mechanischen Funktion der Lastübertragung zusätzlich eine aerodynamische Aufgabe. Der vom Fan verdrillte Luftstrom wird durch strukturintegrierte Leitschaufeln im IMC wieder zu einer axial orientierten Strömung ausgerichtet (Hauptfunktion 2). Durch diese Funktions-synthese entsteht in minimalem Bauraum ein Bauteil mit struktureller und aerodynamischer Funktionalität (vgl. Abbildung 1, Mitte). In den aerodynamischen und lasttragenden Schaufeln (Vanen) sowie in der großflächigen äußeren Ringstruktur (Ring) können FKV eingesetzt werden (vgl. Abbildung 1, rechts).

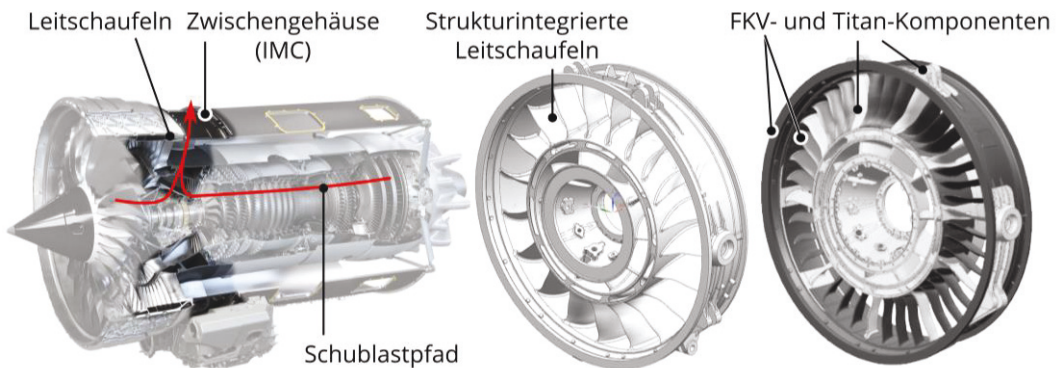


Abbildung 1: Rolls-Royce Pearl 15 (links), metallisches strömungsführendes Zwischengehäuse der Pearl 700 (Mitte) und Faserverbund-Metall-Zwischengehäuse zukünftiger Generationen (rechts)

Eine derart hybrides IMC weist durch die richtungsabhängigen FKV ein anderes Steifigkeitsverhalten gegenüber dem Triebwerkssystem auf. Die an internen und externen Schnittstellen auftretenden Lasten hängen von den Struktureigenschaften der Komponenten selbst und der daraus resultierenden Systemantwort des Triebwerks ab, wodurch der Entwicklungsprozess interaktiver und iterativer wird.

Kombiniert virtuell-reeller interaktiver Entwicklungsprozess

Der bei ROLLS-ROYCE durchgeführte Entwicklungsprozess folgt im Wesentlichen den etablierten iterativen und interaktiven Abläufen zur Entwicklung technischer Systeme und Produkte nach VDI 2221 [VDI93a] in Kombination mit der Vorgehensweise zur Konstruktion von Faserverbundstrukturen nach Helms [Pa13].

Im Rahmen des Konstruktiven Entwicklungsprozesses (KEP) werden basierend auf systematisch erarbeiteten Vorentwürfen in virtuellen Entwicklungsumgebungen Funktionsmuster und Prototypen erarbeitet, welche die wesentlichen Merkmale in Bezug auf die Hauptfunktionen aufweisen. Diese virtuellen Muster und Prototypen werden mit zunehmendem Projektfortschritt detailliert und zu gegebener Zeit in reale Funktionsmuster zur Eigenschaftsabsicherung überführt [Pa13]. Die aktuelle Auflage der VDI 2221 hebt hervor, dass die Entwicklung in einem stark iterativen Vorgehen stattfindet [VDI19], wodurch es zu stetigen Änderungen der virtuellen und realen Muster und Prototypen kommen kann.

