

Schlussbericht Teil I und II zu Nr. 8.2 NKBF 98

**Komplexe Leichtbau-Zwischengehäuse
in Faserverbundbauweise für Turbo-Fantriebwerke
neuer Generation**

KoLiBri

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

im Förderprogramm LuFo
unter dem Förderkennzeichen 20T1117A

Die Verantwortung für den Inhalt liegt beim Autor.

Berichterstatter (Projektleiter): Holger Schmalfluss Unterschrift:

R&T Management: Dr. Gabrielle Hilson Unterschrift:

Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG

Dahlewitz, 12.08.2016

Inhalt

I. Kurze Darstellung	5
1 Aufgabenstellung	6
2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	7
3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	8
3.1 Planungsstand bei Beginn des Vorhabens.....	8
3.2 Neuausrichtung und Umstrukturierung des Projektes	15
4 Wissenschaftlicher und technischer Stand bei Beginn des Vorhabens.....	21
4.1 Stand der Wissenschaft und Technik	21
4.2 Bisherige Arbeiten des Antragstellers.....	22
5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	24
II. Eingehende Darstellung	25
1 Erzielte Ergebnisse	25
1.1 Designkonzept und Auslegungsmethodik.....	25
1.2 Funktionsmusterherstellung	39
1.3 Funktionsmusterprüfung.....	44
1.4 Fertigungsbezogene Modellierungswerkzeuge	48
2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	64
3 Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeit	64
4 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	64
5 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	64
6 Veröffentlichungen	64

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: KoLiBri Projektstrukturplan bei Beginn des Vorhabens	8
Abbildung 2: KoLiBri Projektstrukturplan nach Neuausrichtung und Restrukturierung	16
Abbildung 3: Mehrachsig beanspruchte Triebwerkskomponenten Rolls-Royce BR725	25
Abbildung 4: Systematik zur Definition von Bauteilklassen	26
Abbildung 5: Feuerzonen eines Triebwerkes	27
Abbildung 6: Kriterien zur Bauweisenbewertung	29
Abbildung 7: Unterteilung des IMC in Bereiche	29
Abbildung 8: Bauweisenvarianten für ein IMC	30
Abbildung 9: Gesamtbewertung der vorausgewählten Bauweisen	31
Abbildung 10: CAD-Modellentwurf eines IMC in Hybridbauweise (Bauweise Nr. 10).....	32
Abbildung 11: CAD-Geometrie Fan Gehäuse.....	33
Abbildung 12: Auslegungs- und Validierungsschema in Anlehnung an EASA AMC 20-29	34
Abbildung 13: Gesamtansicht des Simulationsmodells (Gehäuse- und Rotorbaugruppe).....	35
Abbildung 14: Details des Simulationsmodells (Gehäusebaugruppe).....	35
Abbildung 15: Fanschaufeleinschlag Phase 1	36
Abbildung 16: Fanschaufeleinschlag Phase 2	37
Abbildung 17: Fanschaufeleinschlag Phase 3	37
Abbildung 18: Versagensprognose Faserverbundwerkstoff	38
Abbildung 19: Bewertungsmatrix für Faserwerkstoffe	39
Abbildung 20: Bewertungsmatrix für Matrixwerkstoffe	40
Abbildung 21: Ablaufdiagramm der Faserverbund Fan Gehäusefertigung.....	41
Abbildung 22: Werkzeug zur Herstellung eines Faserverbund Fan Gehäuses	42
Abbildung 23: Faserverbund Fan Gehäuse	43
Abbildung 24: Baugruppe Fan Gehäuse.....	43
Abbildung 25: CAD-Modell des Rotorprüfstandes.....	45
Abbildung 26: Rotorprüfstand	46
Abbildung 27: Funktionsmustersaufbau	46
Abbildung 28: Ansicht des Prüfstandinnenraumes nach der Funktionsmusterprüfung	47
Abbildung 29: Gewebe-Simulation Wisetex / Digital Element Method (DEM)	50
Abbildung 30: Validierung der Faserverläufe im Gewebe (WiseTex und DEM)	51
Abbildung 31: Vergleich des Faservolumengehaltes nach Kompaktierungsgrad	52
Abbildung 32: Prozesskette zur FE-Modell-Generierung	53
Abbildung 33: 2D Simulationsansatz zum Wickeln rotationssymmetrischer Bauteile	54
Abbildung 34: Modellaufbau der gewickelten Faserarchitektur	54
Abbildung 35: Benutzeroberfläche des Modellierungswerkzeuges für das Faserwickeln	55
Abbildung 36: Rohprobekörper	56
Abbildung 37: Simulationskette für die Vorhersage von Mikroskopischen Luftblasen	57
Abbildung 38: Makroskopische und mikroskopische Luftblasenbildung	58
Abbildung 39: ABAQUS RVE-Fließmodell eines gekreuzten Faserbündels	59
Abbildung 40: Modell einer Faserverbund Triebwerkswelle für die Infiltrationssimulation	61
Abbildung 41: Probekörperherstellung und Prüfvorrichtung für die Permeabilitätsmessung	61
Abbildung 42: Infiltrationssimulationsergebnisse und CT- Querschnittsmessungen.....	62
Abbildung 43: Infiltrationssimulation für verschiedene Lagenorientierungen	63

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bauteilklassen und Vertreter	27
Tabelle 2: Vergleich der Softwarelösungen für die Gewebemodellierung	49

I. Kurze Darstellung

Flugtriebwerke sind bei höchsten Sicherheitsanforderungen einer kontinuierlichen Weiterentwicklung hinsichtlich einer Reduzierung der Herstellkosten, des spezifischen Treibstoffverbrauchs sowie einer verringerten Schadstoffemission unterworfen. Diese Weiterentwicklungen basieren zum Teil auf dem Einsatz von Leichtbauweisen mit Faserverbundbauteilen, deren Qualität, Gewicht und Kosten gesteigert werden muss, um Lebensdauer, Zuverlässigkeit im Betrieb und insgesamt geringe Lebenswegkosten zu erzielen. Die Entwicklungszyklen müssen kurz und zuverlässig sein und die anschließende Betreuung der Triebwerke im Einsatz muss effektiv und ökonomisch erfolgen.

Die Faserverbundtechnologie bietet die Möglichkeit, hohe Leichtbaupotentiale auszuschöpfen, wenn Material- und Fertigungskonzepte gemeinsam entwickelt werden, die es erlauben, höchste Lasten durch komplexe integrale Bauteile zu leiten. Fertigungsverfahren mit erhöhtem Automatisierungsgrad ermöglichen die angestrebte Kostenreduktion und Erhöhung der Bauteilqualität. Die Vielzahl der verfügbaren Fertigungsverfahren und Faserarchitekturen erfordern neuartige Auslegungsverfahren, die eine Korrelation zwischen Materialsystem, Faserarchitektur, Fertigungsmethode und Bauteileigenschaften integrativ einbinden. In diesem Verbundvorhaben entwickelte Methoden fokussieren auf Auslegungsprozesse, die mit automatisiert hergestellten, 3-dimensionalen Faserverbundstrukturen kompatibel sind und in die praktische Nachweisführung mit Hilfe struktureller Funktionsmuster auf dem NASA-Technologie-reifegrad 3 (TRL3) einfließen.

1 Aufgabenstellung

Im Verbundvorhaben KoLiBri sollen unter vorgegebenen geometrischen Voraussetzungen Material- und Fertigungskonzepte entwickelt werden, die es erlauben, höchste Lasten durch komplexe, integrale Bauteile zu leiten. Dieser Ansatz zielt auf reduzierte Herstellkosten und erhöhte Bauteilqualität ab. Die Vielzahl an verfügbaren Fertigungsmethoden und Faserarchitekturen erfordern neuartige Auslegungsverfahren, welche das Materialsystem, die Faserarchitektur, den Fertigungsprozess und die finalen Bauteileigenschaften integrativ miteinander verbinden.

Der Untersuchungsschwerpunkt liegt im Verbundvorhaben KoLiBri auf der Kombination trocken abgelegter 3D-Faserarchitekturen mit Harz-Infiltrationsverfahren, wie RTM (Resin Transfer Moulding) in automatisierten Prozessen.

Die aus vorangegangenen Projekten gewonnenen entwicklungsmethodischen Erkenntnisse sollen zu Verfahren und Methoden weiterentwickelt werden, die für einen vollständigen und mit typischen Produktentwicklungszeiten kompatiblen Auslegungs- und Fertigungsprozess für typische 3-dimensionale Faserverbundstrukturen notwendig sind.

Bei Abschluss des Vorhabens soll der NASA-Technologiereifegrad 3 (TRL3) anhand gefertigter 3-dimensionaler Triebwerksstruktursegmente nachgewiesen werden.

2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Grundlage für die Definition des Vorhabens sind die Kernkompetenzen der deutschen Rolls-Royce Standorte in der Rolls-Royce Gruppe:

- Zentrum für zivile Zweiwellentriebwerke oberhalb 12.000lb Startschub
 - Kompetenz für die Integration von Gesamttriebwerken und Antriebssystemen
 - Logistik, Montage, Test und Betreuungsleistungen
- Entwicklungskompetenz für alle Komponenten des Kerntriebwerks
 - Hochdruckverdichterkompetenz für Triebwerke der mittleren Schubklasse (Zwei- und Dreiwellenarchitektur)
 - Brennkammerkompetenz für Triebwerke der mittleren Schubklasse (Zwei und Dreiwellen)
 - Hochdruckturbinenkompetenz für Zweiwellentriebwerke
- Produktionszentrum für Hochdruckverdichter und Rotoren

Seit September 2010 ist RRD auch das Kompetenzzentrum für die Triebwerksgondel und den Schubumkehrer innerhalb der RR Gruppe.

In dieser Funktion soll RRD die Fähigkeiten auf diesem Gebiet über den gesamten Produktionszyklus bündeln und weiter entwickeln. Alle hierzu erforderlichen Kompetenzen wurden an RRD übertragen. Von besonderer Bedeutung ist dabei das Supply Chain Management zur Erschließung und Etablierung neuer Optionen in der derzeit sehr begrenzten Zulieferlandschaft.

Wesentlicher Bestandteil des nationalen Aktionsplanes "High-Tech Strategie 2020 für Deutschland" ist die Zielsetzung, den Unternehmen am Standort Deutschland international vergleichbare Rahmenbedingungen und damit eine faire Chance zu bieten, auch künftig technologisch anspruchsvolle Arbeitsanteile mit hoher Wertschöpfung zu akquirieren und dadurch nachhaltig Arbeitsplätze in Deutschland zu schaffen.

Das Rolls-Royce Deutschland Projektportfolio beinhaltet einen signifikanten Anteil von F&T-Beiträgen durch Partner und konzentriert sich im Wesentlichen auf das etablierte Netzwerk strategischer Partner in Deutschland.

Das Vorhaben KoLiBri baut auf diesem Netzwerk auf und erforscht Themen im Bereich Fa-serverbundwerkstoffe, die für den Standort in Dahlewitz von strategischer Bedeutung sind.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

3.1 Planungsstand bei Beginn des Vorhabens

Das Gesamtvorhaben KoLiBri gliedert sich in drei Arbeitspakete, die durch Rolls-Royce Deutschland und die Partner bearbeitet werden. Die zu Beginn des Vorhabens geplante Projektstruktur ist in dem Projektstrukturplan in Abbildung 1 dargestellt. Die Gesamtlaufzeit ist mit 36 Monaten geplant. Die ausführlichen Beschreibungen für die einzelnen Arbeitspakete ist den folgenden Abschnitten zu entnehmen.

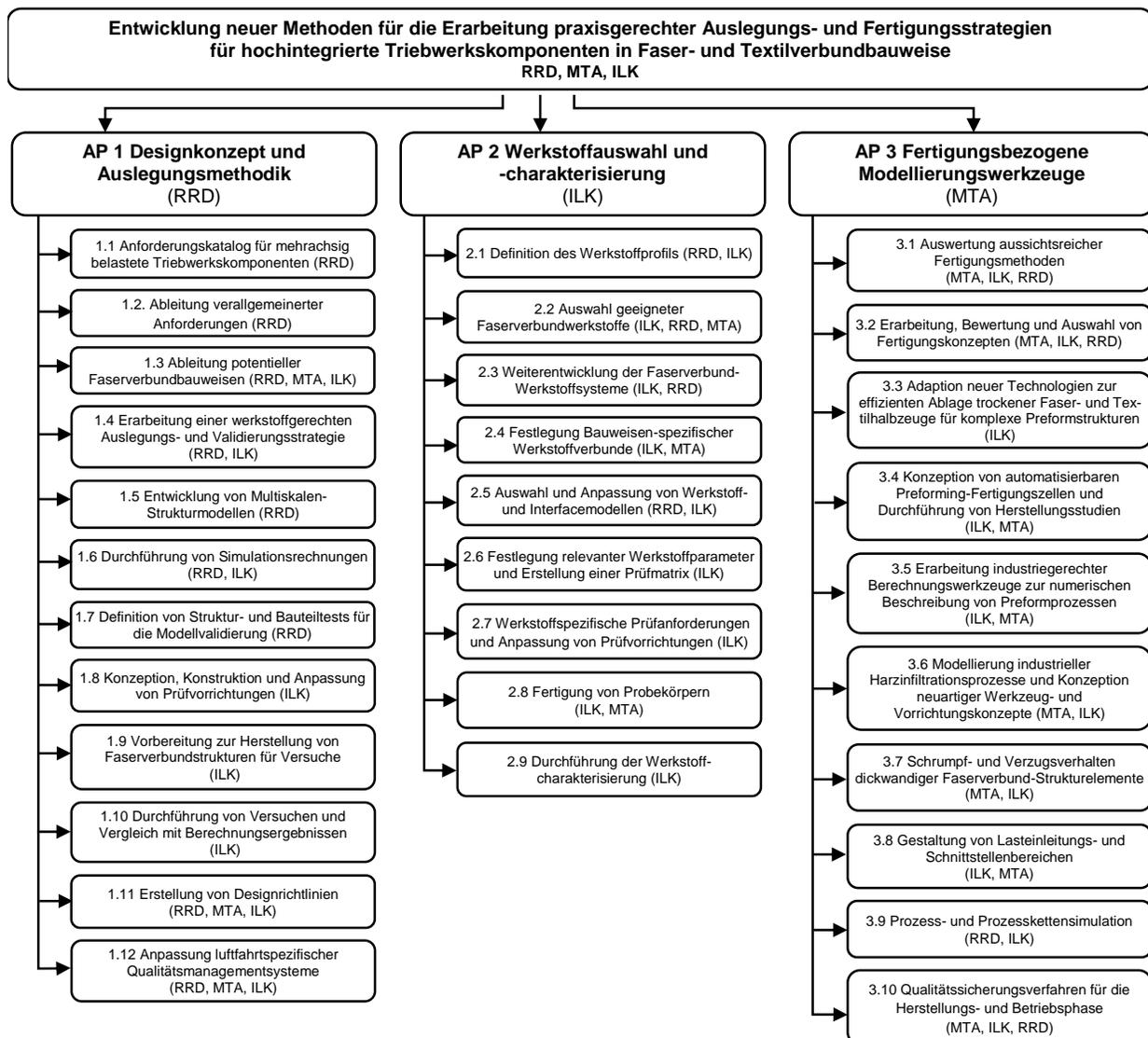


Abbildung 1: KoLiBri Projektstrukturplan bei Beginn des Vorhabens

AP 1: Designkonzept und Auslegungsmethodik

AP 1.1: Anforderungskatalog für mehrachsig belastete Triebwerkskomponenten

Zur Identifikation potentiell für Leichtbauweisen mit Faserverbundwerkstoffen geeigneter Komponenten ist ein Triebwerks-Screening inklusive der Analyse bauteilspezifischer Anforderungen durchzuführen.

AP 1.2: Ableitung verallgemeinerter Anforderungen

Die in AP 1.1 ermittelten Anforderungen werden genutzt, um die Einteilung potentieller Faserverbund-Triebwerkskomponenten in Bauteilklassen durchzuführen. Dabei sind allgemeine fertigungstechnische, mechanische sowie kosten- und validierungsspezifische Anforderungen für die gefundenen Bauteilklassen festzulegen.

AP 1.3: Ableitung potentieller Faserverbundbauweisen

Auf der Basis der spezifischen Anforderungen werden für ausgewählte Bauteile mögliche Faserverbundbauweisen unter Berücksichtigung einer industrialisierten Fertigung entworfen bzw. abgeleitet. Ansatzpunkte für eine Weiterentwicklung von Bauweisen sind dem Forschungsvorhaben OPTITHECK zu entnehmen.

AP 1.4: Erarbeitung einer werkstoffgerechten Auslegungs- und Validierungsstrategie

Unter besonderer Berücksichtigung möglicher Fertigungsverfahren für die in AP 1.3 betrachteten Komponenten sind skalenübergreifende Auslegungsansätze anzupassen, Simulationssoftware einschließlich Schnittstellen zu definieren, Versuche zu planen und in einer Auslegungs- und Validierungsstrategie zusammenzuführen.

AP 1.5: Entwicklung von Multiskalen-Strukturmodellen

Die in AP 1.4 erarbeiteten Auslegungs- und Validierungsstrategien sind auf die in AP 1.3 ausgewählten Bauteile anzuwenden. Auf Basis der in AP 2 erarbeiteten Materialmodelle und den experimentell ermittelten Materialdaten sollen Multiskalen-Simulationsmodelle erstellt werden. Die Verknüpfung von Fertigungsverfahren und simulatorischer Auslegung erfolgt über die Fertigungsprozessmodellierung mit Hilfe der in AP 3 bestimmten Fertigungsparameter.

AP 1.6: Durchführung der Simulationsrechnungen

Die in AP 1.5 entwickelten Simulationsmodelle werden mit den in AP 2 gemessenen Werkstoffkennwerten beschrieben auf ausgewählte generische Faserverbundstrukturen angewendet, um deren Skalierbarkeit zu überprüfen und mit Versuchsergebnissen aus AP 3 abzugleichen.

AP 1.7: Definition von Struktur- und Bauteiltests für die Modellvalidierung

Unter Verwendung der in AP 1.4 festgelegten Validierungsstrategie sind angepasste Struktur- und Bauteiltests zu definieren, um die Validierung der in AP 1.5 erarbeiteten Simulationsmodelle zu ermöglichen.

AP 1.8: Konzeption, Konstruktion und Anpassung von Prüfvorrichtungen

Gemäß den in AP 1.7 festgelegten Tests sind die am ILK relevanten Prüfstände anzupassen.

AP 1.9: Vorbereitung zur Herstellung von Faserverbundstrukturen für Versuche

Für die Validierung von Simulationsrechnungen soll die Ableitung repräsentativer Prüfkörper für die in AP 1.3 ausgewählten Faserverbund-Triebwerkskomponenten erfolgen. Im Anschluss an die Überprüfung der Fertigungsmöglichkeiten sind die Prüfkörper gemäß der in AP 3 ermittelten Fertigungsmethoden herzustellen.

AP 1.10: Durchführung von Versuchen und Vergleich mit Berechnungsergebnissen

Durchführung von statischen und dynamischen Tests. Vergleich und Bewertung von experimentell und numerisch ermittelten Ergebnissen sowie Anpassung der Simulationsmodelle.

AP 1.11: Erstellung von Designrichtlinien

Die im Rahmen der Validierungsstrategie generierten Ergebnisse sind auszuwerten und zur Erarbeitung bauteilklassenspezifischer, verallgemeinerter Designrichtlinien genutzt werden.

AP 1.12: Anpassung luftfahrtspezifischer Qualitätsmanagementsysteme

Am Beispiel ausgewählter Faserverbund-Triebwerkskomponenten soll eine Anpassung von Qualitätssystemen erarbeitet werden.

AP 2: Werkstoffauswahl und -Charakterisierung für 3-dimensionale dickwandige Geometrien

AP 2.1: Definition des Werkstoffprofils

Allgemeine und spezielle Anforderungen der Komponenten- und Elementebene des AP 1 sind auf die Werkstoffebene für mehrachsig belastete Faserverbundstrukturen zu überführen. Unter Einbezug der Erkenntnisse aus den Forschungsvorhaben LEVITA und OPTITHECK sind die Anforderungen in ein Werkstoffprofil zusammenzufassen, mit dem eine Bewertung potentiell geeigneter Werkstoffsysteme ermöglicht wird.

AP 2.2: Auswahl geeigneter Faserverbundwerkstoffe

Aufbauend auf den in AP 2.1 erarbeiteten Definitionen werden Faserverbundwerkstoffe ausgewählt und deren Eignung für ausgewählte Bauteile bzw. Bauteilklassen identifiziert und im Partnerverbund abgestimmt.

AP 2.3: Weiterentwicklung der Faserverbund-Werkstoffsysteme

Aufbauend auf den Erkenntnissen der Forschungsvorhaben LEVITA und OPTITHECK und den Erfahrungen aus dem Triebwerksbau sind Defizite und Verbesserungspotentiale bisher eingesetzter Werkstoffsysteme sowie die Anwendungsmöglichkeiten neuartiger, verbesserter Werkstoffsysteme für ausgewählte Bauteile bzw. Bauteilklassen zu überprüfen.

AP 2.4: Festlegung bauweisenspezifischer Werkstoffverbunde

Auf Basis zu definierender Kriterien soll eine Bewertung aller zur Auswahl stehenden Werkstoffsysteme entsprechend den Anforderungen aus AP 1 und AP 2.1 vorgenommen werden.

AP 2.5: Auswahl und Anpassung von Werkstoff- und Interfacemodellen

Das Verhalten ausgewählter Werkstoffsysteme auf triebwerkspezifische Beanspruchungen ist auf charakteristische Besonderheiten bzw. Parameter zu überprüfen. Mit einem anschließenden Screening potentiell verwendbarer Werkstoff- und Interfacemodelle einschließlich ihres Parameterumfangs ist deren Tauglichkeit für die Industriepraxis zu ermitteln.

AP 2.6: Festlegung der Werkstoffparameter und Erstellung einer Prüfmatrix

Unter Berücksichtigung von luftfahrtgerechten Qualitätsanforderungen sind entsprechend der in AP 1.4 definierten Auslegungs- und Validierungsstrategie erforderliche Werkstoffparameter zu ermitteln und in einer Prüfmatrix zusammenzufassen.