Die Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktentwicklung (WiGeP) gibt in Bezug auf die Steigerung der Effizienz von Entwicklungsprozessen im Rahmen eines Positionspapiers Hinweise zum Umgang mit Digitalen Zwillingen [WiGeP20]. Dementsprechend werden die darin aufgezeigten Ansätze bei der konstruktiven Entwicklung der Triebwerk-Vane in einem virtuell-reellen Ansatz berücksichtigt.

Faserverbund-Fertigungstechnologie für hochbelastete Strukturen

Als eine Fertigungstechnologie zur Herstellung qualitativ hochwertiger Faserverbundstrukturen hat sich die Ablage trockener Fasern zu einer Faservorform (Preform) in Kombination mit einer anschließenden Harzinfiltration in einem geschlossenen Metallwerkzeug etabliert (Resin Transfer Moulding, RTM). Der Faserablageprozess erfolgt dabei entweder durch Zuschnitt und Umformung flächiger Halbzeuge (Fiber Patch Placement, FPP) oder die variabelaxiale Ablage von Fasern im Stickprozess (Tailored Fiber Placement, TFP). Bei der Faserablage kann der reale Faserwinkel durch optische Messsysteme erfasst und in Kombination mit Bildauswertesoftware in eine Elementorientierung in einem FE-Netz überführt werden [Hai17, Hai20, Hof19].

Die Stabilisierung der trockenen Faserhalbzeuge kann durch den Einsatz von Bindern geschehen, welche auf die Faseroberfläche in Form von Pulver aufgetragen und durch Wärmeeintrag aktiviert werden. Dadurch können komplexe dreidimensionale und formstabile Preformen hergestellt werden. Als Preformingwerkzeuge haben sich dabei metallische Werkzeuge aus Aluminium oder Werkzeuge aus Glasfaser-Kunststoff-Verbund (GFK) etabliert. Die beschriebenen Fertigungstechnologien zeichnen sich durch eine hohe und reproduzierbare Fertigungsqualität aus und werden sowohl zur Fertigung von Prototypen als auch in der Serienfertigung eingesetzt.

Die dafür etablierten Formwerkzeuge sind mit hohem Rohstoffeinsatz und langen Lieferzeiten verbunden. Derartige Werkzeuge sind nach einer Anpassung der Faserverbundkomponenten nur noch bedingt oder durch aufwändige Nacharbeiten verwendbar. Die Aufwendungen zur Anpassung der Werkzeuge im Rahmen agiler und iterativer Entwicklungsprozesse ist somit kosten- und zeitintensiv.

Kombinierte virtuell-reelle Entwicklungsmethodik eines hybriden Zwischengehäuses

Zur Erzeugung einer robusten Datenbasis im Konstruktiven Entwicklungsprozess (KEP) hat sich eine kombinierte Methodik aus virtuellen Arbeiten mit unterstützender Absicherung der Eigenschaften durch experimentelle Untersuchungen etabliert (VDI 2014 - Blatt 2, Composite Materials Handbook-17) [VDI93b, SAE17]. Zur Steigerung der Effizienz und Reduktion des Risikos im KEP können den einzelnen Abstraktions-Level bei der Entwicklung eines Zwischengehäuses von der Einzelkomponente (Komponenten-Level) und ihren Einzelementen (Element-Level) bis zum Triebwerkssystem (System-Level) den virtuellen Elementen reale Muster gegenübergestellt werden (vgl. Abbildung 2). Dieser Ansatz erlaubt die virtuelle Entwicklung der Einzelemente unter komplexen Last- und Randbedingungen. Die realen Muster werden in vereinfachten Szenarien untersucht.

Virtuelle Strukturentwicklung

Ausgehend von einer Funktions- und Belastungsanalyse des gesamten IMC werden die Beanspruchungen in den einzelnen Komponenten analysiert (vgl. Abbildung 3, links). Dabei bieten die ermittelten Hauptspannungstrajektorien eine erste Grundlage zur Erarbeitung einer Verstärkungsstruktur. Ein Verständnis bezüglich des Trageffekts möglicher Faserverbundbauweisen erlaubt die Auswahl vereinfachter analytischer Ansätze zur modellhaften Abbildung der Eigenschaften im Rahmen der Konzepterstellung.

lung. Als Ersatzmodell kommt im Fall der strukturellen Leitschaukel ein Platten/Scheiben-Element zum Einsatz (Abbildung 3, Mitte). In Kombination mit der klassischen Laminattheorie kann ein erstes Werkstoffkonzept in Form eines Lagenaufbaus erarbeitet werden. Im Anschluss daran wird ein Entwurf der Faserverbund-Leitschaukel mit vereinfachten und erweiterten numerischen Modellen berechnet (Abbildung 3, rechts).

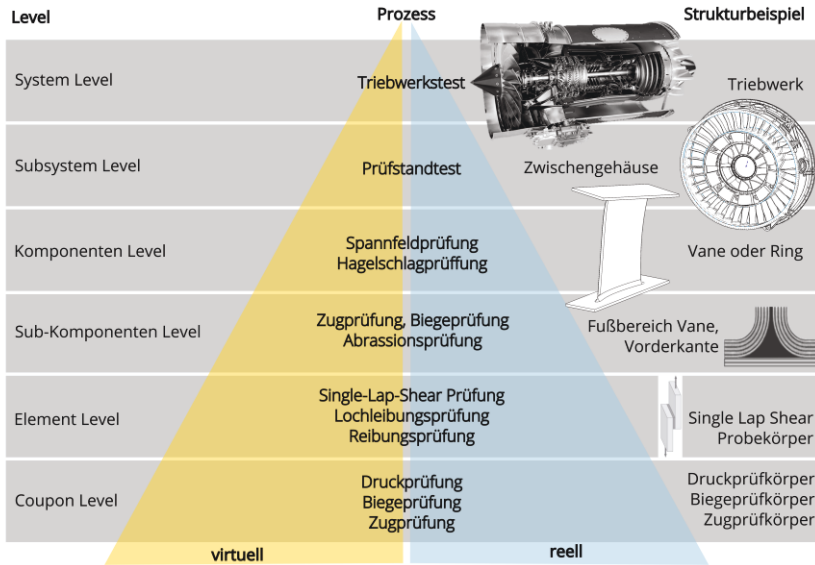


Abbildung 2: Entwicklungspyramide mit den Ebenen vom Coupon- (unten) bis zum System-Level (oben), der virtuellen (links) und reellen (rechts) Seite

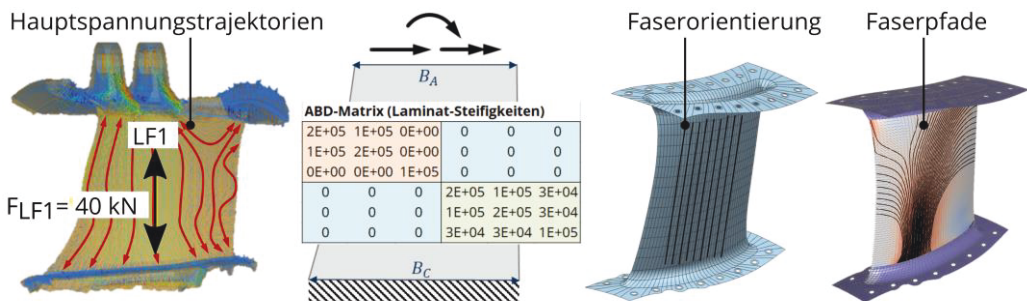


Abbildung 3: Analyse der metallischen Referenzstruktur (links), analytisches Ersatzmodell und vereinfachtes numerisches Modell (Mitte) und erweitertes numerisches Modell in EDOstructure mit den berechneten Faserpfaden (rechts)

In einem parallelen interaktiven und iterativen Prozess wird der Fertigungsprozess erarbeitet. Die bei der Analyse identifizierten Hauptspannungstrajektorien deuten auf hohes Potential zum Einsatz variabel axialer Faserverläufe hin, welche im luftfahrtgerechten TFP-Verfahren realisiert werden können. Die Spezialsoftware EDOStructure der Complex Fiber Structures GmbH ist in der Lage die fertigungsprozessstechnischen Besonderheiten bei der Gestaltung und Auslegung der Vane zu berücksichtigen (Abbildung 3, rechts).