AP 2.7: Werkstoffspezifische Prüfanforderungen und Anpassung von Prüfvorrichtungen
Unter Berücksichtigung luftfahrtrelevanter Prüfnormen und Validierungsrichtlinien sind Prüfstrategien zu erarbeiten und Prüfkörper zu definieren, aufgrund derer Anpassungen für die am ILK vorhandenen Prüfvorrichtungen erarbeitet werden müssen.

AP 2.8: Fertigung von Probekörpern

Dieses Teilarbeitspaket beinhaltet die Fertigung von Probekörpern für die in AP 2.6 geplante Werkstoffcharakterisierung.

AP 2.9: Durchführung der Werkstoffcharakterisierung

In diesem Arbeitspaket werden die in AP 2.6 definierten Versuche mit Hilfe der in AP 2.7 angepassten Prüfvorrichtungen durchgeführt. Anschließend sind Kennwertfunktionen zu berechnen.

AP 3: Fertigungsbezogene Modellierungswerkzeuge

AP 3.1: Auswertung aussichtsreicher Fertigungsmethoden

Der Kenntnisstand zur Fertigungstechnik aus den Forschungsvorhaben OPTITHEK und LEVITA soll analysiert werden. In Abstimmung mit den Projektpartnern sind die Ergebnisse entsprechend der Zielsetzung in KoLiBri zu bewerten und für die weitere Bearbeitung auszuwählen. Mit der Ergebnisauswahl sollen aussichtreiche Fertigungsmethoden für Faserverbund-Triebwerkskomponenten abgeleitet werden.

AP 3.2: Erarbeitung, Bewertung und Auswahl von Fertigungskonzepten

In diesem Teilarbeitspaket sollen Fertigungsverfahren für die in AP1 identifizierten Bauteilklassen erarbeitet und einer Bewertung hinsichtlich bauteilspezifischer Charakteristika unterzogen werden. Mit der Auswahl von Fertigungsprozessketten nach zuvor definierten Kriterien, wie z. B. Zulassung, Reproduzierbarkeit, Kosten, Qualität usw. kann eine Konkretisierung für ausgewählte Bauteile erfolgen.

AP 3.3: Adaption neuer Technologien zur effizienten Ablage trockener Faser- und Textilhalbzeuge für komplexe Preformstrukturen

Inhalt des Teilarbeitspaketes ist die Adaption neuer Technologien zur Faserablage mit hohem Automatisierungspotential für ausgewählte Bauteile. Fertigungstechnische Grenzen für die Ablage von Faserhalbzeugen sind mittels experimenteller Vorversuche an Substrukturen zu ermitteln.

AP 3.4: Konzeption von automatisierbaren Preforming-Fertigungszellen und Durchführung von Herstellungsstudien

Mit den Erkenntnissen des AP 3.3 ist eine Konzeption von Fertigungszellen für die automatisierte Preformfertigung für ausgewählte Bauteile zu erarbeiten, um später Herstellungsstudien entsprechend den gewählten Prozessketten durchzuführen.

AP 3.5: Erarbeitung industriegerechter Berechnungswerkzeuge zur numerischen Beschreibung von Preformprozessen

Für die numerische Beschreibung von Preformprozessen soll ein Screening kommerzieller Software-Produkte durchgeführt werden. Auf Basis einer Softwareauswahl sind industriegerechte Berechnungswerkzeuge, fokussiert auf einfache Bedienbarkeit, mit einer durchgängigen Berechnungskette vom Preforming zur strukturellen Bauteilanalyse zu erarbeiten und an ausgewählten Bauteilen zu überprüfen.

AP 3.6: Modellierung industrieller Harzinfiltrationsprozesse und Konzeption neuartiger Werkzeug- und Vorrichtungskonzepte

Industrielle Harzinfiltrationsprozesse sind bezogen auf ihre Prozessparameter zu untersuchen und anschließend für ausgewählte Bauteile und bauteilspezifische Harzsysteme numerisch zu modellieren. Mit Hilfe von numerischen Studien sollen neuartige Werkzeug- und Vorrichtungskonzepte für einen optimierten Infiltrationsprozess abgeleitet werden.

AP 3.7: Schrumpf- und Verzugverhalten dickwandiger Faserverbund-Strukturelemente

Für die verbesserte Vorhersage des Schrumpf- und Verzugverhalten dickwandiger Faserverbund-Strukturelemente sollen numerische Modelle erstellt werden. Notwendige Eingangs- bzw. Werkstoffparameter sind im Vorfeld experimentell zu ermitteln. Abschließend erfolgt die Verifizierung der numerisch generierten Ergebnisse mit Fertigungsversuchen an ausgewählten Bauteilen.

AP 3.8: Gestaltung von Lasteinleitungs- und Schnittstellenbereichen

Zur fertigungstechnischen und werkstoffmechanischen Integration metallischer Lasteinleitungselemente in Faserverbundstrukturen sind die Ergebnisse aus OPTITHEK und LEVITA auszuwerten, um mögliche Lasteinleitungs- und Schnittstellenprobleme zu identifizieren und kategorisieren. Auf Grundlage dessen sollen Konzepte und Gestaltungsrichtlinien für eine fertigungs- und beanspruchungsgerechte Lasteinleitung erarbeitet werden, die im Anschluss mit Hilfe von vereinfachten numerischen Tragfähigkeitsberechnungen sowie experimentellen Untersuchungen an Substrukturen zu überprüfen sind.

AP 3.9: Prozess- und Prozesskettensimulation

Die im AP 1.5 und AP 3.5 erstellten zur Simulationslösungen sind in einer Prozesskettensimulation zu verknüpfen. Existierende kommerzielle Software wird dafür mit spezifisch angepassten Schnittstellen und Subroutinen erweitert. Unter Verwendung der zuvor experimentell ermittelten Werkstoffeigenschaften erfolgt die Erprobung der Simulationstools an ausgewählten Beispielen.

AP 3.10: Qualitätssicherungsverfahren für die Herstellungs- und Betriebsphase

Nach luftfahrtgerechten Qualitätsmanagementsystemanforderungen sind Qualitätssicherungsverfahren hinsichtlich Fertigungsprozessüberwachung und -steuerung für die bevorzugten Preform- und Infiltrationsverfahren zu konzipieren und anhand von ausgewählten Beispielen auf Praxistauglichkeit zu überprüfen. Aufbauend auf dieser Überprüfung sind methodische Defizite zu beseitigen und verbesserte Prüfmethode für ausgewählte Faserverbund-Triebwerksstrukturen zu erarbeiten.

3.2 Neuausrichtung und Umstrukturierung des Projektes

Nach Ablauf des ersten Projektjahres im 1. Halbjahr 2014 erforderten veränderte Marktbedingungen und der Start eines neuen Triebwerkprogrammes von RRD zeitnah neue Erkenntnisse für ein Faserverbund Fan Gehäuse. Aufgrund des passenden thematischen Bezuges des Forschungsvorhabens KoLiBri mit seinen Bauteilklassen Gehäuse bzw. Ringstrukturen wurde die inhaltliche Neuausrichtung des Projektes auf das Forschungsziel Fan Gehäuse vorgenommen. Der aus der Neuausrichtung des Projektes resultierende, veränderte Projektstrukturplan ist in Abbildung 2 dargestellt.

Die Fokussierung der Forschungsabsicht auf ein Faserverbund Fan Gehäuse bedeutete für das Vorhaben die Abkehr von generischen und die Hinwendung zu bauteilspezifischen Fragestellungen und Randbedingungen. Das konkretisierte Forschungsziel ist es, eine Faserverbundstruktur zu entwickeln, die konform zum ursprünglichen Projektantrag in einem automatisierten Fertigungsverfahren hergestellt wird und anschließend in einem vereinfachten Testaufbau hochdynamischer Belastung unterzogen wird.

Die aus dieser Zielanpassung abgeleitete Projektrestrukturierung liefert die Unterteilung des Projektes in vier Arbeitspakete: AP 1: Designkonzept und Auslegungsmethodik, in dem die Tragfähigkeit des Faserverbund Fan Gehäuses unter hochdynamischer Belastung die Hauptfragestellung darstellt; AP 2: Funktionsmusterherstellung, in dem die Fertigung eines Faserverbund Fan Gehäusemusters in Originalgröße entsprechend den Triebwerksdimensionen realisiert wird; AP 3: Funktionsmusterprüfung, in dem ein Funktionsmuster, konform zu triebwerksnahen Randbedingungen, einem Fanschau-feleinschlagversuch (Fan Blade Off-Versuch) unterzogen wird.

Die im ersten Projektjahr bereits begonnenen Arbeiten auf dem Gebiet der fertigungsbezogenen Modellierungswerkzeuge und die speziell hierfür bereits geschlossenen FuE-verträge werden ungeachtet der oben genannten Fokussierung fortgeführt. Deshalb sind die entsprechenden Projekthinhalte in ein weiteres Arbeitspaket, das AP 4: Fertigungsbezogene Modellierungswerkzeuge, ausgegliedert, in dem vorwiegend generische Fragestellungen der Fertigungsprozessmodellierung in Kombination mit der Analyse mechanischer Werkstoffeigenschaften betrachtet werden.

Aufgrund der Fokussierung der Arbeiten auf das Faserverbund Fan Gehäuse sind die Teilarbeitspakete 1.9, 1.11, 1.12, 2.3, 3.7 und 3.10 aus der ursprünglichen Projektstruktur gestrichen bzw. nicht in die neue Projektstruktur übernommen worden. Nach der Restrukturierung wurden drei Teilarbeitspakete als neue Arbeitsinhalte in das Projekt aufgenommen. Die Arbeitspakete 1.5, 1.6 sowie alle verbleibenden Teilarbeitspakete im Arbeitspaket 2 und 3 der ursprünglichen Projektstruktur gehen als modifizierte Teilarbeitspakete in die veränderte Projektstruktur über. Die ausführlichen Beschreibungen für die einzelnen Arbeitspakete sind den folgenden Abschnitten zu entnehmen.

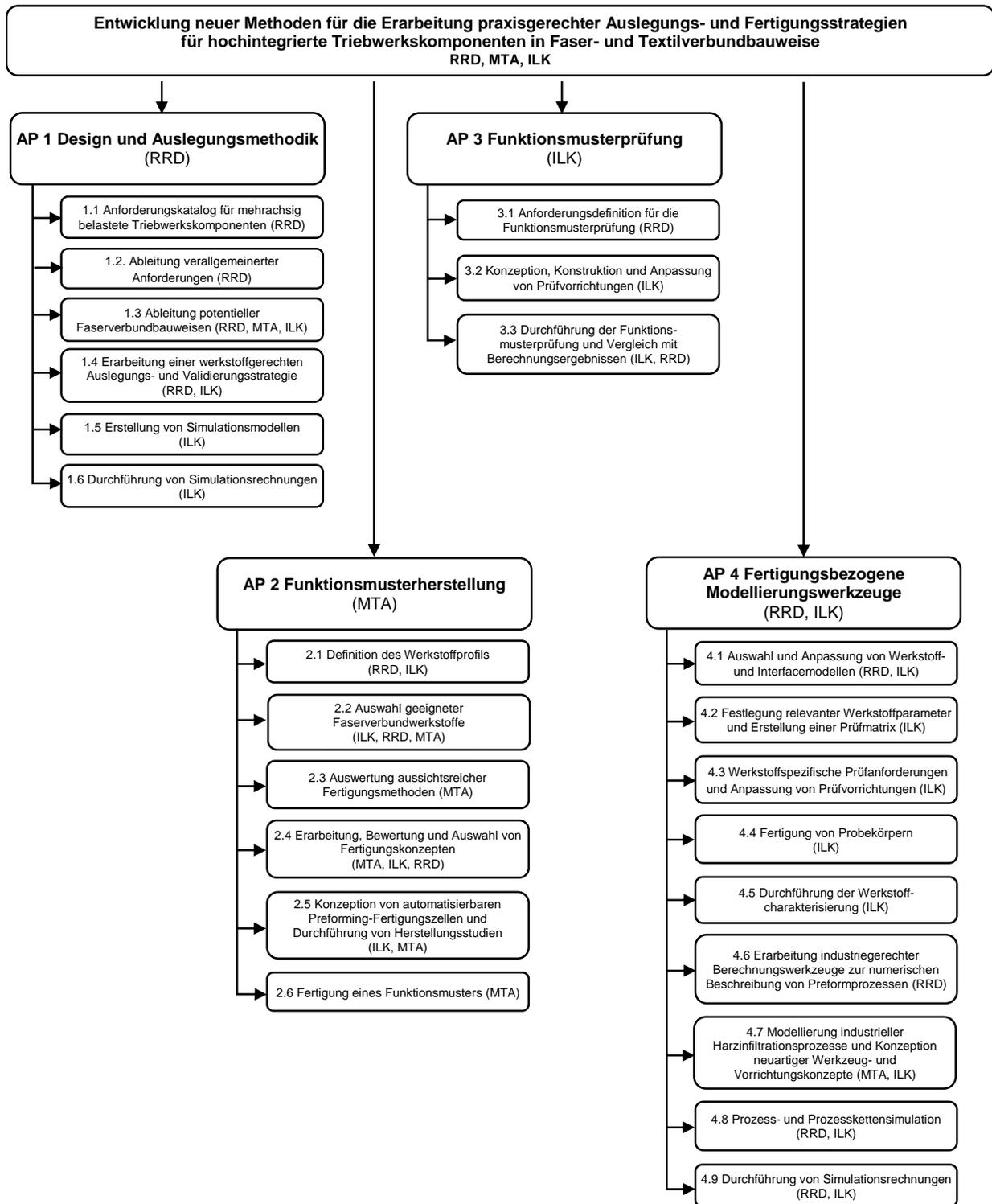


Abbildung 2: KoLiBri Projektstrukturplan nach Neuausrichtung und Restrukturierung

AP 1: Designkonzept und Auslegungsmethodik***AP 1.1: Anforderungskatalog für mehrachsig belastete Triebwerkskomponenten***

Zur Identifikation potentiell für Leichtbauweisen mit Faserverbundwerkstoffen geeigneter Komponenten ist ein Triebwerks-Screening inklusive der Analyse bauteilspezifischer Anforderungen durchzuführen.

AP 1.2: Ableitung verallgemeinerter Anforderungen

Die in AP 1.1 ermittelten Anforderungen werden genutzt, um die Einteilung potentieller Faserverbund-Triebwerkskomponenten in Bauteilklassen durchzuführen. Dabei sind allgemeine fertigungstechnische, mechanische sowie kosten- und validierungsspezifische Anforderungen für die gefundenen Bauteilklassen festzulegen.

AP 1.3: Ableitung potentieller Faserverbundbauweisen

Auf der Basis der spezifischen Anforderungen werden für ausgewählte Bauteile mögliche Faserverbundbauweisen unter Berücksichtigung einer industrialisierten Fertigung entworfen bzw. abgeleitet. Besonderer Fokus ist auf das Fan Gehäuse zu legen.

AP 1.4: Erarbeitung einer werkstoffgerechten Auslegungs- und Validierungsstrategie

Unter besonderer Berücksichtigung möglicher Fertigungsverfahren für die in AP 1.3 betrachteten Komponenten sind Auslegungsansätze zu definieren, Versuche zu planen und in einer Auslegungs- und Validierungsstrategie zusammenzuführen.

AP 1.5: Erstellung von Simulationsmodellen

Auf Basis der Auslegungs- und Validierungsstrategien sollen Simulationsmodelle für die in AP 1.3 ausgewählten Faserverbund-Triebwerkskomponenten erstellt werden.

AP 1.6: Durchführung der Simulationsrechnungen

Mit den in AP 1.5 entwickelten Simulationsmodellen ist die Tragfähigkeit ausgewählter Faserverbund-Triebwerkskomponenten unter komplexen, hochdynamischen Belastungen zu untersuchen und mit Versuchsergebnissen aus AP 3 abzugleichen.

AP 2: Funktionsmusterherstellung

AP 2.1: Definition des Werkstoffprofils

Allgemeine und spezielle Anforderungen der Komponenten- und Elementebene des AP 1 sind auf die Werkstoffebene für mehrachsig belastete Faserverbundstrukturen zu überführen und in ein Werkstoffprofil zusammenzufassen, mit dem eine Bewertung potentiell geeigneter Werkstoffsysteme ermöglicht wird.

AP 2.2: Auswahl geeigneter Faserverbundwerkstoffe

Aufbauend auf den in AP 2.1 erarbeiteten Definitionen werden Faserverbundwerkstoffe ausgewählt und deren Eignung für ausgewählte Bauteile identifiziert und im Partnerverbund abgestimmt.

AP 2.3: Auswertung aussichtsreicher Fertigungsmethoden

Der Kenntnisstand zur Fertigungstechnik aus den Forschungsvorhaben OPTITHEK und LEVITA soll analysiert werden. In Abstimmung mit den Projektpartnern sind die Ergebnisse entsprechend der Zielsetzung in KoLiBri zu bewerten, um aussichtsreiche Fertigungsmethoden für ausgewählte Faserverbund-Komponenten abzuleiten.

AP 2.4: Erarbeitung, Bewertung und Auswahl von Fertigungskonzepten

In diesem Teilarbeitspaket sollen Fertigungsverfahren erarbeitet und einer Bewertung hinsichtlich bauteilspezifischer Charakteristika unterzogen werden. Mit der Auswahl von Fertigungsprozessketten nach zuvor definierten Kriterien, wie z. B. Zulassung, Reproduzierbarkeit, Kosten, Qualität usw. kann eine Konkretisierung für ausgewählte Bauteile erfolgen.

AP 2.5: Konzeption von automatisierbaren Preforming-Fertigungszellen und Durchführung von Herstellungsstudien

Für die automatisierte Preformfertigung sind Fertigungszellen zu konzipieren um Herstellungsstudien entsprechend den gewählten Prozessketten durchzuführen.

AP 2.6: Fertigung eines Funktionsmusters

Mit den gewählten Fertigungsmethoden und den erarbeiteten Prozessketten sollen in der Praxis umgesetzt werden, in dem ein Full-Scale Funktionsmuster hergestellt und anschließend einer Funktionsüberprüfung in AP 3 unterzogen wird.

AP 3: Funktionsmusterprüfung

AP 3.1: Anforderungsdefinition für die Funktionsmusterprüfung

Unter Verwendung der in AP 1.4 festgelegten Validierungsstrategie ist die Anforderung für die Prüfung des im AP 2 hergestellten Funktionsmusters zu definieren.

AP 3.2: Konzeption, Konstruktion und Anpassung von Prüfvorrichtungen

Gemäß den in AP 3.1 festgelegten Prüfanforderungen sind die am ILK relevanten Prüfstände anzupassen.

AP 3.3: Durchführung von Versuchen und Vergleich mit Berechnungsergebnissen

Durchführung einer Funktionsmusterprüfung gemäß triebwerksnahen Randbedingungen. Vergleich und Bewertung von experimentell und numerisch ermittelten Ergebnissen sowie Anpassung der Simulationsmodelle.

AP 4: Fertigungsbezogene Modellierungswerkzeuge

AP 4.1: Auswahl und Anpassung von Werkstoff- und Interfacemodellen

Das Verhalten ausgewählter Werkstoffsysteme auf triebwerkspezifische Beanspruchungen ist auf charakteristische Besonderheiten bzw. Parameter zu überprüfen. Mit einem anschließenden Screening potentiell verwendbarer Werkstoff- und Interfacemodelle einschließlich ihres Parameterumfangs ist deren Tauglichkeit für die Industriepaxis zu ermitteln.

AP 4.2: Festlegung der Werkstoffparameter und Erstellung einer Prüfmatrix

Unter Berücksichtigung der in AP 1.4 definierten Auslegungs- und Validierungsstrategie sind erforderliche Werkstoffparameter gemäß der in AP 2.5 ausgewählten Werkstoffmodelle zu ermitteln und in einer Prüfmatrix zusammenzufassen.

AP 4.3: Werkstoffspezifische Prüfanforderungen und Anpassung von Prüfvorrichtungen

Unter Berücksichtigung luftfahrtrelevanter Prüfnormen und Validierungsrichtlinien sind Prüfstrategien zu erarbeiten und Prüfkörper zu definieren, aufgrund derer Anpassungen für die am ILK vorhandenen Prüfvorrichtungen erarbeitet werden müssen.

AP 4.4: Fertigung von Probekörpern

Dieses Teilarbeitspaket beinhaltet die Fertigung von Probekörpern für die in AP 4.2 geplante Werkstoffcharakterisierung.

AP 4.5: Durchführung der Werkstoffcharakterisierung

In diesem Arbeitspaket werden die in AP 4.2 definierten Versuche mit Hilfe der in AP 4.3 angepassten Prüfvorrichtungen durchgeführt.

AP 4.6: Erarbeitung industriegerechter Berechnungswerkzeuge zur numerischen Beschreibung von Preformprozessen

Für die numerische Beschreibung von Preformprozessen soll ein Screening kommerzieller Software-Produkte durchgeführt werden. Auf Basis einer Softwareauswahl sind industriegerechte Berechnungswerkzeuge, fokussiert auf einfache Bedienbarkeit, mit einer durchgängigen Berechnungskette vom Preforming zur strukturellen Bauteilanalyse zu erarbeiten und an ausgewählten Bauteilen zu überprüfen.

AP 4.7: Modellierung industrieller Harzinfiltrationsprozesse und Konzeption neuartiger Werkzeug- und Vorrichtungskonzepte

Industrielle Harzinfiltrationsprozesse sind bezogen auf ihre Prozessparameter zu untersuchen und anschließend für ausgewählte Bauteile und bauteilspezifische Harzsysteme numerisch zu modellieren. Mit Hilfe von numerischen Studien sollen neuartige Werkzeug- und Vorrichtungskonzepte für einen optimierten Infiltrationsprozess abgeleitet werden.

AP 4.8: Prozess- und Prozesskettensimulation

Die im AP 4.6 erstellten Simulationslösungen sind in einer Prozesskettensimulation zu verknüpfen. Existierende kommerzielle Software wird dafür mit spezifisch angepassten Schnittstellen und Subroutinen erweitert. Unter Verwendung der zuvor experimentell ermittelten Werkstoffeigenschaften erfolgt die Erprobung der Simulationstools an ausgewählten Beispielen.

AP 4.9: Durchführung der Simulationsrechnungen

Die in AP 4.6. bis 4.8 entwickelten Simulationsmodelle und Prozessketten werden unter Verwendung der gemessenen Werkstoffdaten auf ausgewählte Bauteile bzw. repräsentative generische Faserverbundstrukturen angewendet.

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand bei Beginn des Vorhabens

4.1 Stand der Wissenschaft und Technik

Triebwerks-Strukturbauteile im Temperaturbereich bis etwa 350°C werden heute überwiegend als Guss- oder kombinierte Guss/Schweißbauteile aus Aluminium oder Titan gefertigt, wobei die gewünschten Kombinationen aus Belastbarkeit und Gewicht häufig nur unter hohen Kosten erreichbar sind. Diese Bauteile haben überdies besonders lange Entwicklungs- und Lieferzeiten. Faserverbund-Triebwerkskomponenten versprechen als Strukturbauteile durch ihre Möglichkeiten der beanspruchungsgerechten Gestaltung eine signifikante Verbesserung des Eigenschaftsprofils hinsichtlich Belastbarkeit und Gewicht sowie Herstell- und Lebenswegkosten. Die Auslegung dieser Faserverbundkomponenten für den Einsatz in Triebwerken bei vorliegenden komplexen zyklischen und hochdynamischen Beanspruchungen erfolgt derzeit aufgrund fehlender theoretischer Material- und Schädigungsmodelle weitgehend mit Hilfe experimenteller Untersuchungen an Probekörpern bzw. an Strukturbauteilen. Die vorhandenen Auslegungsmethoden für hoch beanspruchte Bauteile stehen noch am Anfang, obwohl gerade bei den extremen Beanspruchungen die Ausnutzung des hervorragenden Leichtbaupotentials der Faserverbundwerkstoffe erhebliche Leistungssteigerungen für strukturelle Bauteile verspricht.

Um die vorteilhaften Eigenschaften von Textilverbunden für Anwendungen in hochbelasteten und zyklisch beanspruchten 3D-Strukturen optimal zu nutzen, ist in einem iterativen, virtuellen Auslegungsprozess der Verbundwerkstoff selbst beanspruchungsgerecht zu konstruieren. Hierfür fehlen jedoch noch gesicherte Berechnungs- und Simulationswerkzeuge, die neben dem Bruch- und Schädigungsverhalten, das im Allgemeinen äußerst komplexe Verhalten der Werkstoffstruktur auf den unterschiedlichen charakteristischen Größenskalen wirklichkeitsnah erfassen. Derartige durchgängige praxismgerechte Lösungswege zur virtuellen Simulation 3D-textilverstärkter Werkstoffe existieren bisher nicht. Die vorrangig in der Industrie eingesetzten kommerziellen Finite-Elemente-Programme erlauben die Simulation selbst von konventionellen Faserverbundwerkstoffen bisher nur in eingeschränkter Form. Dies liegt unter anderem an den im Vergleich zu isotropen Werkstoffen aufwendigeren Modellierungsarbeiten zur Beschreibung lokaler Faserorientierungen. Mittels spezieller Zusatzwerkzeuge sind zwar für den Werkstoffkonstrukteur Hilfsmittel auf dem Markt, die jedoch in der Regel nur Insellösungen darstellen. Ein weiteres, erhebliches Problem ist die fehlende Implementierung wirklichkeitsnaher Modelle für Textilverbunde unter hohen zyklischen Belastungen. Dies liegt unter anderem daran, dass die angebotenen Materialgesetze noch große Defizite aufweisen. Außerdem sind diese in der Regel für 3D-textilverstärkte Verbundwerkstoffe nur eingeschränkt anwendbar. Mittels spezieller Zusatzroutinen sind zwar vereinzelt Werkzeuge auf dem Markt, diese sind jedoch für den Berechnungsingenieur nur schwer handhabbar.

Neben der virtuellen Auslegung und Konstruktion komplexer Bauteile durch FEM sind realitätsnahe Bauteilprüfungen unerlässlich, um Skalierungseffekte im Werkstoffverhalten sowie den Einfluss der betrieblichen Umgebungsbedingungen sicher nachweisen zu können. Dabei kommt der Definition praxisrelevanter und werkstoffgerechter Bauteiltests für die Zulassung sicherheitsrelevanter Bauteile, insbesondere in der Luftfahrzeugindustrie, besondere Bedeutung zu.

Für die wirtschaftliche Realisierung derartiger Strukturen ist eine automatisierte Herstellung textiler Vorformen durch Einsatz neuartiger kombinierter Technologien (Tailored fibre placement (TFP), Tuften, Nähen, thermoplastische Binder) unerlässlich, die bisher nicht Stand der Technik sind. Dabei sollen vor allem die Einflüsse von Fertigungsprozessen auf die endgültigen Werkstoffeigenschaften im Bauteil in die Auslegung integriert werden.

Die Voraussetzungen hierfür, wie eine durch experimentelle Verifikation abgesicherte Auslegungsmethodik, die Einsetzbarkeit von angepassten Harzsystemen sowie eine enge Kopplung von Auslegungsmethodik, Fertigungsprozess und Vorrichtungskonstruktion werden in diesem Vorhaben erarbeitet.

4.2 Bisherige Arbeiten des Antragstellers

Im Rahmen des europäischen Forschungsprojektes VITAL wurden Faserverbundbauweisen an der Frontstruktur eines Triebwerks wie beispielsweise Schaufelstrukturen unter Berücksichtigung aerodynamischer und akustischer Randbedingungen untersucht. Im Rahmen dieses Programms konnte nachgewiesen werden, dass eine Substitution von metallischen Komponenten vor allem durch Mischbauweisen aus Faserverbund- und metallischen Materialien möglich ist, was vor allem bei modernen Nebenstromtriebwerken zu einer signifikanten Gewichtsersparnis führt. Zusätzlich wurden erste Anstrengungen im Bereich der Auslegung von Faserverbundstrukturen gemacht. Dabei wurde vor allem das Crashverhalten der Schaufelstrukturen untersucht und bewertet.

In dem brandenburgischen Forschungsprojekt LEVITA wurden hybride Strukturen beispielhaft an einer Auslassleitschaufel und einer Antriebswelle eingehend untersucht. Im Rahmen dieser Arbeiten wurden die Auslegungsmethoden für aerodynamische Geometrien erweitert. Dabei wurde auch die dauerhafte, adhäsive Verbindung zwischen Polymeren und Metallen analytisch und numerisch untersucht. Im Detail wurden Modelle zur Beschreibung der adhäsiven Verbindung zwischen Stahl und Polyamid und zum anderen zwischen Stahl und Bismaleimiden erstellt. Zusätzlich wurden neuartige Methoden zur numerischen Validierung schnelldrehender Antriebswellen aus Kunststoff entwickelt.

Im Rahmen des SIMOTEX Programmes wurden neuartige Simulationswerkzeuge für Faserverbundstrukturen entwickelt und an die Rolls-Royce-CAE-Umgebung adaptiert. Somit konnten die Fähigkeiten zur effizienten Entwicklung von Triebwerksstrukturen in Textilverbundbauweise deutlich verbessert werden. Vor allem die Zusammenarbeit mit dem Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik und der Technischen Hochschule Mittelhessen führte zu neuartigen Methoden im Bereich der virtuellen Modellierung der textilen Fadenarchitektur. Dabei steht vor allem die direkte Kommunikation zwischen dem virtuellen Modell und dessen Optimierungsmethoden und der reellen Verarbeitung der Faserverbunde an der Fertigungsmaschine im Fokus. Hierbei können deutlich effizientere und kostengünstigere Bauteile aufgrund der vorangegangenen numerischen Optimierung hergestellt werden. Um das entwickelte Wissen aus SIMOTEX weiter zu nutzen und zu entwickeln wird die Technische Hochschule Mittelhessen Rolls-Royce im Unterauftrag unterstützen und die vorhandenen Modelle ausbauen.

Alle drei Projekte lieferten deutliche Hinweise dafür, dass die Auslegung und das damit verknüpfte Verständnis der Gesamtstruktur entscheidend durch die detaillierte Simulation der Faserverbundkomponenten und Verbindungen geprägt wird. Somit ergibt sich die Forderung, das grundlegende Verständnis struktureller, Faserverbundbauteile anhand von virtuellen Modellen für die Auslegung und Bewertung der Fertigung auszubauen und zu vertiefen, was innerhalb des vorliegenden Vorhabens erfolgt. Das Vorhaben erweitert somit die Erkenntnisse und Triebwerkstechnologien aus RRD-Forschungsprojekten mit dem Schwerpunkt Methoden für die Auslegung und Bewertung von komplexen strukturellen Faserverbundbauteilen im Hinblick auf die Werkstoffauswahl und Fertigung.

Der Antragsteller hat in der Vergangenheit keine eigenen Forschungen auf dem Gebiet Multiskalen Modelle für die Beschreibung von Faserverbundwerkstoffen durchgeführt. Daher ist es notwendig, diese Arbeiten innerhalb des Projektes im FuE-Unterauftrag mit der University of Bristol (UoB), die ein Strategischer Partner in diesem Bereich ist, durchzuführen. Die UoB verfügt aufgrund der langjährigen engen Zusammenarbeit mit Rolls-Royce über die notwendige Erfahrung beim Erstellen und entwickeln dieser Modelle für Flugzeugtriebwerkanwendungen. So wurden beispielsweise zahlreiche Materialmodelle für die Berechnung von Verdichterschaufeln aus Faserverbundwerkstoff für die großen zivilen Triebwerke von Rolls-Royce entwickelt und validiert.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Zielsetzung des Verbundvorhabens KoLiBri erfordert die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Partnern aus den Bereichen Triebwerksherstellung, Faserverbundfertigung und Forschung. Es ist geplant, in enger Zusammenarbeit zwischen Rolls-Royce Deutschland (RRD) mit dem Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK) der TU Dresden und der MT Aerospace AG (MTA) eine faserverbundgerechte Design- und Auslegungsmethodik zusammen mit den benötigten Modellierungswerkzeugen für mehrachsig belastete, komplexe Faserverbundstrukturen in hochintegrierten Triebwerkskomponenten zu entwickeln. Während die grundlagenrelevanten Forschungsaktivitäten im Wesentlichen beim ILK durchgeführt werden, werden die direkt anwendungs- und bauteilrelevanten Aktivitäten durch die Industriepartner abgedeckt.

RRD übernimmt als Zentrum für zivile Zweiwellentriebwerke oberhalb 12.000lb Startschub innerhalb der Rolls-Royce Gruppe die Koordination des Verbundvorhabens sowie die Integration von Anforderungsdefinitionen auf Triebwerks- und Subsystemebene mit den Arbeitsergebnissen der Projektpartner. MTA obliegt die Leitung der Entwicklung industriegerechter Fertigungskonzepte. In der Entwicklung und Fertigung von Bauteilen aus faserverstärkten Kunststoffen ist MTA seit vielen Jahren mit Wickel-, Infusions- und Prepregverfahren erfolgreich tätig und fertigt diverse Serienbauteile im Luft- und Raumfahrtbereich. Zusätzlich wurden relevante Kompetenzen für das Design und die Fertigung von hoch-belasteten CFK-Strukturbauteilen durch Forschungsvorhaben FASY und OPTITHECK nachhaltig aufgebaut. Dem Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik kommt die Verantwortung für die Werkstoffrelevante Fragestellungen, wie Werkstoffverhalten und -charakterisierung zu. Das ILK übernimmt die Entwicklung von Modellierungswerkzeugen für die Auslegung, Analyse und Fertigung von komplexen 3D-Strukturen, sowie die Durchführung eines mechanischen Testprogramms an 3D-Prüfkörpern. Das ILK ist eine Forschungseinrichtung der TU Dresden und gehört zu den größten und leistungsstärksten Instituten. Die Kernkompetenz des ILK liegt im Entwickeln, Auslegen und Optimieren von Komponenten und Systemen des Hochleistungsleichtbaus sowie der prototypischen Fertigung. Einen starken Branchenbezug zur Luftfahrt hat das ILK über seine Mitgliedschaft im weltweiten, universitären Netzwerk der University Technology Centers (UTCs) von Rolls-Royce aufgebaut.

II. Eingehende Darstellung

1 Erzielte Ergebnisse

1.1 Designkonzept und Auslegungsmethodik

Bauteilspezifische und allgemeine Anforderungen

In einem modernen Turbo-Fan Strahltriebwerk befindet sich eine Vielzahl an Komponenten, die aufgrund einer großen Zahl an unterschiedlichen Flugmanövern mehrachsigen Beanspruchungen unterliegen. Mit der Fokussierung des Projektes auf den Faserverbund-Leichtbau mittels trocken abgelegter 3D-Textilstrukturen, welche im Resin-Transfer-Moulding Verfahren infiltriert werden, verringert sich die Komponentenzahl entsprechend der damit einhergehenden Randbedingungen. In Abbildung 3 ist eine erste Auswahl von Triebwerkskomponenten beispielhaft für das Rolls-Royce BR725 Triebwerk gezeigt.

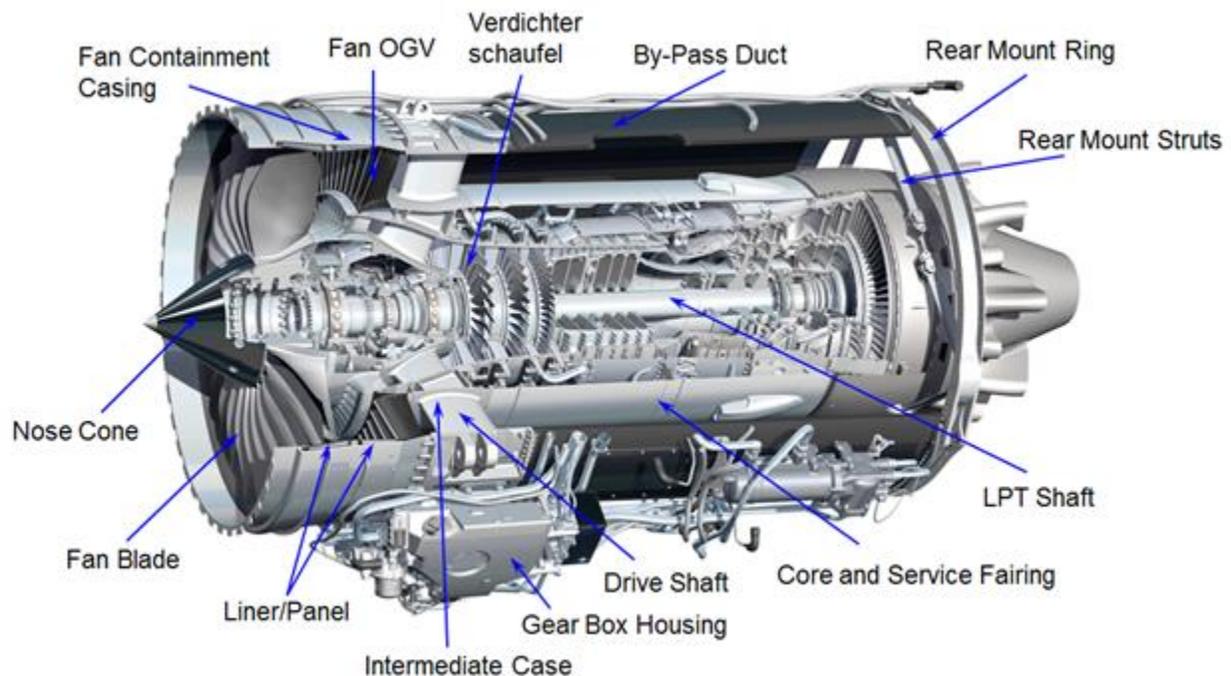


Abbildung 3: Mehrachsig beanspruchte Triebwerkskomponenten Rolls-Royce BR725

Für diese Auswahl an Triebwerkskomponenten existieren vielfältige Anforderungen, die auf unterschiedliche Weise systematisiert werden können. Ein Vorschlag für eine solche Systematik ist im Rahmen des KoLiBri-Projektes erarbeitet worden. Die Hauptkrite-

rien innerhalb dieser Systematik sind neben der Art der Beanspruchung, die Funktion, die Bewegung und die Sicherheitsklasse, welche es ermöglichen, Bauteile über Bauteilspektren hin zu Bauteilklassen verallgemeinert zu kategorisieren.

Die in Abbildung 3 dargestellten Triebwerkskomponenten lassen sich anhand der beschriebenen Systematik auf drei Bauteilklassen zurückführen: Gehäuse, Wellen und Ringstrukturen (s. Abbildung 4).

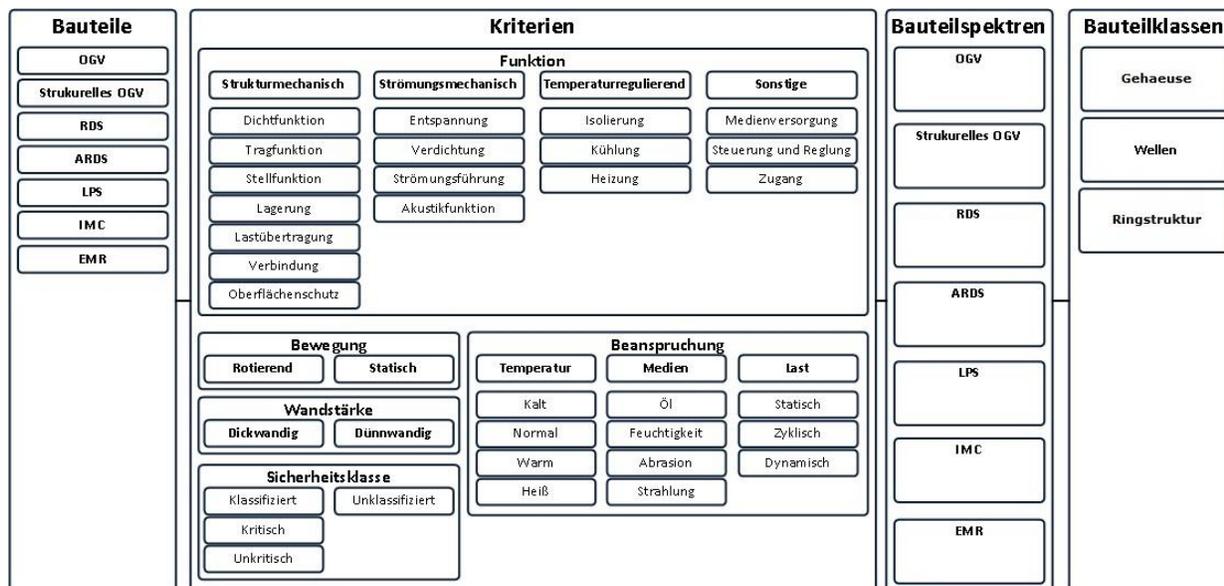


Abbildung 4: Systematik zur Definition von Bauteilklassen

Dieses Ergebnis liefert den Projektpartnern den Fokus für Triebwerkskomponenten, die sich generell für eine Untersuchung zur Umsetzung in Faserverbundbauweise eignen. Jeder Bauteilklassen können charakteristische Bauteilvertreter zugeordnet werden. Am Beispiel des BR725 Triebwerks ergeben sich für die genannten Bauteilklassen drei typische Vertreter (s. Tabelle 1).

Die Bauteilklassenvertreter dienen zur weiteren Methodenentwicklung als Technologieträger. Zum Zeitpunkt dieses Ergebnisses befindet sich das Vorhaben im zeitlichen Ablauf noch vor der Restrukturierung, weshalb das Intermediate Case (IMC) bzw. Zwischengehäuse für die Bauteilklassen der Gehäuse als Haupttechnologieträger für diesen Berichtsabschnitt dokumentiert wird. Das IMC unterliegt spezifischen technischen Anforderungen, die, wie alle Luftfahrtbauteile, in sehr engem Zusammenhang mit luftrechtlichen Zulassungsregularien stehen. Um die Lufttüchtigkeit eines Produktes bzw. Musters sicher zu stellen, sind die Vorgaben für die Zertifizierung der jeweiligen Zulassungsbehörde, wie z. B. der European Aviation Safety Agency (EASA) in Europa oder der Federal Aviation Administration (FAA) in Nordamerika zu erfüllen.

Bauteilklasse	Gehäuse	Wellen	Ringstrukturen
Vertreter	Intermediate Casing (IMC)	Radial Drive Shaft (RDS)	Rear Mount Ring (RMR)
			

Tabelle 1: Bauteilklassen und Vertreter

Aus zulassungsrechtlicher Perspektive besteht bspw. für das IMC eine bauteilspezifische Anforderung nach ausreichend hoher Widerstandsfähigkeit gegen Feuer, da die äußere Ringgeometrie des IMC einen Teil der Feuerwand abbildet, welche die Feuerzone 1 des Triebwerkes einhüllt (s. Abbildung 5).

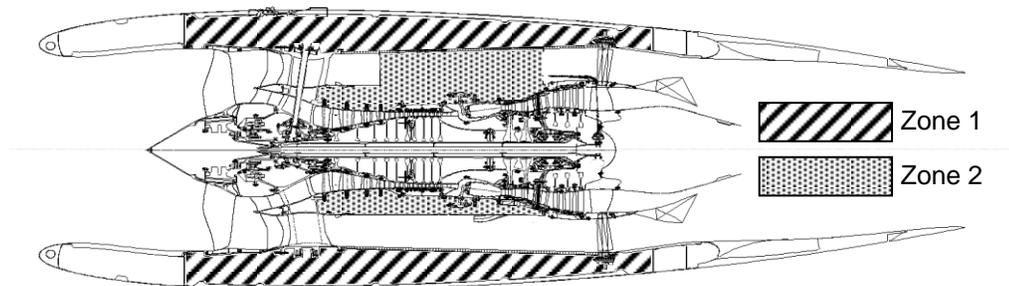


Abbildung 5: Feuerzonen eines Triebwerkes

Auf Grundlage der Zertifizierungsanforderungen ergeben sich folgende wesentliche verallgemeinerte Anforderungen für die Bauteilklasse der Gehäuse:

- Mechanische Tragfähigkeit (statisch und dynamisch)
- Schadenstolerante und versagenssichere Konstruktion
- Widerstandsfähigkeit gegen Feuer, Abrasion und Korrosion
- Aerodynamische Anforderungen für hohe Vortriebswirkungsgrade
- Inspizierbarkeit, Reparierbarkeit und Austauschbarkeit im Produktlebenszyklus.