Der systematische Entwicklungsprozess in Kombination mit virtuellen Methoden ermöglicht die effiziente Erarbeitung und modellhafte Abbildung des Gesamtsystems, bestehend aus relevanten Triebwerkselementen (System), dem darin integrierten Zwischengehäuse (Subsystem) und den lastübertragenden Faserverbund-Leitschaufeln (Komponente, vgl. Abbildung 4).

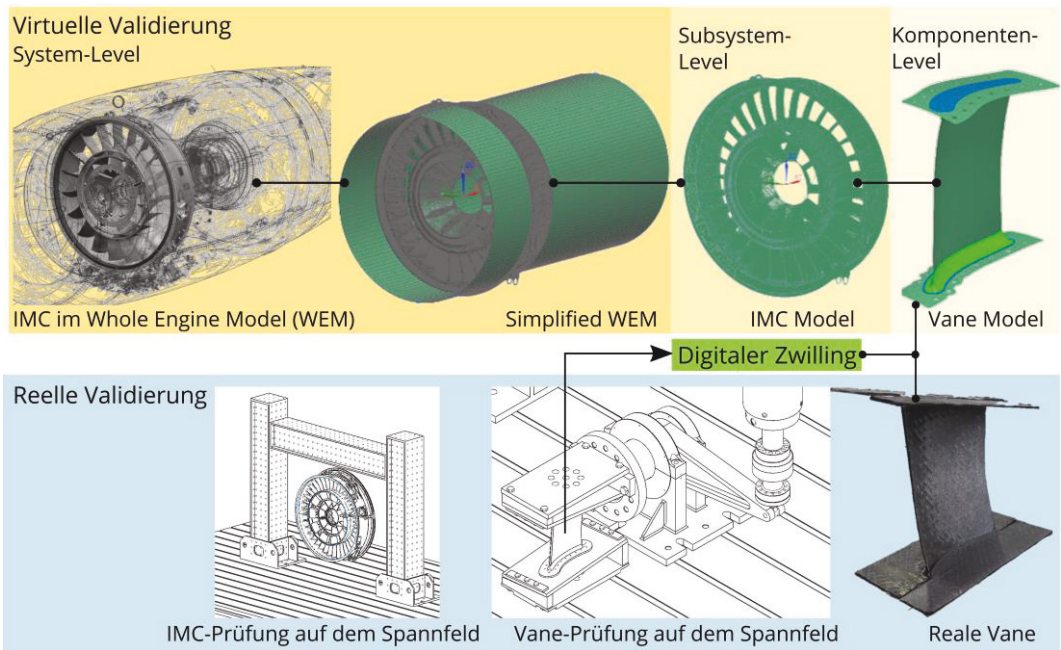


Abbildung 4: Virtuelle (oben) und reale Validierung (unten) vom Gesamttriebwerksmodell (WEM, links) bis zur Einzelkomponenten einer Vane (rechts) und Verknüpfung der Einzelemente über einen Digitalen Zwilling (Mitte)

Dabei weisen die Elemente auf System-, Subsystem- und Komponentenebene einen hinreichenden Detaillierungsgrad auf, um die benötigten Informationen zu generieren und gleichzeitig den Modellierungs- und Rechenaufwand zu reduzieren. Der Detaillierungsgrad hängt maßgeblich von der Phase des Entwicklungsprozesses ab und wird im Verlauf vom Konzept über den Entwurf bis zur Detailkonstruktion zunehmend gesteigert. Eine derartige Kette aus verknüpften Modellen erlaubt iterative Anpassungen der Werkstoff- und Struktureigenschaften der Faserverbund-Leitschaukeln, eine Bewertung der Auswirkung auf das Gesamtsystem und der daraus resultierenden Systemantwort. Dieses interaktive Vorgehen ermöglicht die Gestaltung und Auslegung der Leitschaukeln im Gesamtsystem inklusive virtuellem Festigkeitsnachweis.

Reale Eigenschaftsabsicherung

Zur Absicherung der Modelle werden reale Funktionsmuster verwendet. Dabei können in der Fertigung relevante Parameter wie z.B. die Faserausrichtung aufgezeichnet und die realen Faserverläufe in das Modell eingebracht werden (vgl. Abbildung 5). Aus der Verknüpfung der Realdaten mit dem Modell der Vane (virtueller Master) entsteht ein digitaler Zwilling der gefertigten Vane.

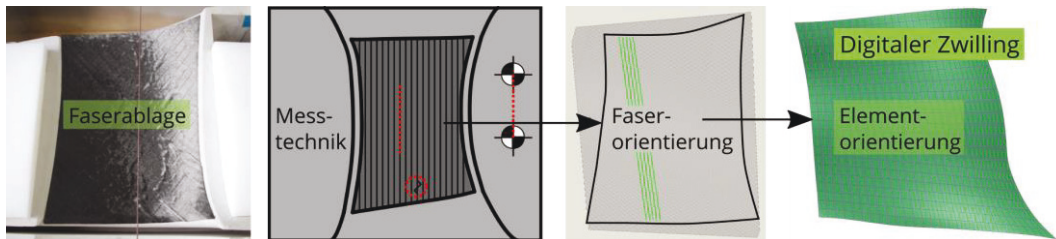


Abbildung 5: Messkonzept der Faserorientierung bei der Ablage der Einzellagen (links) Ablage der Einzellage und DXF-Dabei mit Faserpfaden (Mitte) und Mesh der Vane mit orientierten Elementkoordinatensystemen (rechts)

Neben den Faserorientierungen kann z. B. auch der Verzug der Vane nach der Fertigung mittels optischer Messsysteme erfasst und mit dem Digitalen Zwilling in Bezug gebracht werden.

Mit repräsentativen Prüfungen der Vane in Zug/Druck-Torsionsprüfmaschinen und auf dem Spannungsfeld kann der Digitale Zwilling bezüglich seines Strukturverhaltens abgesichert oder kalibriert werden (vgl. Abbildung 4, unten), um so die Aussagequalität bei komplexeren Lastszenarien in der virtuellen Validierungskette zu steigern.

Funktionsmuster einer strukturellen FKV-Leitschaukel aus einem 3D-Druck-unterstützten RTM-Verfahren

Generative Fertigungstechnologien haben sich in der Produktentwicklung zur direkten Herstellung von Prototypen (Rapid Prototyping) etabliert, wobei in Bezug zu Faserverbundstrukturen oftmals nur die Geometrie als wesentliches Merkmal abgebildet wird (Mockup). In der Fertigung werden generative Verfahren genutzt, um Formgebungshilfen und Werkzeuge zu drucken, welche die Herstellung von Faserverbundstrukturen unterstützen können (Rapid Tooling).

Durch Kombination des Rapid Tooling mit dem Resin Transfer Moulding entsteht eine Fertigungstechnologie, die es ermöglicht, die in der Luftfahrt etablierte Fertigungstechnologien des Preformings, der Infusion und Konsolidierung mit den Freiheitsgraden der Additiven Fertigung (3D-Druck) zu kombinieren.