Die Erfahrung in Triebwerksentwicklungsprogrammen zeigt, dass sich aus den allgemeinen Zertifizierungsanforderungen eine Fülle von detaillierten Anforderungen ableiten lassen, deren technische Herausforderungen in praktische Umsetzungsrisiken münden. D. h., je höher der Komplexitätsgrad z. B. einer neuen Systemarchitektur, einer neuen Komponentenbauweise oder eines neuen Materials, umso weiter steigt das Risiko, dass sich die jeweilige Neuheit nicht in die Praxis umsetzen lässt bzw. nicht als lufttüchtig zertifiziert werden kann. Dieses Zertifizierungsrisiko wird als Bestandteil verallgemeinerter Anforderungen auch im KoLiBri Vorhaben berücksichtigt.

Über die zulassungsrelevanten Anforderungen hinaus repräsentiert das Gewicht einer Triebwerkskomponente eine wesentliche allgemeine Anforderung. Triebwerkskomponenten, die in Faserverbundbauweisen umgesetzt werden, müssen dem Leichtbauanspruch insofern gerecht werden, dass sie signifikante Gewichtsersparnisse gegenüber den konventionell ausgeführten, metallischen Referenzbauteilen ermöglichen.

Neben den technischen Anforderungen sind auch wirtschaftliche Faktoren bedeutsam. Faserverbund-Triebwerkskomponenten müssen nicht nur leichter sein, sondern ebenfalls mindestens die Neutralität der Herstellkosten gegenüber konventionellen Lösungen sicherstellen. Entsprechend sind die Material- und Werkzeugkosten sowie die Bauteil- und Fertigungskomplexität in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einzubeziehen. Die für das KoLiBri Vorhaben relevanten bauteilspezifischen und verallgemeinerten Anforderungen sind in ein Anforderungsdokument eingeflossen, das den Projektpartnern zu Ende 2013 zur Verfügung gestellt wurde.

Ableitung und Bewertung von Bauweisen

Auf der Basis bauteilspezifischer und verallgemeinerter Anforderungen für potentielle Faserverbund-Triebwerkskomponenten ergibt sich für die Bewertung von Bauweisen eine Systematik mit drei Hauptkriterien: Masse, Kosten und Risiko. Die letztgenannten Hauptkriterien speisen sich wiederum aus mehreren Unterkriterien. Abbildung 6 zeigt die Bewertungssystematik mit den Kriterien einschließlich Wichtungsfaktoren.

Die Ableitung von Bauweisen erfolgt mit Hilfe der Reduktion geometrischer Komplexität in Substrukturen und der anschließenden Kombination von metallischen Werkstoffen und Faserverbundwerkstoffen für die jeweiligen Substrukturen. Für das Beispiel des IMC ist die Unterteilung in geometrisch reduzierte Einzelbereiche bzw. Substrukturen in Abbildung 7 dargestellt.

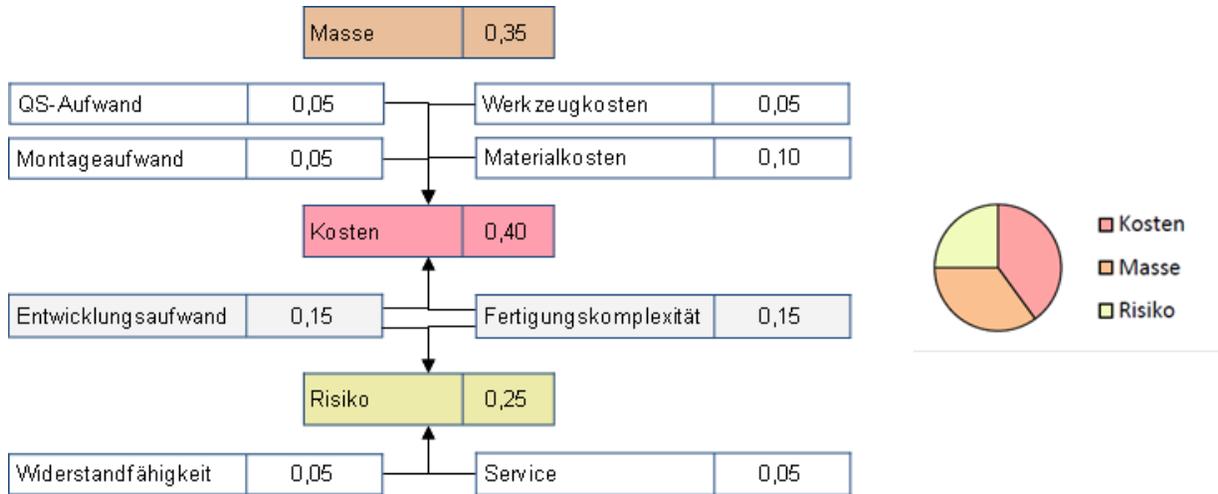


Abbildung 6: Kriterien zur Bauweisenbewertung

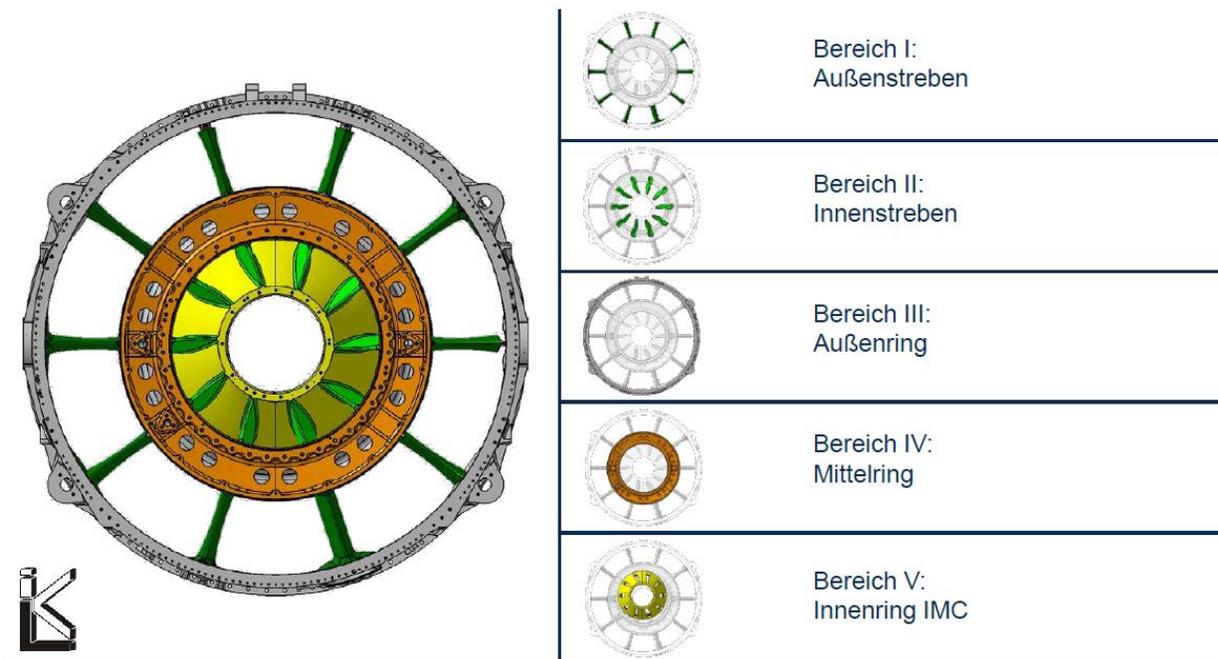


Abbildung 7: Unterteilung des IMC in Bereiche

Es zeigt sich, dass das IMC aus mehreren Ring- und Strebenelementen besteht, welche in der derzeitigen Referenzkonstruktion integral in einem Magnesium-Gussbauteil ausgeführt sind (vgl. Tabelle 1, links).

Die Variation potentieller Bauweisen ergibt sich einerseits entlang des Integrationsgrades der Substrukturen bzw. der Modularität des Bauteils und andererseits entlang des Anteils an metallischen Werkstoffen bzw. Faserverbundwerkstoffen. Die Vielzahl an möglichen Kombinationen für das IMC zeigt Abbildung 8.

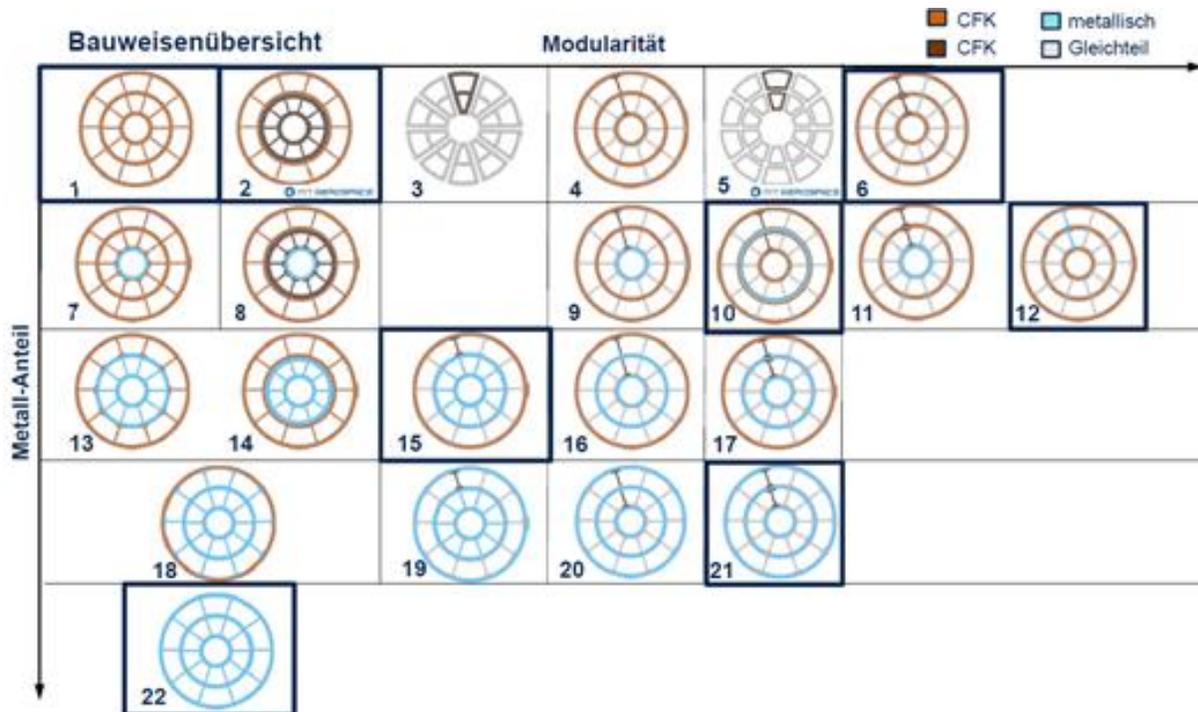


Abbildung 8: Bauweisenvarianten für ein IMC

- 1 Gehäuse als vollintegrale Faserverbundstruktur (OPTITHEK Design)
- 2 Zwei integrale Faserverbundstrukturen (innen und außen) durch Auflösung des mittleren Rings
- 6 Faserverbund-Ringstrukturen (innen, Mitte, außen) und Faserverbundstreben zw. Außen- und Mittelring bzw. Mittel- und Innenring differentiell als Einzelkomponenten
- 10 Faserverbund-Ringstrukturen (innen, Mitte, außen), durchgängige Faserverbund-Streben und aufgelöster metallischer Mittelring mit angeschlossenen Metallflanschen
- 12 Faserverbund-Ringstrukturen (innen, Mitte, außen) und Metallstreben zw. Außen- und Mittelring bzw. Mittel- und Innenring differentiell als Einzelkomponenten
- 15 Innenring integral metallisch, Faserverbund-Außenring und -streben zw. Außen- und Mittelring differentiell als Einzelkomponenten
- 21 Metall-Ringstrukturen (innen, Mitte, außen) und Faserverbundstreben zw. Außen- und Mittelring bzw. Mittel- und Innenring differentiell als Einzelkomponenten
- 22 Gehäuse als vollintegrale Metallstruktur (Feinguss, Referenzdesign BR725)

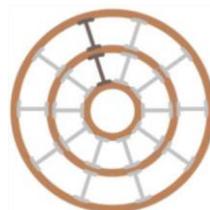
Das Bauweisenspektrum reicht von der vollintegralen Metallstruktur (Nr. 22) bis hin zur differentiellen Bauweise, die ausschließlich auf Faserverbundstoffe setzt (Nr. 6) (s. Abbildung 8). Die Bauweisenvarianten Nr. 1 und Nr. 3 repräsentieren die im Vorgängervorhaben OPTITHEK verfolgten Ansätze eines Voll-Faserverbund-IMC. Die Abstufung

hinsichtlich Modularität und Metallanteil erlaubt prinzipiell eine sehr große Zahl an Varianten, von denen im KoLiBri-Projekt nicht alle theoretisch möglichen, sondern vielmehr die praktisch nachvollziehbaren dokumentiert sind. Um den Untersuchungsaufwand verhältnismäßig zu den Folgeaktivitäten zu gestalten, werden acht Varianten näher analysiert. Das Auswahlprinzip baut dabei auf den Bezug zum BR725-Referenzdesign, dem OPTITHEK-Design sowie auf den Ansatz, Varianten auszuwählen, die genügend große Unterschiede untereinander aufweisen.

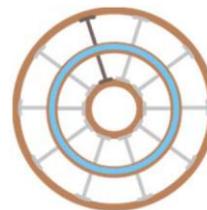
In Abbildung 9 ist die Gesamtbewertung aller vorausgewählten Bauweisenkonzepte dargestellt. Im Ergebnis dieser Bewertung sind zwei Optimierungspfade erkennbar.

Kriterium	Gewichtung [%]	1	2	6	10	12	15	16	19	22
Masse (normiert auf Soll-Tragfähigkeit)	35	80	69	75	53	21	20	21	21	0
Werkzeugkosten	5	18	18	54	40	27	48	48	24	0
Materialkosten	10	12	0	8	24	72	75	73	73	100
Fertigungskomplexität	15	20	25	57	50	45	45	73	67	80
Montageaufwand	5	100	69	20	20	100	100	38	20	100
Widerstandsfähigkeit	5	45	45	45	45	65	66	65	58	75
QS-Aufwand	5	47	25	20	20	45	45	47	20	80
Service	5	0	11	11	65	11	11	11	11	0
Entwicklungsaufwand	15	20	24	64	51	43	43	73	69	100
Gesamtbewertung:		45,70	39,90	52,70	45,60	40,15	41,20	47,00	41,70	49,75
Ranking:		4	9	1	5	8	7	3	6	2

*: 0 = schlechteste Bewertung, 100 = beste Bewertung (z.B. niedrigste Masse, geringster Fertigungsaufwand, etc.)



Voll-Faserverbund-Differentialbauweise



Faserverbund-Differentialbauweise mit metallischem Mittelring



Metall-Integralbauweise (BR725)

Abbildung 9: Gesamtbewertung der vorausgewählten Bauweisen

Zum einen können Gehäusebauweisen, die auf Faserverbundwerkstoffe bzw. nicht-metallische Werkstoffanteile setzen, dann positiv bewertet, wenn sie gleichzeitig auf vereinfachte Faserverbund-Substrukturen mit modularisierter Fertigung setzen. Andererseits führen Gehäusebauweisen, die auf den Gewichtsvorteil der Faserverbundwerkstoffe durch den Einsatz metallischer Substrukturen verzichten, ebenfalls zu einer positiv bewerteten Gesamtlösung, wenn die metallischen Bauanteile hochintegriert zum Einsatz kommen, wie bspw. bei der BR725-Referenz.

Unter Berücksichtigung des KoLiBri Projektfokus auf die Untersuchung trocken abgelegter 3D-Textilstrukturen, welche im Resin-Transfer-Moulding Verfahren infiltriert werden, sind die positive bewerteten Bauweisen des ersten Optimierungspfades, d. h. mit niedriger Nummerierung, von höherer Relevanz. Entsprechend verbleiben aus der tabellarischen Übersicht in Abbildung 9 die Bauweisen Nr. 6, 10 und 1 für die nähere Betrachtung. Variante Nr. 1 repräsentiert den OPTITHEK-Ansatz und wird hier nicht weiter dokumentiert. Obwohl die Bauweise Nr. 6 aus der Gesamtbewertung als optimale Lösung (Rang 1) hervorgeht, hat die detaillierte Folgeuntersuchung gezeigt, dass die Bauweise Nr. 10 Vorteile gegenüber Nr. 6 hinsichtlich der Umsetzung des geometrisch komplexen Mittelringes bietet. In Abbildung 10 ist ein CAD-Modellentwurf mit den wichtigsten Kraftübertragungselementen für diese Bauweise dargestellt. Sowohl die Aufnahme des Schubzapfens als auch die beiden symmetrisch angeordneten Aufnahmen für den Triebwerkspylon sind in metallischer Bauweise belassen, so dass ein IMC in Hybridbauweise vorliegt.

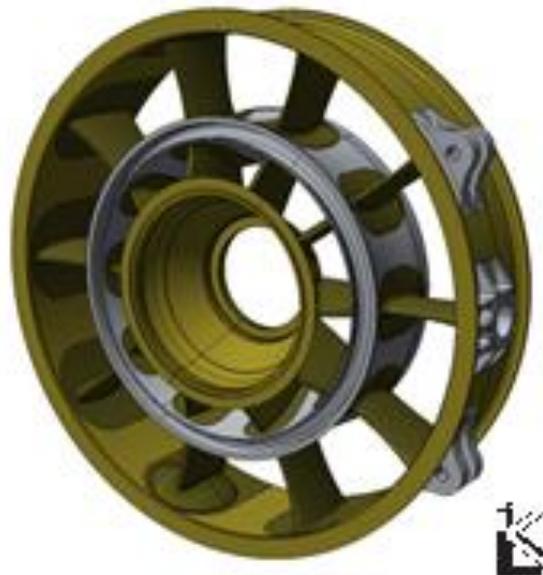


Abbildung 10: CAD-Modellentwurf eines IMC in Hybridbauweise (Bauweise Nr. 10)

Die Untersuchung macht deutlich, dass auf dem relativ abstrakten Niveau einer Gesamtbauweise die technischen Herausforderungen bei den Teilstrukturen in der Bewertung unberücksichtigt bleiben. Die Bauweisenbewertung dient deshalb vorrangig als Indikation und erfordert eine kontinuierliche Revision in den konstruktiven Detaillierungsphasen einer Faserverbund-Triebwerkskomponente.

Mit Blick auf die inhaltliche Neuausrichtung des Projektes auf das Forschungsziel Faserverbund Fan Gehäuse (s. Abschnitt 3.2) ist die Durchführbarkeit von Bauweisenanalysen aufgrund der geringeren geometrischen Komplexität stark eingeschränkt. Das Fan Gehäuse kann als Zylindergeometrie mit Flanschen abstrahiert werden. Entsprechend beschränkt sich die Untersuchung von Bauweisen auf den Flanschbereich. In diesem Zusammenhang ist zu berücksichtigen, dass Bauweisen und Fertigungsverfahren voneinander abzugrenzen sind und entsprechend in der KoLiBri-Projektstruktur in verschiedenen Arbeitspaketen behandelt werden (AP 1 und AP 2, vgl. Abbildung 2). Darüber hinaus grenzt die Aufgabenstellung durch den Bezug auf trocken abgelegte 3D-Textilstrukturen und das RTM-Verfahren die Bauweisen derart ein, dass im KoLiBri Vorhaben keine weiterführenden Bauweisenstudien für bspw. die Integration von metallischen Substrukturen in das Faserverbund Fan Gehäuse durchgeführt werden.



Abbildung 11: CAD-Geometrie Fan Gehäuse

Als Bauweise ist deshalb eine Voll-Faserverbundbauweise mit integral ausgeführten Flanschen definiert worden (s. Abbildung 11).

Auslegung und Validierung des Faserverbund Fan Gehäuses

Für die Auslegung und Validierung der Faserverbundstruktur des Fan Gehäuses wird auf die Kombination von numerischen Simulationen und Tests in einer repräsentativen Laborumgebung zurückgegriffen. In Anlehnung an luftfahrttypische Auslegungs- und Validierungsstrategien werden Daten aus verschiedenen Strukturniveaus verwendet. Abbildung 12 zeigt die Bezugspunkte des KoLiBri Vorhabens im Vergleich zu den typischen EASA Validierungsebenen sowie zu entsprechenden Datenquellen.

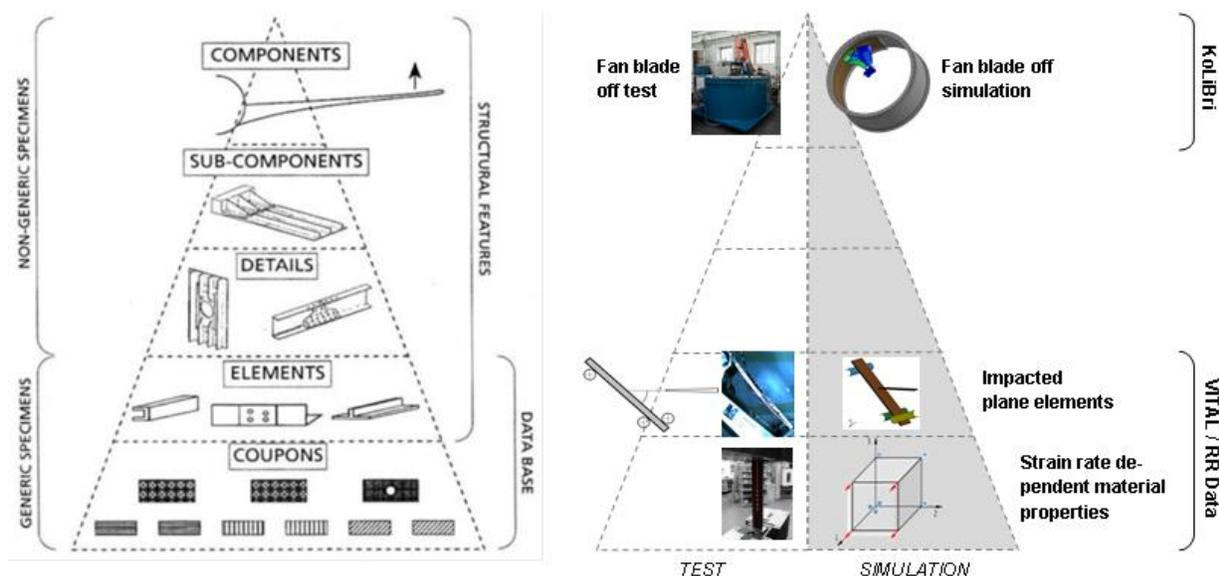


Abbildung 12: Auslegungs- und Validierungsschema in Anlehnung an EASA AMC 20-29

Auf dem untersten Strukturniveau der Auslegungspyramide nutzt das KoLiBri Vorhaben Materialkennwerte einschließlich validierter Materialmodelle vorheriger Forschungsvorhaben und interne Daten von Rolls-Royce. Diese Daten fließen in die numerischen Simulationsmodelle für die Analyse des Fanschaufeleinschlages auf dem obersten Strukturniveau, sprich der Komponentenebene ein. Anschließend werden die Berechnungsergebnisse einem Komponententest, der sog. Funktionsmusterprüfung aus AP 3 (vgl. Abschnitt 1.3) gegenübergestellt.

Das Ziel der Analyse des Fanschaufeleinschlages ist es, eine Indikation für Wandstärken und Lagenaufbauten zu erhalten, die für einen ausreichenden Berstschutz des Fan Gehäuses sorgen. Ausreichender Berstschutz bedeutet in diesem Zusammenhang, dass keine Schaufelbruchstücke durch das Gehäuse hindurch dringen bzw. sich nach dem Einschlagvorgang außerhalb des Gehäuses befinden.

Für die Berechnung der strukturellen Integrität des Faserverbund Fan Gehäuses infolge Fanschaufeleinschlag sind in enger Zusammenarbeit zwischen RR und dem ILK komplexe Simulationsmodelle erstellt worden (s. Abbildung 13 und Abbildung 14). Hierbei sind Modellierungstechniken sowie metallische Materialkennwerte von Rolls-Royce und nicht-metallische Materialkennwerte vom ILK eingeflossen.

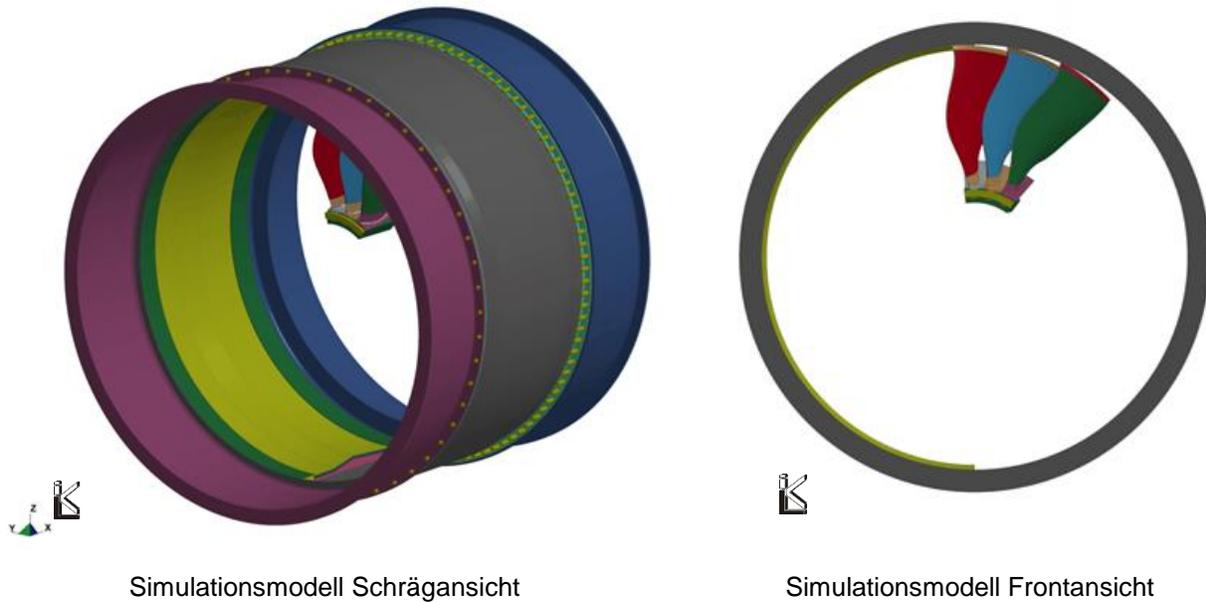


Abbildung 13: Gesamtansicht des Simulationsmodells (Gehäuse- und Rotorbaugruppe)

Die rotierende Baugruppe (Fanschaufeln, Fan Disc) wurde von RRD modelliert. Das Teilmodell für die Gehäusebaugruppe ist vom ILK aufgebaut worden.

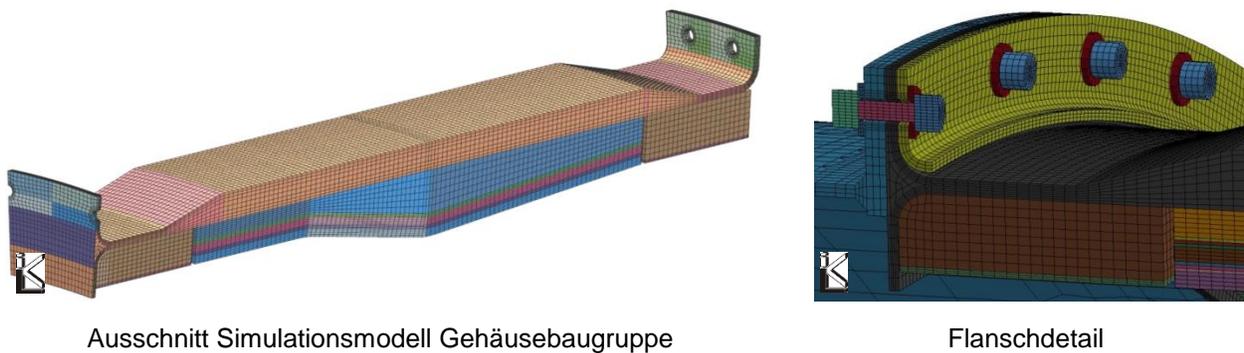


Abbildung 14: Details des Simulationsmodells (Gehäusebaugruppe)

Die Modellierung der Faserverbundwerkstoffe greift auf vereinfachte Ansätze zurück, ohne Werkstoffplastizität, Schädigung und progressives Versagen zu berücksichtigen. Entsprechend besitzen die Analyseergebnisse vor allem Aussagekraft in frühen Phasen des Beanspruchungsverlaufes. Mit fortschreitender Penetration errechnet das Modell zu große Werkstoffanstregungen bzw. zu großflächiges Versagen, weil die Nachgiebigkeitserhöhung infolge zunehmender Schädigungen unberücksichtigt bleibt. Hinzu kommt, dass die gewählte Materialmodellierung die Auswertemöglichkeiten auf Einzelzeitschritte limitiert. Infolgedessen ist keine kumulierte Darstellung der Werkstoffanstregung bzw. Materialversagens für alle Zeitschritte möglich und die Auswertung erfolgt separat für jeden einzelnen Zeitschritt.

Die Strukturreaktion auf den Fanschaufeleinschlag unterteilt sich mehrere Phasen. In der ersten Phase findet die Berührung der Schaufelspitze mit der inneren Oberfläche der Fan Gehäusebaugruppe, dem Liner, statt. Infolge dieser Berührung erfährt das Schaufelblatt eine Beuldeformation. Gleichzeitig wird Liner-Werkstoff ausgerieben (s. Abbildung 15).

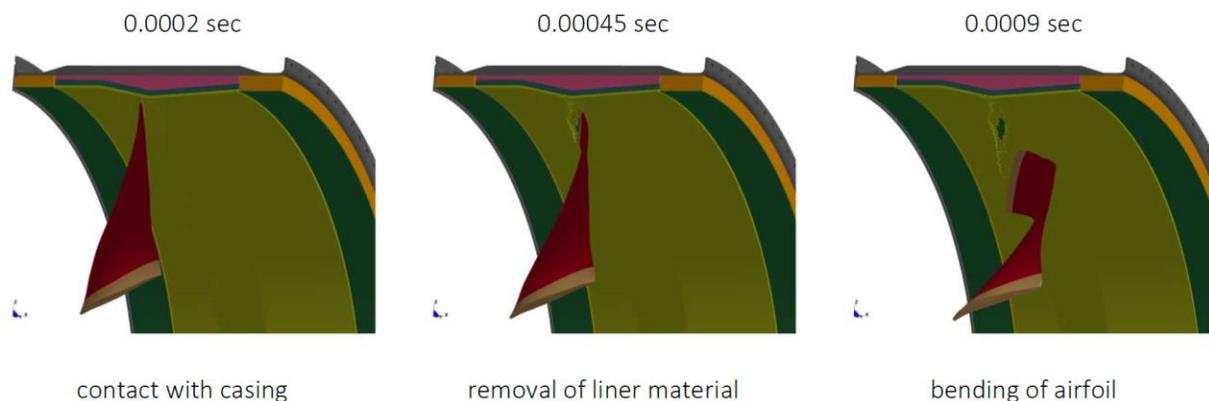


Abbildung 15: Fanschaufeleinschlag Phase 1

Während der folgenden Phase, dem Haupteinschlag, gleitet die deformierte Fanschaukel entlang der Liner-Oberfläche und dringt tiefer in das Liner-Material ein, das in größerem Umfang ausgerieben wird (s. Abbildung 16). Die Verformung der Fanschaukel schreitet fort bis es zum Werkstoffversagen kommt und die Schaufel in mehrere Teile zerbricht. Das Fan Gehäuse erfährt in dieser Phase die höchsten Beanspruchungen.

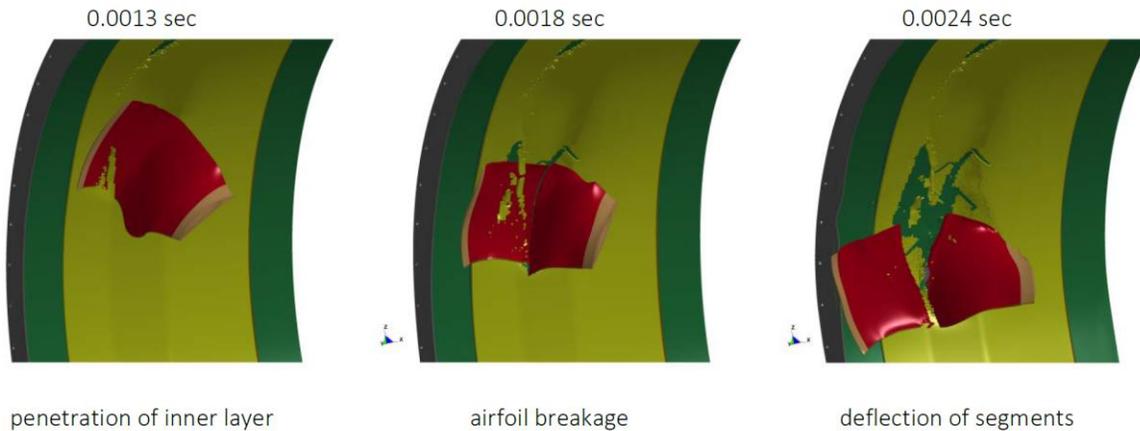


Abbildung 16: Fanschaufeleinschlag Phase 2

Während der dritten und letzten Phase des Einschlages werden die Schaufelbruchstücke weiter deformiert und die Beschädigung des Liners setzt sich fort bis die Schaufelbruchstücke ihren Kontakt zur Fan Gehäusebaugruppe verlieren und sich auf ihren jeweiligen Flugbahnen fortbewegen (s. Abbildung 17).

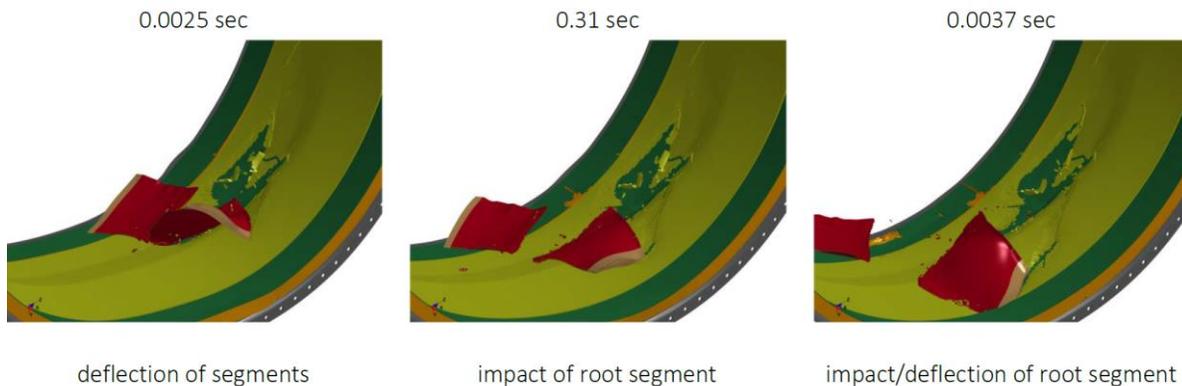


Abbildung 17: Fanschaufeleinschlag Phase 3

Für das Faserverbund Fan Gehäuse ist die Haupteinschlagphase (Phase 2) am relevantesten. Während dieser Phase treten die größten Beschädigungen im Faserverbundwerkstoff auf: sowohl in axialer Richtung und Umfangsrichtung als auch in Dickenrichtung (s. Abbildung 18). Signifikantes Werkstoffversagen wird großflächig für die gesamte Fan Gehäusebreite vorhergesagt. Während das Versagen in Dickenrichtung (Abbildung 18 links) hauptsächlich Delaminationen des Faserverbundlaminates repräsentiert, liefert das Versagen in Umfangsrichtung (Abbildung 18 rechts) in Kombination mit Delaminationen eine Indikation für ein Totalversagen der Gehäusestruktur.

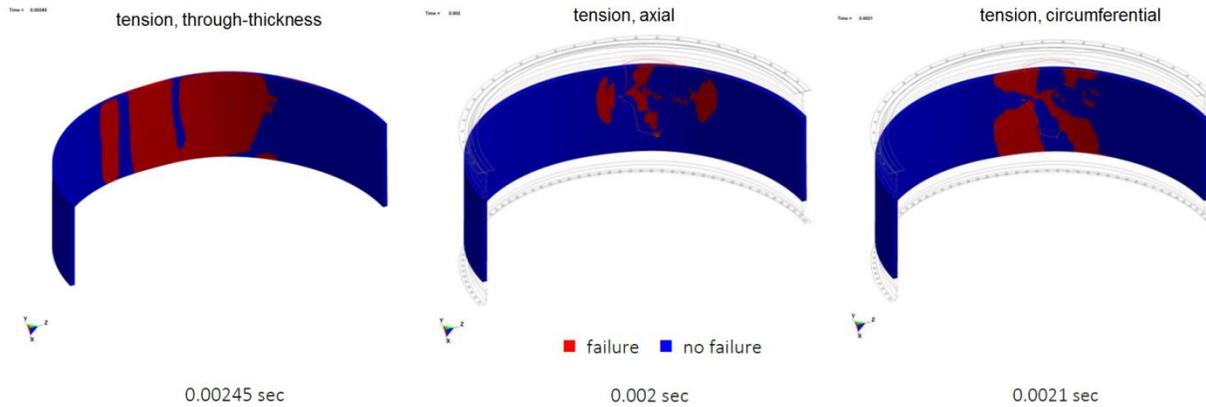


Abbildung 18: Versagensprognose Faserverbundwerkstoff

Aufgrund der zuvor beschriebenen Einschränkungen in der Modellierung des Werkstoffverhaltens wird den Berechnungsergebnissen ein ausgeprägter Konservatismus zugeschrieben. Bspw. tolerieren Faserverbundwerkstoffe ein relativ hohes Ausmaß an Delaminationen bevor es zum Totalversagen kommt. Die Prognosegüte des Berechnungsmodells muss daher kritisch hinterfragt werden. Aus diesem Grund wird der verbleibenden Unsicherheit bei der Versagensvorhersage des Faserverbund Fan Gehäuses mit einer Vergrößerung der Wandstärke durch Hinzufügen von Laminatlagen für das in AP 3 herzustellende Funktionsmuster begegnet.

1.2 Funktionsmusterherstellung

Die in AP 1 ermittelten allgemeinen Anforderungen an Triebwerkskomponenten und spezifischen Anforderungen an ein Fan Gehäuse sowie der Projektfokus auf trocken abgelegte 3D-Textilstrukturen und das RTM-Verfahren bestimmen das Werkstoffprofil in puncto Verstärkung und Matrix zu großen Anteilen. Beide Werkstoffe müssen luftfahrtqualifiziert sein und sich in einem Injektionsprozess, wie dem RTM-Verfahren, verarbeiten lassen. Die in AP 1 definierte Bewertungs- und Auswahlssystematik für Gehäusebauweisen (vgl. Abbildung 6) ist auf die Werkstoffebene sehr gut übertragbar, weil für die Faserverbundwerkstoffe eine enge Verbindung zwischen Material und Bauteil besteht. Im Zuge des generierenden, meist schichtweisen Materialaufbaus, entsteht das Bauteil mit dem Werkstoff und umgekehrt. Darüber hinaus zeigen Kostenmodelle für die Serienproduktion von Faserverbund-Triebwerkskomponenten, dass der Herstellpreis eines Faserverbund-Bauteils häufig zu mehr als fünfzig Prozent vom Rohmaterialpreis bestimmt ist. Das Werkstoffprofil kann demnach durch Anforderungen in den Hauptkriterien Masse, Kosten und Risiko bestimmt werden. Diesen Hauptkriterien werden die jeweils charakteristischen Werkstoffeigenschaften zugeordnet, wie bspw. der Rohmaterialpreis den Kosten und die Dichte dem Bewertungskriterium Masse.

Die in enger Zusammenarbeit mit dem Industriepartner MTA durchgeführten Werkstoffrecherchen sind in Bewertungsmatrizen eingeflossen, mit denen vorteilhafte Werkstoffsysteme für das Faserverbund Fan Gehäuse gewählt werden können. Eine bewertete Auswahl an Faserwerkstoffen zeigt Abbildung 19.

Cost	40%	Manufacturer		Toray				Toho Tenax				Hexcel				Hexcel		Mitsubishi	
Weight	35%	Prod. site		JP, US, FR				JP, US, DE				US, FR, ES				US, FR, ES		JP, US	
Risk	25%	Designation		T 700 GC		T 800 SC		HTS 40		IMS 65		AS 4C		IM 7		IM10		MR 60H	
		Fibre type		HT		IM		HT		IM		HT		IM		IM		IM	
		Filaments		24K		24K		24K		24K		12K		12K		12K		24K	
Criteria	Unit	Weighting [%]																	
Cost	[per kg]	0,35	0,021	4	0,043	4	0,018	4	0,036	4	0,030	4	0,060	3	0,125	3	0,036	4	
Tensile modulus	[GPa]	0,10	240	2	294	3	240	2	290	3	231	2	276	3	310	3	292	3	
Tensile strength	[MPa]	0,20	4.900	3	5.880	4	4.300	2	6.000	4	4.370	2	5.670	4	6.964	5	5.680	4	
Density	[kg/m³]	0,05	1,78	4	1,80	3	1,77	4	1,78	4	1,78	4	1,78	4	1,79	3	1,81	3	
Processability	[-]	0,20	--	3	--	4	--	3	--	3	--	3	--	3	--	3	--	3	
Availability	[-]	0,10	--	4	--	4	--	5	--	5	--	3	--	3	--	3	--	2	
Overall rating			3,40		3,85		3,30		3,80		3,10		3,25		3,40		3,45		
Ranking			4		1		6		2		8		7		5		3		

-- no data available ; rating (not ranking) 1 = poor ; 2 = low ; 3 = average ; 4 = high ; 5 = premium

Abbildung 19: Bewertungsmatrix für Faserwerkstoffe

Die mit der gleichen Methodik evaluierten Matrixwerkstoffe zeigt Abbildung 20.

Criteria	Unit	Weighting [%]	Hexcel		Cytec		Momentive			TenCate		Lonza						
Cost	[per kg]	0,2	0,2	5	0,7	3	--	3	1	1	--	3	--	3	0,5	3		
Tensile modulus at RT	[GPa]	0,05	2,9	1	4,08	4	4	4	4,6	5	3,5	3	2,72	1	3,38	2	4,1	4
Tensile strength at RT	[MPa]	0,05	75	3	72,4	3	82,1	4	103	5	82	4	78,6	3	68,25	2	45	1
Fracture toughness (K_{1C})	[MPa \sqrt{m}]	0,05	0,53	2	1,05	3	2,2	5	0,85	3	0,9	3	0,9	3	0,6	2	0,45	2
Density	[kg/m 3]	0,075	1,14	4	1,25	2	1,25	2	1,25	2	1,1	5	1,2	3	1,18	3	1,2	3
Glass transition temp. (T_g), dry	[°C]	0,05	196	2	285	5	161	2	271	4	190	2	158	2	193	2	285	5
Viscosity at injection temp.	[mPa*s]	0,125	35	4	67	3	500	1	55	4	50	4	10	5	20	5	400	1
Fire resistance	[-]	0,1	--	2	--	4	--	2	--	4	--	2	--	2	--	5	--	5
Availability	[-]	0,2	--	5	--	3	--	3	--	5	--	4	--	4	--	3	--	3
Overall rating			3,4		2,9		2,4		3,1		3,1		2,9		3,0		2,7	
Ranking			1		6		8		2		3		5		4		7	

Abbildung 20: Bewertungsmatrix für Matrixwerkstoffe

Zur Herstellung eines Funktionsmusters für die in AP 1 gewählte Voll-Faserverbundbauweise mit integral ausgeführten Flanschen können folgende Werkstoffe empfohlen werden:

- Verstärkung: Kohlenstofffasern Typ Toho Tenax IMS 65 oder Toray T800 SC
- Matrix: Epoxydharz Typ Hexcel RTM 6.