Zur unmittelbaren Überführung von Geometrie- und Werkstoffanpassungen aus dem virtuellen Entwicklungsprozess in reale Funktionsmuster (vgl. Abbildung 6) kann ein modulares Werkzeugsystem, durch den Einsatz von Metallelementen in Kombination mit individuellen Formeinsätzen aus Kunststoff dienen. Dazu wird ein generativ gefertigtes Positiv (Abbildung 7, links) in das Stammformwerkzeug eingelegt und mit Silikon (ELASTOSIL M 4670 A/B Shore Härte 60) abgegossen (Abbildung 7, rechts).

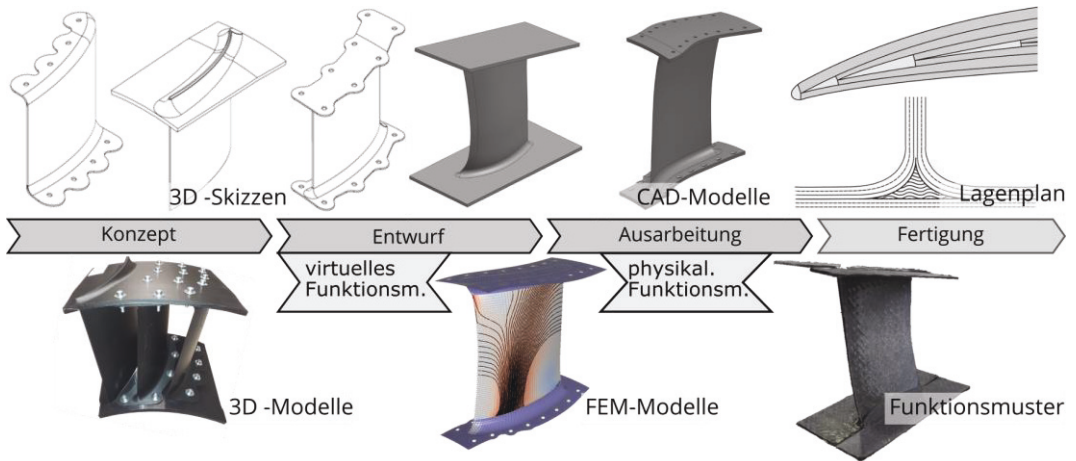


Abbildung 6: Elemente des Konstruktiven Entwicklungsprozesses vom Konzept bis zur Fertigung (oben, v.l.n.r.) und virtuelle und physikalische Funktionsmuster (unten)

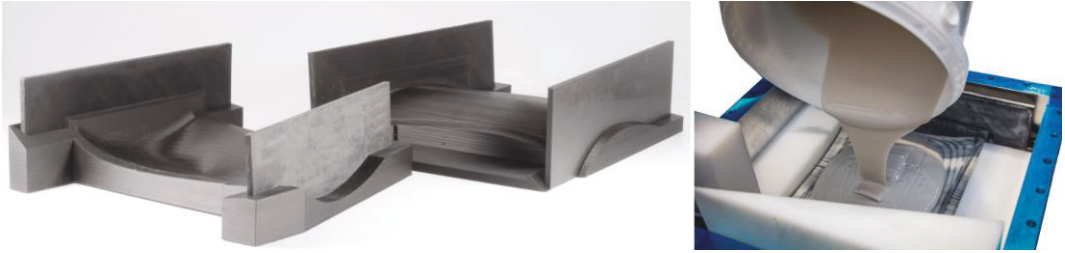


Abbildung 7: 3D-gedruckte positive Abgussformen (links) und Abguss der Formgebungshilfen in der metallischen Stammform (rechts)