Die Verwendung von Cyanateestern als Matrixwerkstoff wird aufgrund der komplexen Verarbeitbarkeit nicht empfohlen. Insbesondere durch den langen Härtezyklus (bis zu 12 Stunden) ist nicht zu erwarten, dass eine kosteneffektive Fertigung erreicht wird.

Das Grundprinzip der Herstellung des Funktionsmusters im KoLiBri Vorhaben folgt einem Kompromiss aus einerseits niedrigen Fertigungskosten, die wenige Prozessschritte und endkonturnahe Formgebung bedeuten, und andererseits niedrigen Herstellrisiken, welche eine geringe Komplexität von Werkzeugen und einfache Abläufe erfordern. Verschiedene Problemstellungen, die aus den vorangegangenen Forschungsvorhaben offensichtlich wurden, wie z. B. die Handhabung von komplexen Kern- und Angussystem, eine exakte Werkzeugtemperatursteuerung, die Bildung von Poren und Spannungsrissen infolge von Setzvorgängen der textilen Preform oder die Beeinträchtigung der Bauteileigenschaften durch Verschiebungen einzelner Teil-Preformen an Wandstärkenübergängen während der Infiltration, sind Teil der Untersuchungen in KoLiBri.

Zur Umsetzung einer Faserverstärkungsarchitektur für die relativ einfache zylindrische Grundgeometrie des Faserverbund Fan Gehäuses liegt das Verfahren Faserwickeln nahe. Die benötigten Faserverstärkungen können mit diesem Verfahren sehr effektiv

durch die entsprechenden Umwicklungen realisiert werden. Die spezifischen Verstärkungsrichtungen werden durch gezielte Veränderungen des Wickelwinkels umgesetzt. Entsprechend der Aufgabenstellung des Projektes und den Ergebnissen der Werkstoffbewertung hinsichtlich des Rohmaterialpreises wird der Werkstoffverbund zwischen den trocken abgelegten Fasern und der Matrix mit dem RTM-Injektionsverfahren erzeugt. Der Ablauf des Herstellprozesses ist in Abbildung 21 dargestellt.

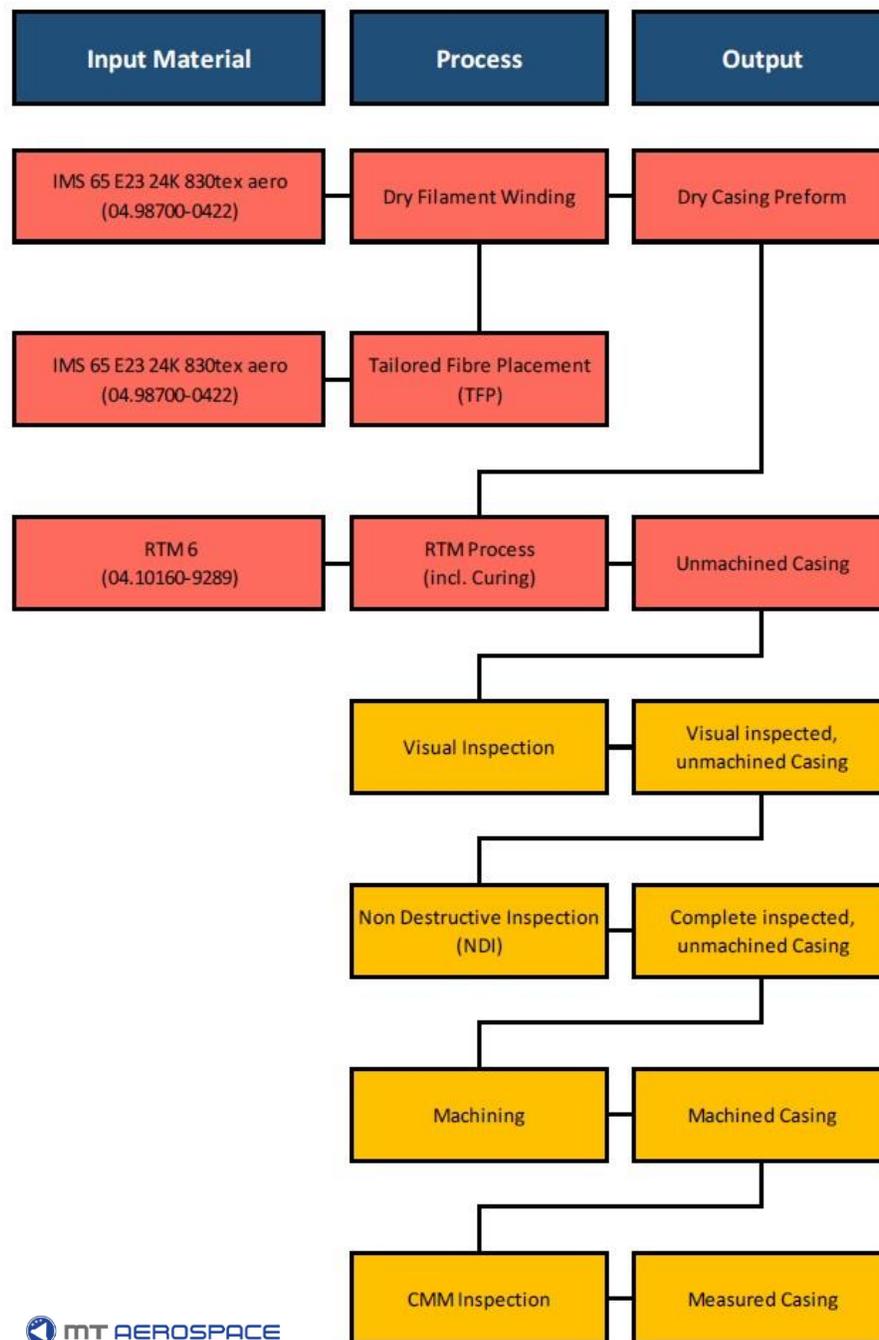


Abbildung 21: Ablaufdiagramm der Faserverbund Fan Gehäusefertigung

Beim Herstellungsverfahren für die textile Preform handelt es sich konkret um das Trockenwickelumformverfahren bei dem zunächst Faserwicklungen auf einen Wickelkern aufgebracht und anschließend umgeformt werden. Ein auf dieses Verfahren spezialisiertes KMU, die EAST-4D Carbon Technology GmbH wurde deshalb per Forschungs- und Entwicklungsauftrag in das KoLiBri-Vorhaben eingebunden.

In Zusammenarbeit zwischen dem Industriepartner MTA und dem Unterauftragnehmer sind Fertigungskonzepte für ein im Wickelverfahren hergestelltes Fan Gehäuse erarbeitet worden. Das finale Konzept sieht eine Fertigung über ein kombiniertes Werkzeug vor, das aus einem Wickelkern, Umformwerkzeug und RTM-Formwerkzeug besteht (s. Abbildung 22).

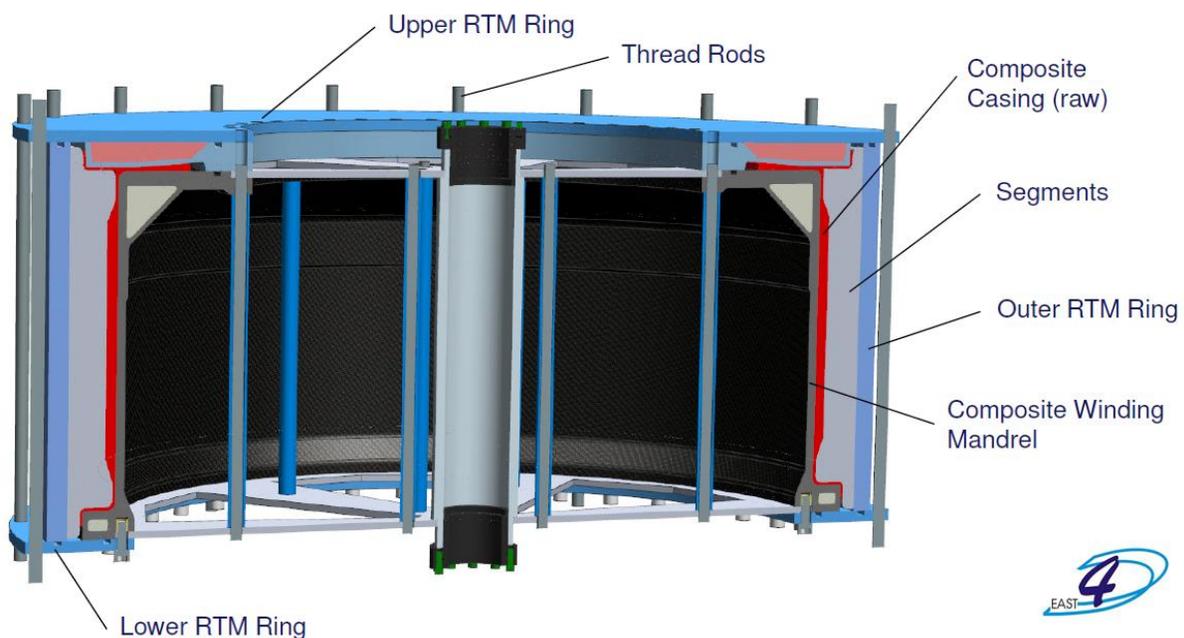


Abbildung 22: Werkzeug zur Herstellung eines Faserverbund Fan Gehäuses

Der Wickelkern dient als Positivform zur dreidimensionalen Ablage der Verstärkungsfasern. Mit Hilfe der integrierten Bestandteile des Umformwerkzeuges können die Gehäuseflansche integral ohne Unterbrechung des Faserverlaufes realisiert werden. Das RTM-Werkzeug besteht aus dem Wickelkern für die Abbildung der Gehäuseinnenkontur und aus einer von außen aufgesetzten zylindrischen Hülle mit mehreren Einsätzen, über die die Außenkontur des Fan Gehäuses realisiert wird. Die Formgebung des Fan Gehäuses und die gleichzeitige Generierung des Faserverbundwerkstoffes erfolgt über die Injektion und Konsolidierung des Matrixwerkstoffes in die zuvor gewickelte und umgeformte textile Preform (s. Gehäusequerschnitt, rot markiert in Abbildung 22).

Im Ablauf der einzelnen Fertigungsschritte erfolgt sowohl die Faserablage als auch die Injektion des Matrixwerkstoffes automatisiert. In der gesamten Prozesskette sind dennoch manuelle Arbeitsschritte, wie bspw. bei der Flanschumformung, der Inspektion und Materialfluss enthalten. Dies ist dem niedrigen Industrialisierungsreifegrad des Vorhabens geschuldet, wird jedoch in den Rahmenbedingungen der Technologieforschung akzeptiert. Die Fertigung des Faserverbund Fan Gehäuses zusammen mit den durchgeführten Herstellstudien liefern wichtige Erkenntnisse für zukünftige Optimierungspotentiale des Fertigungsprozesses bzw. für potentielle höhere Automatisierungsgrade.

Im KoLiBri Vorhaben wurden insgesamt drei Prozessmuster des Faserverbund Fan Gehäuses gefertigt, von denen ein Bauteil der Funktionsmusterprüfung (AP 3) zugeführt wird. Dieses Prozessmuster ist in Abbildung 23 dargestellt. Die gesamte Baugruppe einschließlich Liner zeigt Abbildung 24.



Abbildung 23: Faserverbund Fan Gehäuse



Abbildung 24: Baugruppe Fan Gehäuse

Für die Dokumentation aller detaillierten fertigungstechnischen Erkenntnisse wird ergänzend auf den KoLiBri-Abschlussbericht der MT Aerospace AG verwiesen.

1.3 Funktionsmusterprüfung

Auf Basis der in AP 1 erarbeiteten Validierungsstrategie ist die Prüfung eines Musters des Faserverbund Fan Gehäuses in Originalgröße konform zu triebwerksnahen Randbedingungen mit Hilfe eines Fanschaufeleinschlagversuches (Fan Blade-Off Versuch) definiert. Dem Fanschaufeleinschlagversuch des KoLiBri Vorhabens liegen mehrere Zielstellungen zugrunde.

Erstens soll die Containment Funktion des Fan Gehäuses in der Faserverbundausführung auf Basis der in AP 2 angewendeten Fertigungsmethode experimentell überprüft werden. Unter Containment Funktion wird eine ausreichend hohe Schutz- bzw. Eindämmungsfunktion für das Notfallszenario einer Schaufelablösung vom Fan Rotor verstanden. Schaufelbruchstücke dürfen nicht nach vorn oder seitlich aus dem Triebwerk austreten, um Einschläge in die Primärstruktur des Flugzeuges zu verhindern und eine sichere Landung zu ermöglichen.

Zweitens soll mit der Funktionsmusterprüfung ermittelt werden, inwieweit die Vergleichbarkeit und Ähnlichkeit gegenüber den Erkenntnissen aus einem vorhergehenden, internen Rolls-Royce Fan Blade-Off Test unter Bezug auf Prüfstandunterschiede vorliegt.

Neben diesen beiden Hauptzielen wird mit dem Fanschaufeleinschlagversuch das Ziel verfolgt, zwei verschiedene Faserverbund-Herstellmethoden hinsichtlich ihres Einflusses auf die Containment Funktion zu untersuchen. Diese letzte Zielstellung wurde im Zuge der Neuausrichtung und Restrukturierung des Vorhabens sukzessive entwickelt (vgl. Abschnitt 3.2). Unter Berücksichtigung des zur Verfügung stehenden Budget- und Zeitrahmens sind deshalb zweiten Halbjahr 2015 zwei Funktionsmustertests festgelegt worden. Einer der Tests greift auf ein im Forschungsvorhaben ForTe (FKZ 20T1315) entwickeltes Faserverbund Fan Gehäuse zurück; der andere auf das in KoLiBri in AP 2 mit dem Wickelverfahren und RTM-Prozess hergestellte Gehäuse. Die Bewertung der Containment Funktion erfolgt qualitativ anhand potentieller Fanschaufelpenetrationen in bzw. durch die Gehäusestruktur und anhand der Lokalisierung von Fanschaufelbruchstücken außerhalb des Gehäuses.

Die für das KoLiBri Vorhaben relevanten Anforderungen an den Fan Blade-Off Versuch sind in ein Anforderungsdokument eingeflossen, das dem ILK im zweiten Quartal 2015 zur Verfügung gestellt wurde. Auf Grundlage dieser Anforderungen sind in enger Zusammenarbeit zwischen RRD und ILK Komponenten zur Anpassung eines bereits am ILK vorhandenen Rotationsprüfstandes entwickelt und beschafft worden. Eine Übersichtsdarstellung des Prüfaufbaus zeigt Abbildung 25.

Die triebwerksrelevanten Komponenten wie bspw. die Zusatzstrukturen, die die Anschlusssteifigkeiten vor und hinter dem Fan Gehäuse repräsentieren, sowie die Fanschaufeln einschließlich der Sprengladungen sind von RRD entwickelt bzw. beschafft

worden. Die Entwicklung und Beschaffung aller prüfstandsbezogenen Komponenten, wie z. B. die Fanglager, Teile der Schutzgehäuse sowie die Rotorbaugruppe exklusive Fanschaufeln lag beim ILK.

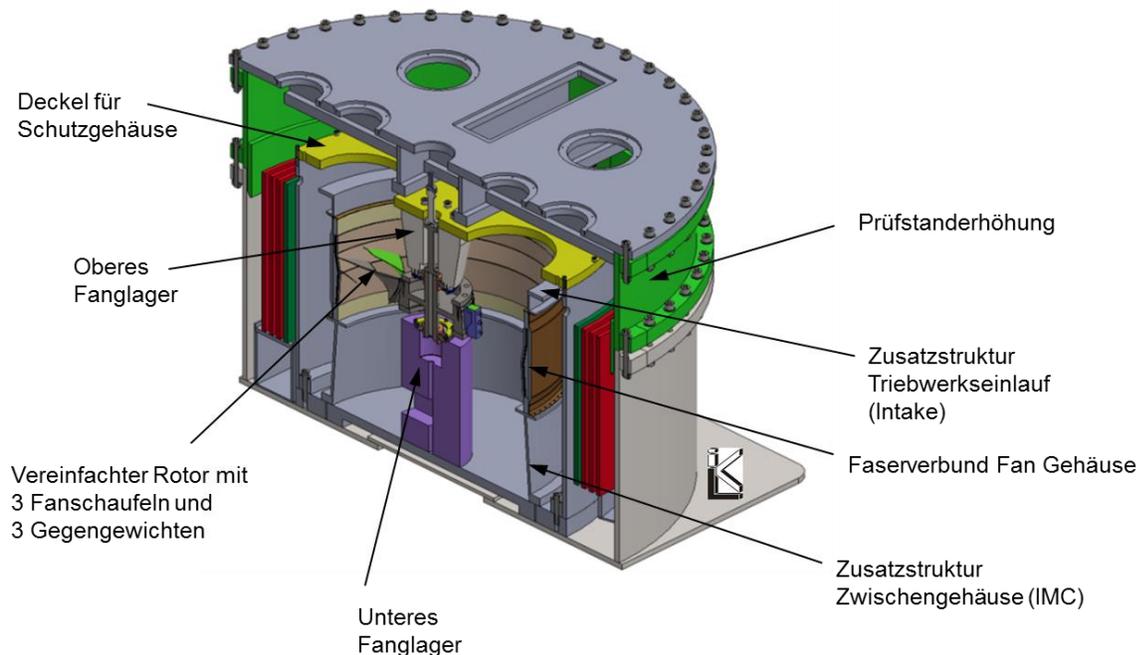
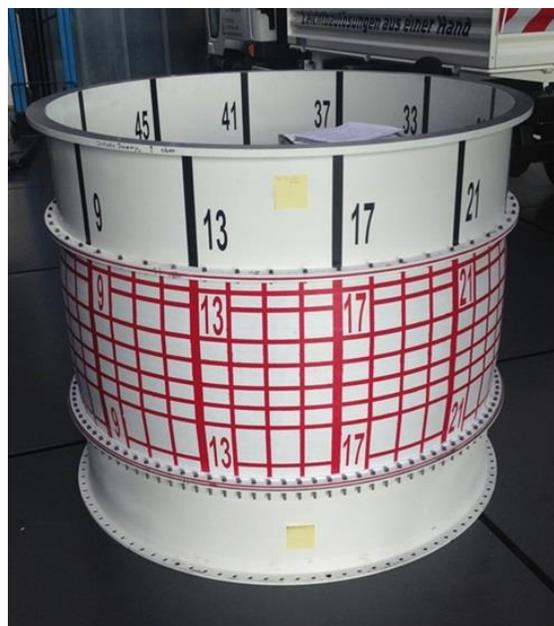


Abbildung 25: CAD-Modell des Rotorprüfstandes

Speziell für die Rotorbaugruppe ist in enger Zusammenarbeit zwischen RRD und dem ILK eine detaillierte Analyse der Rotordynamik durchgeführt worden, um die Masse und Steifigkeitsverhältnisse der Baugruppe so einzustellen, dass ein sicherer Hoch- und Herunterlauf bis zur bzw. von der Zieldrehzahl sichergestellt ist. Während der Untersuchungen hat sich gezeigt, dass die Simulationsergebnisse zum Teil sehr sensitiv auf die Veränderung von Eingangsparametern reagieren. Bspw. haben Dämpfungsannahmen großen Einfluss auf die Systemeigenfrequenzen, was sich wiederum beim Drehzahldurchlauf des Rotors auf die Verformungen und resultierenden Bauteilspannungen auswirkt. Bspw. lässt sich die tatsächliche Systemdämpfung im Moment des Kontaktes zwischen Rotor und Fanglager nach der Abspaltung der Fanschaufel mit verhältnismäßigem Aufwand innerhalb der Projektrahmenbedingungen nicht ermitteln. Die Prognose des Rotorverhaltens und der resultierenden Beanspruchung von Prüfstandkomponenten stellen entsprechend Abschätzungen der Realität dar.

Die Umsetzung des Prüfstandes für den Fan Blade-Off Versuch zeigt Abbildung 26. Der Aufbau des Funktionsmusters mit den Zusatzstrukturen für die Anschlusssteifigkeiten ist in Abbildung 27 dargestellt.

**Abbildung 26: Rotorprüfstand****Abbildung 27: Funktionsmustersaufbau**

Die Durchführung des Fan Blade-Off Tests war ursprünglich für das vierte Quartal 2015 geplant. Der Arbeitsaufwand, speziell für die in AP 1 durchgeführten numerischen Simulationen (vgl. Abschnitt 1.1) und die oben beschriebenen Prüfstandanpassungen wurde zu gering eingeschätzt, weshalb es zu einem signifikanten zeitlichen Verzug im Projektablauf kam. Trotz einer Projektlaufzeitverlängerung bis einschl. April 2016 konnte der erste Funktionsmustersertest erst im Juli 2016 nach Ende der Projektlaufzeit erfolgreich durchgeführt werden. Aufgrund der frühzeitigeren Verfügbarkeit des ForTe Gehäuses wurde der erste Fan Blade-Off Versuch mit diesem Gehäuse durchgeführt. Der zweite Test für das in KoLiBri hergestellte Gehäuse ist für das zweite Halbjahr 2016 geplant.

Das Resultat der Funktionsmusterprüfung kann daher nur für den ersten Versuch berichtet werden. Aufgrund des fortgeschrittenen zeitlichen Verzuges muss auf die detaillierte Gegenüberstellung zwischen Berechnungs- und Versuchsergebnissen und die Anpassung von Simulationsmodellen verzichtet werden. Als Ergebnis des ersten Fan Blade-Off Versuches kann festgehalten werden, dass mit dem im KoLiBri Vorhaben entwickelten Rotorprüfstand ein Fanschaufeleinschlag in ein Gehäusemuster in Originalgröße getestet werden kann. Das Potential, derartige Versuche mit Hilfe eines vereinfachten Prüfaufbaus zu einem Bruchteil der Kosten und deutlich schneller im Vergleich zu hausinternen Versuchen von RRD durchzuführen, konnte praktisch nachge-

wiesen werden. Entsprechend kann der Entwicklungsreifegrad von zukünftigen Fan Gehäusestrukturen auf Basis dieser alternativen Prüfmethode insgesamt deutlich zügiger zu erreicht werden.

Für den Prüfkörper selbst kann die Containment Funktion hingegen noch nicht nachgewiesen werden. Auf Grundlage einer ersten Inspektion ist festzuhalten, dass sowohl eine Penetration des Faserverbundwerkstoffes als auch die Bewegung von Fanschaukelbruchstücken aus der Öffnung der oberen Zusatzstruktur (Triebwerkseinlauf, vgl. Abbildung 25) und damit außerhalb des Fan Gehäuse Innenraumes stattgefunden hat.

Insgesamt vermittelt das Schädigungsbild der Faserverbund Gehäusebaugruppe (inkl. Liner) den Eindruck einer zu geringen Widerstandsfähigkeit gegen die schnittförmige Bewegung der Fanschaukelspitze. Die glatt gebrochenen Kohlenstofffaserlagen mit einem relativ kleinen Deformations- und Schadensfeld um den Einschlagpunkt, lassen für Teilbereiche der Gehäusewandung eine zu hohe Steifigkeit, respektive zu geringe Nachgiebigkeit vermuten. Das Werkstoffversagen des Faserverbund Gehäuses ist im Gesamteindruck sehr ähnlich im Vergleich zu den bereits vorhandenen Testergebnissen von RRD. Somit kann eine gute Vergleichbarkeit von Testergebnissen zwischen dem komplex ausgeführten RRD-Prüfstand und dem einfacher ausgeführten ILK-Prüfstand attestiert werden.



Abbildung 28: Ansicht des Prüfstandinnenraumes nach der Funktionsmusterprüfung

Abschließend hat die erste Funktionsmusterprüfung gezeigt, dass Veränderungen am Prüfstand notwendig sind. Während des Herunterfahrens des Rotors nach erfolgreicher Absprengung kam es zum Versagen mehrerer Prüfstandkomponenten. Dies zog signifikante Beschädigungen an Zusatzstrukturen, Schutzgehäuse, Lichtinstallation, Instrumentierung uvm. nach sich. Die Modifikationen und Reparaturmaßnahmen führen zu einer zeitlichen Verzögerung des geplanten Folgeversuches.

1.4 Fertigungsbezogene Modellierungswerkzeuge

Die in AP 4 erarbeiteten Modellierungswerkzeuge fokussieren konform zum Gesamtfokus des KoLiBri Vorhabens auf Fertigungsverfahren mit trocken abgelegten 3D-Textilstrukturen, die anschließend per Injektionsverfahren (RTM) zu einem Faserverbundwerkstoff konsolidiert werden. Die Arbeitsinhalte betreffen vorrangig generische Fragestellungen der Fertigungsprozessmodellierung in Kombination mit der Analyse mechanischer Werkstoffeigenschaften.

Mit den in AP 1 identifizierten Bauteilklassen und den in AP 2 untersuchten Fertigungsverfahren sind Modellierungsarbeiten in drei Hauptrichtungen durchgeführt worden: Erstens, die Simulation von periodischen Faserarchitekturen am Beispiel einer Gewebearchitektur mit Atlasbindung. Zweitens die Modellierung des Fertigungsverfahrens Wickeln und der daraus resultieren Faserarchitektur am Beispiel einer Triebwerkswellengeometrie. Und drittens die Simulation von industriellen Harzinfiltrationsprozessen, am Beispiel einer gewickelten, im RTM-Verfahren infiltrierten Faserarchitektur für eine Triebwerkswelle.

Für die Modellierungsaktivitäten wurden mehrere Forschungs- und Entwicklungsaufträge in einer Projektphase vor der Neuausrichtung und Restrukturierung des gesamten KoLiBri Vorhabens vergeben, weshalb die Anwendungsbeispiele in der ursprünglichen Definition belassen und nicht spezifisch auf Gehäusegeometrien angepasst wurden. Ohnehin sind die Simulationsaufgaben so generisch gestellt, dass die Ergebnisse auch auf Gehäusestrukturen übertragbar sind. Dies gilt speziell für das Faserwickeln, das sehr flexibel je nach Durchmesser und Länge des Wickelkerns von einer Wellengeometrie zu einer Gehäusegeometrie angepasst werden kann.

Für das Teilarbeitspaket der Gewebemodellierung ist eine Kooperation zwischen den Universitäten von Dresden und Bristol, beides Teile des Rolls-Royce University Technology Center Netzwerkes, vereinbart worden. Während die Simulationsaufgaben von der Universität Bristol (University of Bristol, UoB) durchgeführt werden, übernimmt das ILK Dresden die Charakterisierung von trockenen, textilen Verstärkungsfasern und von konsolidierten Laminaten. Zur Herstellung der erforderlichen Probekörper wurde die Leichtbauzentrum Sachsen GmbH (LZS), ein Transferunternehmen der TU Dresden AG, per FuE-Auftrag eingebunden. Die LZS-Beauftragung dient weiterhin der Durchführung von Permeabilitätsmessungen für die Simulation der Harzinfiltration trocken abgelegter Verstärkungsfasern. Für die Arbeiten zur Modellierung des Faserwickelns ist eine Zusammenarbeit zwischen RRD und dem auf numerische Simulationen spezialisierten Unternehmen Engineering System International GmbH (ESI) per FuE-Vertrag arrangiert worden.

In Bezug auf das Werkstoffsystem werden entsprechend den Erkenntnissen in AP 2 Kohlenstofffasern vom Typ Toho Tenax IMS 65 und das Epoxydharz Hexcel RTM 6 als Matrixwerkstoff für die Modellierung herangezogen.

Gewebemodellierung

Eine sehr häufig verwendete textile Faserarchitektur für die Verstärkung in Verbundwerkstoffen ist die Gewebearchitektur mit Atlasbindung. Derartige Gewebe sind kommerziell sehr stark verbreitet und werden für eine Vielzahl von Faserverbund-Triebwerkskomponenten eingesetzt. Die Eigenschaften des Verbundwerkstoffes sind sowohl von der Geometrie der einzelnen Garne als auch der Geometrie des textilen Flächengebildes abhängig. Speziell Inhomogenitäten, wie z. B. Faserondulationen, haben Einfluss auf die sich lokal ausbildenden Faservolumengehalte und somit auf die Eigenschaften des Werkstoffverbundes.

Aufgrund der Vielzahl der verfügbaren Gewebearten eignet sich ein Modellierungsansatz auf Basis von Einheitszellen, deren Faserarchitektur jeweils mit einzelnen Garnen aufgebaut wird. Im KoLiBri Vorhaben wurden verschiedene Softwarelösungen für eine derartige die Gewebemodellierung miteinander verglichen (s. Tabelle 2).

	TexGen	WiseTex	Digital Elements Method
Verfügbarkeit	Kommerziell verfügbar	Kommerziell verfügbar	Nicht kommerziell verfügbar
Modellierungsansatz	geometriebasiert	physikalisch begründet	physikalisch begründet
Reverse Engineering	ja	nein	zum Teil
Diskretisierung	Kontinuum	Kontinuum	Multiple Filamente

Tabelle 2: Vergleich der Softwarelösungen für die Gewebemodellierung

Die Digital Element Method (DEM) stellt eine Lösung dar, die von der UoB entwickelt allerdings bisher noch nicht kommerzialisiert wurde und basiert der auf physikalisch begründeten Modellierung. Die Gewebearchitektur wird hierbei auf die mechanischen Eigenschaften der trockenen Fasern zurückgeführt. Ein Programm, das ebenfalls auf der physikalisch begründeten Modellierung von Faserarchitekturen beruht und kommerziell verfügbar ist, ist das Programm WiseTex. Der Vorteil der physikalisch begründeten Modellierung besteht in der Prognose der Faserverläufe und damit der mechanischen Eigenschaften, wie z. b. die Laminatsteifigkeit, ohne aufwendiges Kalibrieren von Modell-Eingangsparemtern im Sinne des Reverse Engineering. Um zu mechani-

schen Werkstoffkennwerten für die Vorauslegung von Faserverbund-Triebwerkskomponenten zu gelangen, sind im KoLiBri Vorhaben die Software-Lösung von WiseTex und die DEM untersucht worden (s. Abbildung 29).

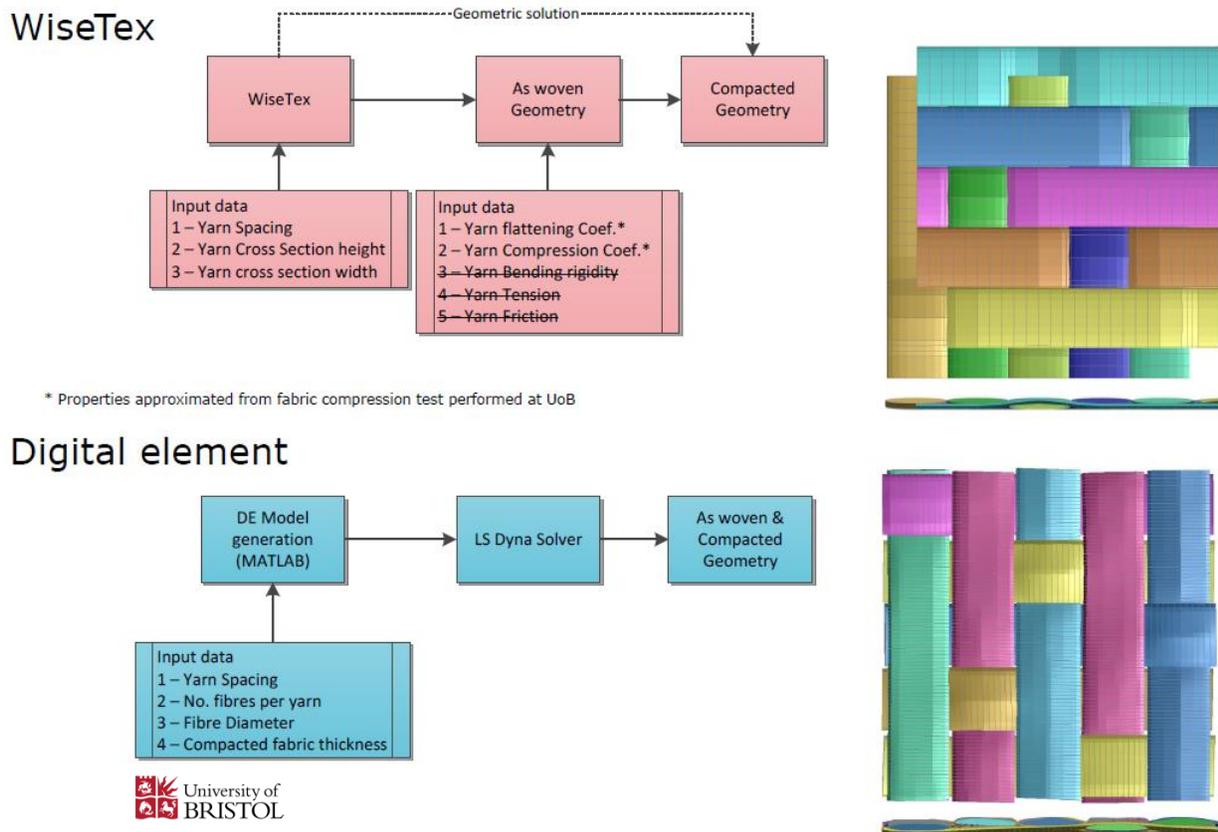


Abbildung 29: Gewebe-Simulation Wisetex / Digital Element Method (DEM)

Die Analyse der Funktionalität der beiden Modellierungswerkzeuge bezieht sich dabei zum einen auf eine kompaktierte Einzellage und zum anderen auf den kompaktierten Aufbau mehrerer, übereinander liegender Gewebelagen. Für die Untersuchung eines mehrlagigen Gewebeaufbaus wurde eine Prozesskette programmiert, die aus mehreren, ineinander greifenden MatLab- und Python-Skripten besteht, um Eingabe-, Berechnungs- und Ausgabewerkzeuge miteinander zu koppeln.

Zur Modellvalidierung sind in enger Zusammenarbeit zwischen RRD, der UoB und dem ILK die Berechnungen der Mehrlagen-Kompaktierung mit Hilfe von Computertomographie(CT)-Messungen validiert worden. Der Vergleich zwischen CT-Messung und Simulation zeigt eine gute Übereinstimmung (s. Abbildung 30). Obwohl die Simulation mit WiseTex kompaktierte Gewebearchitekturen mit idealisierten Querschnittsgeometrien der einzelnen Garne wiedergibt, kann eine hinreichende Prognosegüte für den Gesamtquerschnitt der Gewebearchitektur festgestellt werden. Die DEM errechnet die

Einzelgarnquerschnitte weniger idealisiert, nah an gemessenen Querschnittsgeometrien und zeigt daher ebenfalls eine gute Übereinstimmung zur CT-Messung für den Gesamtquerschnitt. Für die DEM besteht eine Tendenz der Berechnung überhöhter Garnspreizungen, was zu einer leichten Unterschätzung der lokalen Faservolumengehalte führt.

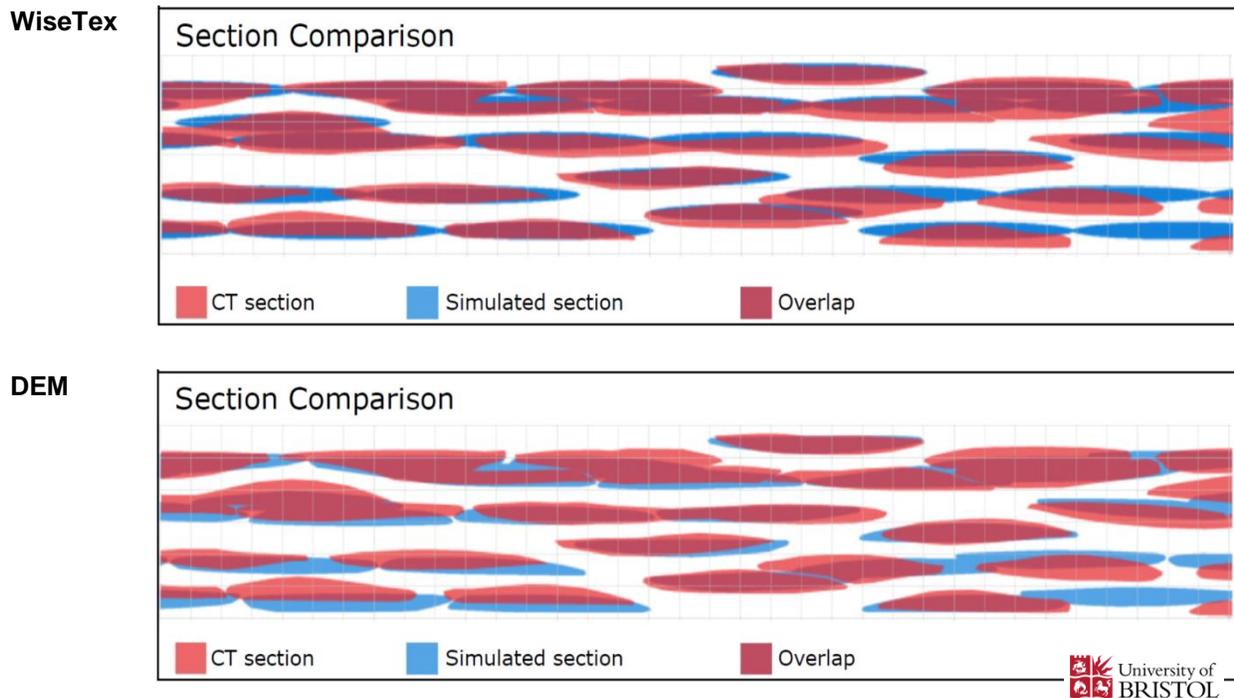


Abbildung 30: Validierung der Faserverläufe im Gewebe (WiseTex und DEM)

Für die Kompaktierungssimulation kann festgehalten werden, dass WiseTex mit zunehmendem Kompaktierungsgrad die Erhöhung des Faservolumengehaltes ohne die Reduktion von Faserondulationen zurückgibt. Die DEM Analyse zeigt bei zunehmender Kompaktierung ebenfalls den Anstieg des Faservolumengehaltes und zusätzlich das Absinken von Faserondulationen. Während mit der DEM Simulation Faserondulationen und Faservolumengehalt lokal diskretisiert verfügbar sind, löst WiseTex den sich erhöhenden Faservolumengehalt nicht über mehrere lokale, periodische Muster hinweg auf (s. Abbildung 31).

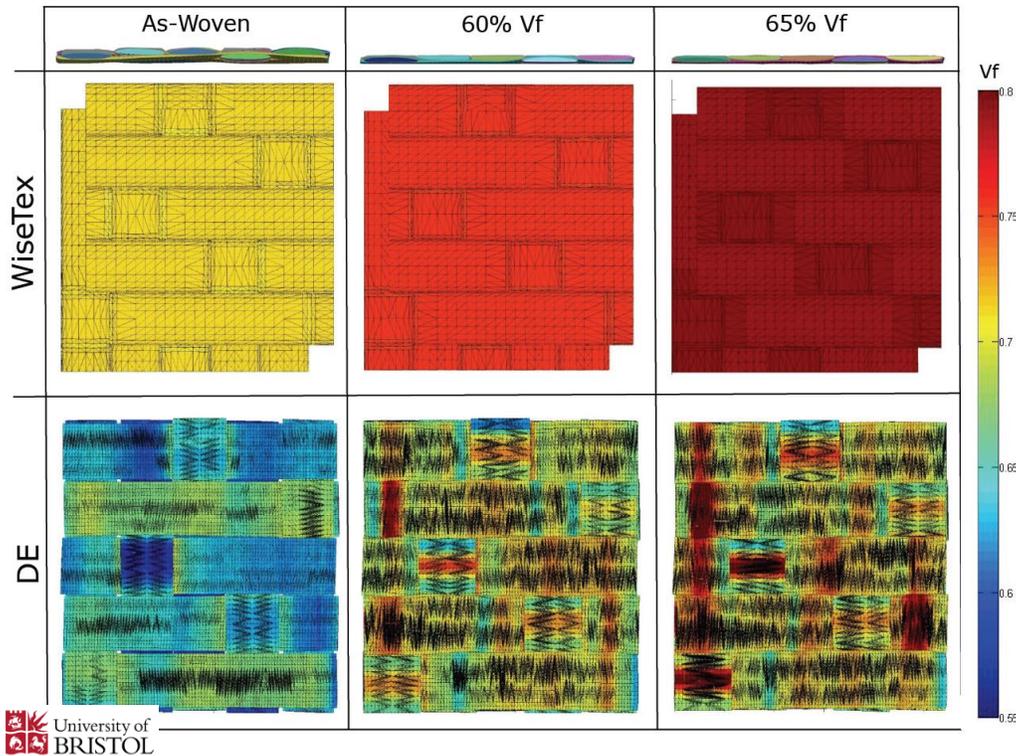


Abbildung 31: Vergleich des Faservolumengehaltes nach Kompaktierungsgrad

Für die mechanischen Eigenschaften eines gewebeverstärkten Verbundwerkstoffes ergibt sich analog zur Prognose des Faservolumengehaltes eine Unterschätzung der Steifigkeiten sowohl für die DEM als auch für die Simulation mit WiseTex gegenüber den am ILK gemessenen Kennwerten. Die Prognosegüte im Vergleich zu einfachsten analytischen Berechnungsmethoden, wie der Mischungsregel, konnte für die Steifigkeitseigenschaften unwesentlich verbessert werden. Eine signifikante Abhängigkeit der Ergebnisse hat sich für die Anzahl der Lagen gezeigt. Das Verständnis über den Umfang und die Effektstärke der Einflussfaktoren ist mit den Arbeiten des KoLiBri Vorhabens noch in einem Anfangsstadium. Entsprechend werden deutlich bessere Prognosegüten für die Vorhersage der Festigkeitseigenschaften von Faserverbundwerkstoffen erwartet, die allerdings Inhalt weiterführender Arbeiten in zukünftigen Forschungsprogramme sein müssen.

Modellierung Faserwickeln

Für Faserverbund-Triebwerkskomponenten wird im zweiten Teil des AP 4 das Fertigungsverfahren Faserwickeln als Prozessmodellierung in ein Berechnungswerkzeug überführt, mit dem die Beschreibung mechanischer Werkstoffeigenschaften auf Grundlage einer gewickelten Faserarchitektur ermöglicht werden soll. Als Anwendungsbeispiel wird die Wellengeometrie des Radial Drive Shaft (vgl. Abbildung 3) verwendet.

Das Konzept des Modellierungswerkzeugs beruht zum einen auf der numerischen Beschreibung des Wickelprozesses und zum zweiten auf der Erstellung eines Softwarebausteins mit grafischer Benutzeroberfläche zur Steuerung der hinterlegten Numerik. Die einzelnen Prozessschritte von der Modellgenerierung bis zur Simulation sind über eine Prozesskette miteinander verknüpft. Der konzeptionelle Aufbau der Prozesskette ist in Abbildung 32 dargestellt.