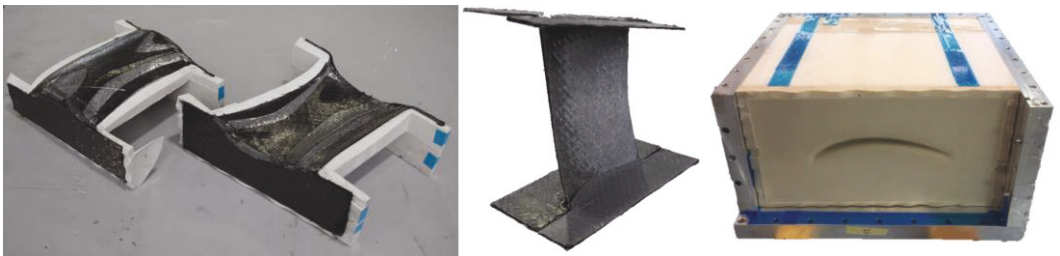


Abbildung 8: Preformsegmente in den Silikoneinsätzen (links), binderstabilisierte zusammengesetzte Preform (Mitte) und RTM-Stammformwerkzeug mit Silikoneinsätzen im zusammengebauten Zustand (rechts)



Abbildung 9: Modulares RTM-Werkzeug im Ofen bei der Infiltration (links), Reinharzabguss (Mitte) und entformtes Faser-Kunststoff-Funktionsmuster der lasttragenden Vane (rechts)

Die so hergestellten Silikoneinsätze lassen sich zur Herstellung der binderstabilisierten Preformteile (Abbildung 8, links) nutzen. Derart gefertigte Preformsegmente lassen sich zu einer komplexen Gesamtpreform zusammensetzen (Abbildung 8, Mitte), wobei der verwendete Binder für die Formstabilität sorgt und ein Einsetzen in das Stammformwerkzeug (Abbildung 8, rechts) ermöglicht. Die so hergestellten 3D-Druck-basierten RTM-Strukturen weisen die wesentlichen Merkmale von Strukturen aus konventionellen RTM-Werkzeugen in Bezug auf die äußere Form und die Faserarchitektur auf (Abbildung 9).

Bereits bei der Fertigungsentwicklung und Herstellung der ersten Muster hat sich gezeigt, dass sowohl die 3D-gedruckten Kunststoff-Abgussformen aus PLA innerhalb kurzer Zeit (80–90 h) neu gedruckt und in der Fertigung mit manuellem Aufwand (z. B. leichte Formänderung durch Abschleifen) angepasst werden können. Durch das verwendete Silikon weichen die gefertigten Schaufeln leicht vom Sollzustand ab, was im Rahmen einer frühen Entwicklungsphase und vor dem Hintergrund einer ersten Eigenschaftsabsicherung durch reale Funktionsmuster als akzeptabel angesehen wird. Diese Flexibilität der Werkzeugkavität hat den Nebeneffekt, dass die Infusion erfolgreich durchgeführt werden kann, auch wenn die Kavität und die eingelegte Preform leichte Abweichungen haben. Dies kann bei metallischen Werkzeugen, im Bereich zu hoher Preform-Verpressungen, zu nicht infiltrierten Stellen im Bauteil führen.

Zusammenfassung und Ausblick

Faserverbundwerkstoffe (FKV) eignen sich zum Einsatz in Bauteilen mit mechanischer Beanspruchung. Die Werkstoffanisotropie führt zu einem veränderten Strukturverhalten gegenüber metallischen Ausführungsformen. Derartige Änderungen sind beim Einsatz von Leichtbaustrukturen aus FKV in Triebwerkssystemen zu berücksichtigen. Ein modellbasierter konstruktiver Entwicklungsprozess erlaubt die Abbildung des Systems und der einzelnen Komponenten, wobei die durch Eigenschaftsänderungen auf Werkstoff- und Strukturebene implizierte Systemantwort berücksichtigt werden kann. Mit einem derart verknüpften Ansatz ist es möglich, Faserverbunde in bestehenden Systemen als Konstruktionswerkstoff zu berücksichtigen.

Die aufgebaute, verknüpfte Berechnungskette wird genutzt, um die hohen Anforderungen hinsichtlich virtuellem Funktions- und Tragfähigkeitsnachweis zu erfüllen und die virtuellen Prototypen auszulegen. Zur Reduktion des Entwicklungsrisikos kommen neben den virtuellen Prototypen reelle Funktionsmuster zum Einsatz. Durch 3D-Druck beim Werkzeugbau in Kombination mit einem metallischen Stammformwerkzeug ist es möglich, den in der Luftfahrt etablierten Prozess des Resin Transfer Mouldings (RTM)

zur effizienten Herstellung von Funktionsmustern einzusetzen. Die derart gefertigten strukturellen Leitschaukeln werden mechanischen Prüfungen unterzogen und das dabei angeregte Bauteilverhalten den Simulationsergebnissen gegenübergestellt. Weiterhin findet parallel die Fertigung von Leitschaukeln mit klassischen RTM-Werkzeugen statt. Die Tragfähigkeit von Leitschaukeln aus dem 3D-Druck basierten RTM-Verfahren wird dem von Leitschaukeln aus dem klassischen RTM-Verfahren gegenübergestellt.

Danksagung

Die Arbeiten fanden im Rahmen des Projekts „Entwicklung eines hocheffizienten verknüpften Produktentstehungsprozesses (PEP) für hybride Leichtbaustrukturen im Kontext von Industrie 4.0“ (PEP4.0, Förderkennzeichen 20X1717B) statt. Das Projekt wird im Rahmen des fünften Luftfahrtforschungsprogramms des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie BMWi gefördert.

Literaturverzeichnis

- [EU11] EUROPÄISCHE KOMMISSION (Hrsg.) (2011): Flightpath 2050, Europe's Vision for Aviation, Report of the High Level Group on Aviation Research, Luxembourg: Publications Office of the European Union, ISBN 978-92-79-19724-6
- [EU19] EUROPÄISCHE KOMMISSION (Hrsg.) (2019): *Der europäische Grüne Deal*. Brüssel, COM (2019) 640 final
- [Hai17] Haider, D. (2017): CONTINUOUS DATA MEASUREMENT AND ANALYSIS IN AUTOMATED MANUFACTURING PROCESSES FOR HYBRID LIGHTWEIGHT STRUCTURES. SAMPE Europe Conference 2017. Stuttgart
- [Hai20] Haider, D. (2020): ROBUST DEVELOPMENT, VALIDATION AND MANUFACTURING PROCESSES FOR HYBRID METAL-COMPOSITE LIGHTWEIGHT STRUCTURES. SAMPE Europe Conference 2020 Amsterdam - Netherlands
- [Hof19] Hoffmann, M. (2019): Process Optimization and On-Line Monitoring in the Recycling of Carbon Fibre Waste for the Re-Use in High-Grade Fibre Reinforced Plastics. Posterpräsentation J-5 in DGM (Veranst.): 22. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, 26. – 28. Juni 2019, Veranstaltungshalle Gartenschau Kaiserslautern. Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e.V. (DGM), Berlin, DE 2019.
- [VDI93a] VDI-Fachbereich Produktentwicklung und Mechatronik (Hrsg.) (1993): VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. VDI-Gesellschaft Produkt- und Prozessgestaltung
- [VDI93b] VDI-Fachbereich Produktentwicklung und Mechatronik (Hrsg.) (1993): VDI 2014 Blatt 2: Entwicklung von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbund; Konzeption und Gestaltung. VDI-Gesellschaft Produkt- und Prozessgestaltung
- [VDI19] VDI-Fachbereich Produktentwicklung und Mechatronik (Hrsg.) (2019): VDI 2221 Blatt 1: Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Modell der Produktentwicklung. VDI-Gesellschaft Produkt- und Prozessgestaltung
- [WiGeP20] Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktentwicklung (Hrsg.) (2020): WiGeP-Positionspapier: „Digitaler Zwilling“

[SAE17] SAE International (Hrsg.) (2017): Composite Materials Handbook-17, Volume 1: Guidelines for Characterization of Structural Materials. R-422.SET6, ISBN 978-0-7680-8450-4

Kontakt

Dr.-Ing. Sebastian Spitzer
Technische Universität Dresden
Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik
Holbeinstrasse 3
01307 Dresden
<http://tu-dresden.de/mw/ilk>