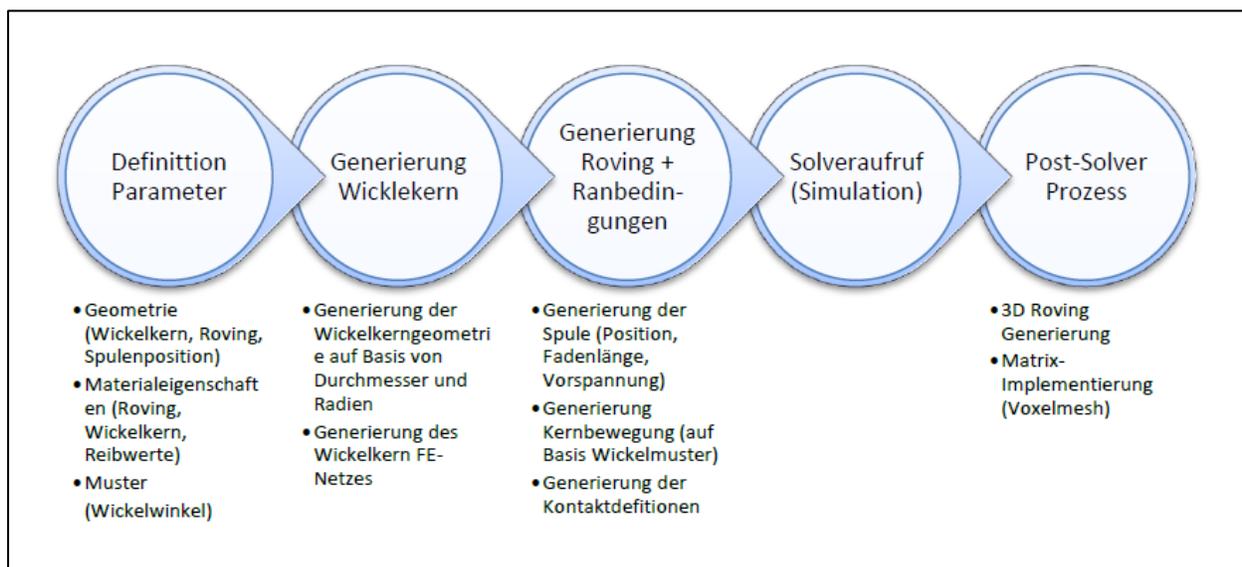


Abbildung 32: Prozesskette zur FE-Modell-Generierung

Mit den Benutzereingaben erfolgt im ersten Schritt des Prozesses die Generierung des Wickelkerns bestehend aus Geometrieerstellung und anschließender Überführung in ein Finite Elemente (FE) Netz. Im nächsten Prozessschritt wird das Garn- bzw. Roving-Modell generiert und die erforderlichen Randbedingungen (z.B. Kontaktbedingungen) in das FE-Modell integriert. Zudem erfolgt hier die Definition der einzelnen Bauteilbewegungen auf Basis des gewählten Wickelmusters. In den letzten beiden Schritten wird die Wickelsimulation gestartet und anschließend die dreidimensionale Roving-Struktur erzeugt, welche dann im finalen Schritt zur Modellbeschreibung des Faserverbundwerkstoffs benutzt wird. Die Prozesskette ist mit generischen Routinen und entspre-

chenden Übergabeparametern ausgestattet, so dass die Wickelgeometrien parametrisiert in Abhängigkeit von den Benutzereingaben, wie z. B. Durchmesser in Abhängigkeit von der Bauteillängsachse, aufgebaut werden.

Zur Reduktion der Komplexität der numerischen Randbedingungen basiert die erste Prozessstufe der Simulation auf einer Beschreibung der Garnpfade mit Hilfe eines zweidimensionalen Schalenmodells (s. Abbildung 33). Dies ermöglicht die Berücksichtigung der Reibeffekte sowohl zwischen einzelnen Garnen als auch zwischen Textil und Wickelkern sowie von Einschnürungen von Garnquerschnitten an Umlenkpunkten.

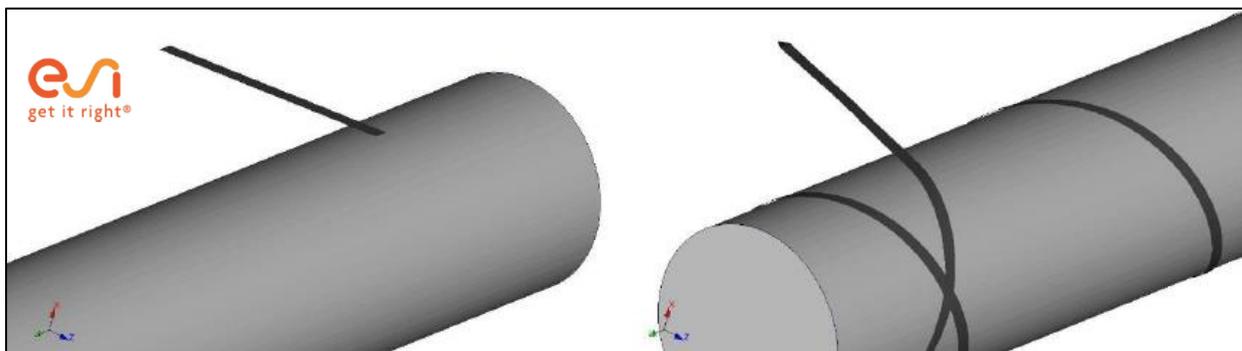
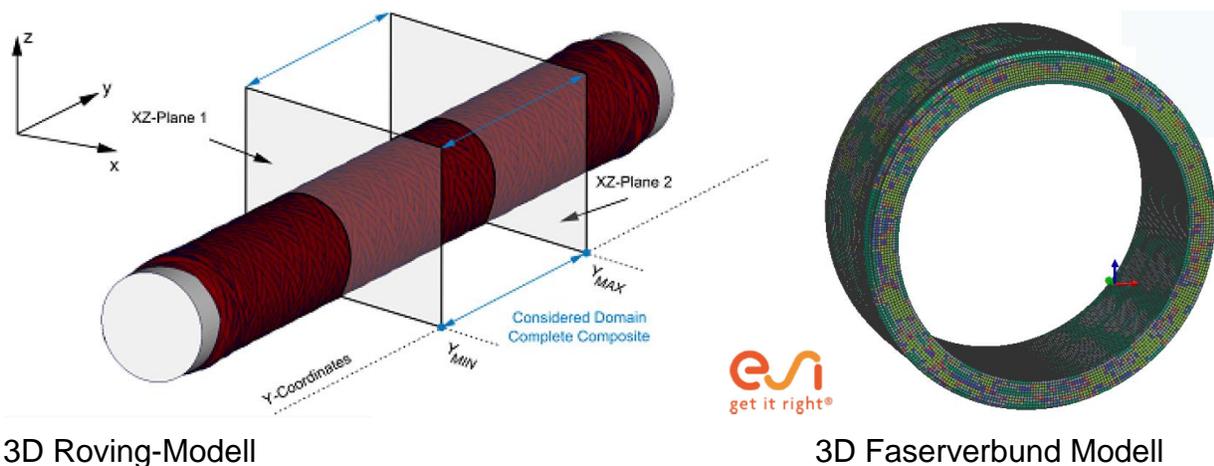


Abbildung 33: 2D Simulationsansatz zum Wickeln rotationssymmetrischer Bauteile

Die zweidimensionale Beschreibung der Garnpfade wird während der Prozesssimulation in ein dreidimensionales Garn- bzw. Roving-Modell überführt (s. Abbildung 34, links). Nach der Auswahl eines Analysebereiches entsteht für diesen im nächsten Schritt das finale dreidimensionale FE-Modell der gewickelten Faserarchitektur.



3D Roving-Modell

3D Faserverbund Modell

Abbildung 34: Modellaufbau der gewickelten Faserarchitektur

Im Unterschied zur konventionellen Modellierung einer gewickelten Faserverbundstruktur, ist die Modellierung direkt an die numerische Nachbildung des Fertigungsprozesses gekoppelt. Die mit diesem Berechnungswerkzeug generierten finiten Elemente weisen Eigenschaften auf, die nicht idealisiert angenommen werden, sondern den tatsächlichen Faserverläufen des Wickelmusters einschl. realitätsgetreuer Garndeformationen entsprechen.

Zur einfachen Handhabung der komplexen Simulationskette wurde zusätzlich zu den Berechnungsalgorithmen eine grafische Benutzeroberfläche innerhalb von Visual Environment realisiert (s. Abbildung 35). Diese ist in zwei Hauptbereiche unterteilt: während der erste Bereich die Eingabemöglichkeiten für die Faserkinematik beim Wickelvorgang zur Verfügung stellt, fokussiert der zweite Bereich auf die Verarbeitung der Simulationsergebnisse und die Eingabemöglichkeiten für die Erstellung des finalen Faserverbundmodells auf Basis der finiten Elemente.

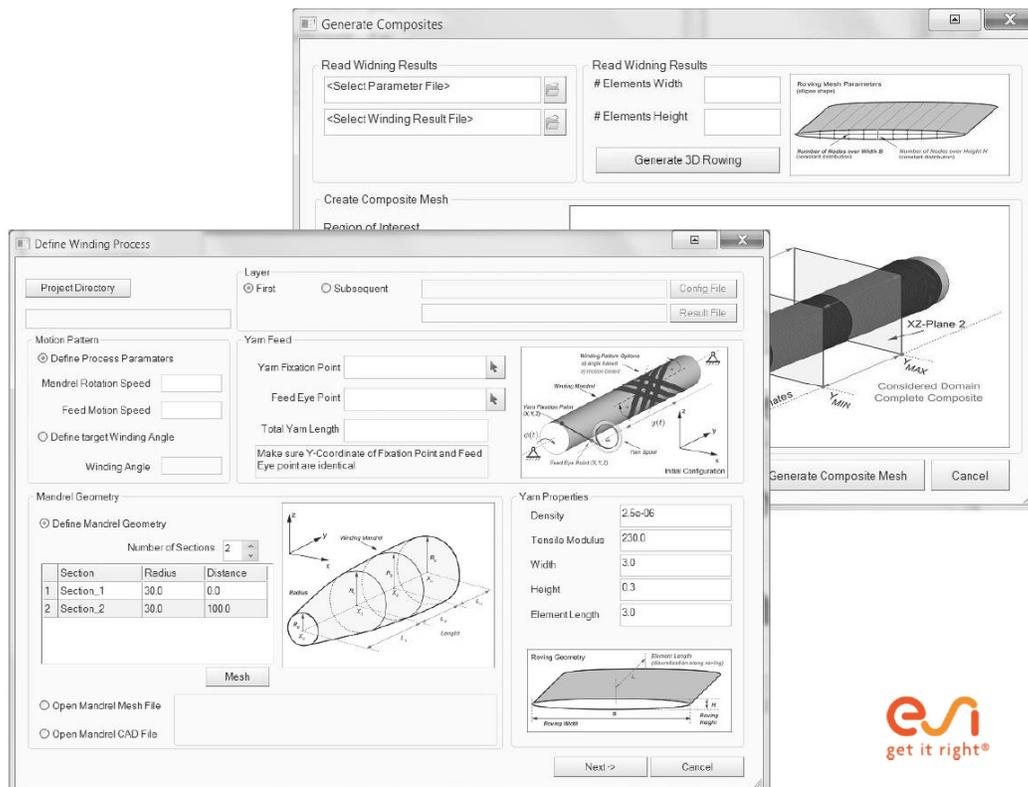


Abbildung 35: Benutzeroberfläche des Modellierungswerkzeuges für das Faserwickeln

Diese Zweiteilung ermöglicht es dem Anwender, die zu einem früheren Zeitpunkt gewonnenen Ergebnisse einer Wickelsimulation wiederholt für die nachgelagerte Generierung des Faserverbundmodells mit variierten Parametern zu nutzen.

Zur Validierung der Faserwickel-Modellierung wurden Faserverbund Rohrprobekörper am LZS hergestellt. Im Verlauf der Arbeiten sind allerdings erhebliche Fertigungsproblematiken in puncto harzflussinduzierte Faserverschiebungen, Harzanreicherungen, Luft einschlüsse und unzureichende Harzdurchtränkung aufgetreten (s. Abbildung 36). Aufwand und Zeitbedarf für die Herstellung der Rohprobekörper sind entsprechend erheblich größer ausgefallen als ursprünglich geplant.

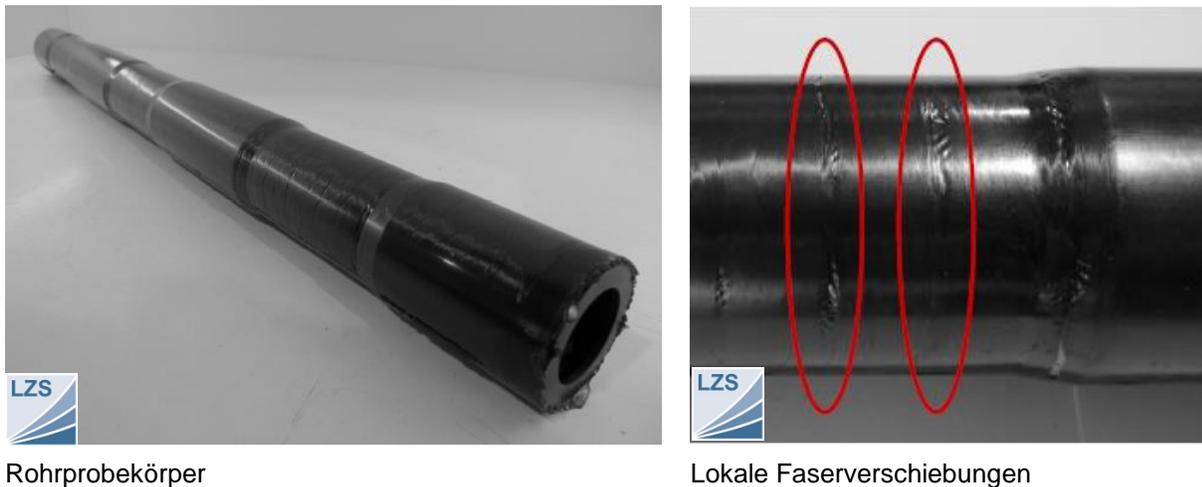


Abbildung 36: Rohprobekörper

Aus diesem Grund konnten die Validierungsarbeiten bis zu einem vorläufigen Ergebnisstand geführt werden. Aus der Rohrprobekörperprüfung geht hervor, dass die gemessene Laminatdicke der Faserwicklung im Vergleich zur Simulation deutlich niedriger ausfällt. Die erarbeiteten Erklärungsansätze führen diese Beobachtung auf eine unzureichende Verzerrungsmöglichkeit der Garnquerschnitte sowie unrealistische Kontaktbedingungen bzw. -steifigkeiten zwischen den Garnen bei größeren Überlappungen der Wicklungen zurück. Das Modellierungswerkzeug für das Faserwickeln ist ungeachtet dessen zum Ende des KoLiBri Vorhabens in Gänze numerisch stabil und über die Benutzeroberfläche voll funktionsfähig. Die Weiterführung der Validierungsarbeiten einschließlich der Optimierung des Modellierungsalgorithmus für die Garnquerschnitte ist bereits in ein erstes separates Folgeprojekt zwischen RRD und ESI eingeflossen.

Infiltrationssimulation

Die Herstellung von Faserverbund-Triebwerkskomponenten erfordert neben der Ablage der Verstärkungsfasern auch deren Einbettung in den Matrixwerkstoff. Entsprechend der Fokussierung des KoLiBri Vorhabens wird im AP 4 die Harzinjektion mit Hilfe des RTM-Verfahrens behandelt. Daher konzentriert sich ein Teil der Arbeiten auf die Modellierung von Infiltrationsvorgängen, mit Hilfe der die Fließfrontvorhersage ermöglicht wird, so dass bauteilspezifische Injektions-Strategien entwickelt und Füllvorgänge optimiert werden können. Dabei spielt nicht nur die Verringerung von Füllzeiten, sondern auch eine Verbesserung der Bauteilqualität durch das frühzeitige Erkennen von potentiellen Luftnestern eine Rolle.

Das Konzept des Modellierungswerkzeuges für die Infiltrationssimulation beruht auf mehreren Prozessschritten in verschiedenen Skalen. Der konzeptionelle Aufbau der Prozesskette ist in Abbildung 37 dargestellt.

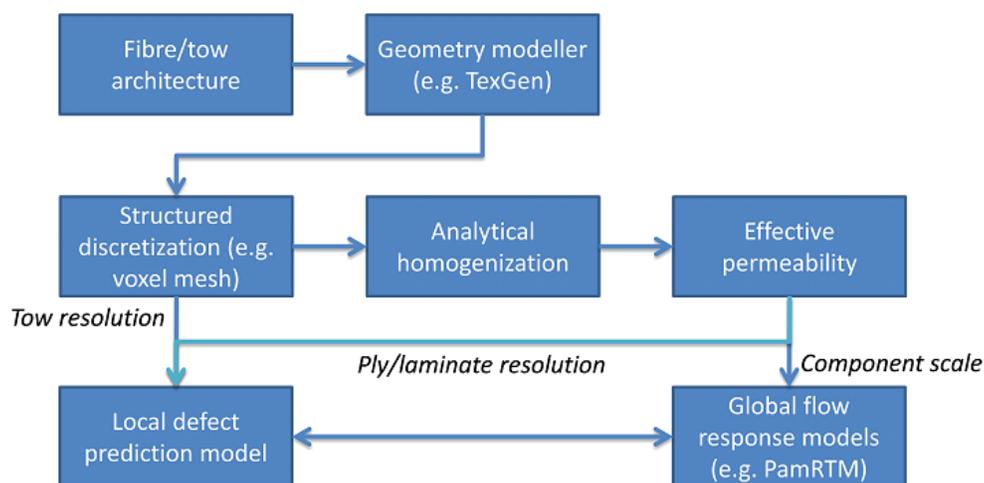


Abbildung 37: Simulationskette für die Vorhersage von Mikroskopischen Luftblasen

Den Beginn des Simulationsprozesses bildet eine analytische Berechnungskette zur Bestimmung von effektiven Permeabilitätseigenschaften der textilen Faserarchitektur an repräsentativen Volumenelementen (RVE). Die Eigenschaften der Faserverbundstruktur werden anschließend auf den nächstgrößeren Maßstab, die Bauteilebene homogenisiert, womit sich makroskopische Luftnester und Füllzeiten berechnen lassen.

Ein bekanntes Problem bei der Harzinfiltration stellt das Vorhandensein von Luft einschläüssen dar. Während der Infiltration von Faserverstärkungen können Luft einschläüsse in drei verschiedenen Ausprägungen auftreten: erstens als makroskopische Luftbla-

sen, zweitens als mikroskopische Luftblasen und drittens in Form von großflächigen Luftnestern. Makroskopische Luftblasen treten auf, wenn die Geschwindigkeit der Fließfront gering ist und Kapillarkräfte das Harz innerhalb der Faserbündel bzw. Garne schneller fließen lassen als in den Kanälen zwischen den Garnen. Mikroskopische Luftblasen entstehen für den umgekehrten Fall, wenn die Fließfront in den Kanälen schneller als innerhalb der Faserbündel fließt und diese umspült. (s. Abbildung 38)

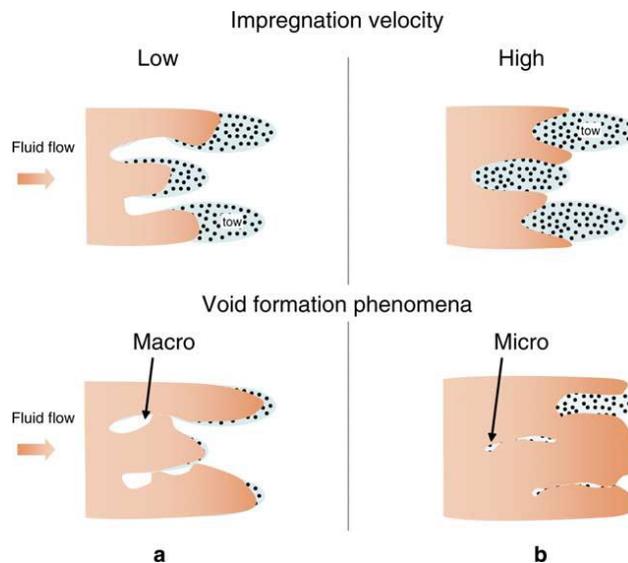


Abbildung 38: Makroskopische und mikroskopische Luftblasenbildung

Die Ausbildung mikro- und makroskopischer Luftblasen ist stark von der internen textilen Struktur sowie Prozessparametern, wie z. B. dem Injektionsdruck abhängig. Makroskopische und mikroskopische Luftblasen werden als unerwünschte eigenschaftsmindernde Defekte bewertet, die aber nicht in jedem Fall zum Ausschluss der produzierten Teile führen müssen. Großflächige Luftnester entstehen, wenn sich aufgrund der räumlichen Gestaltung des Textils Fließfronten derart ungünstig ausbilden, dass großflächige Bereiche umschlossen werden und trocken bleiben. Diese Defektform führt in der Regel zur Ausschussproduktion.

Kommerziell verfügbare Berechnungswerkzeuge, wie PAM-RTM sind zwar in der Lage, großflächige Luftnester vorherzusagen, jedoch sind bislang keine Studien zur unmittelbaren Vorhersage von mikro- und makroskopischen Luftblasen unter Berücksichtigung der lokalen Anordnung der Faserbündeln bekannt. Eine Vorhersage von Luftblasen und damit einhergehende Optimierung von Einflussparametern kann sich vorteilhaft auf die Gesamtqualität von Faserverbund-Triebwerkskomponenten auswirken.

RRD hat daher eine Analyse kommerziell verfügbarer Software-Lösungen, ANSYS und ABAQUS, durchgeführt, um festzustellen, welche physikalischen Wirkzusammenhänge

in den jeweiligen Solvern berücksichtigt werden. Für die Beschreibung von Fließfronten sind folgende Zusammenhänge relevant:

- Fluss durch poröse Medien: Darcy's Gesetz,
- Fluss durch freie Kanäle: Navier-Stokes Gleichungen,
- Kapillarwirkung innerhalb der Faserbündel.

Während ANSYS Fluent keine Möglichkeit für die Berücksichtigung von Darcy's Gesetz vorsieht, ist dies mit ANSYS CFX sowie ABAQUS CFD gegeben, jedoch nur über die Eingabe von isotropen Permeabilitätseigenschaften. Strukturelle Solver von ANSYS und ABAQUS ermöglichen die Berücksichtigung von Darcy's Gesetz über orthotrope Permeabilitätseigenschaften, allerdings können die Navier-Stokes Gleichungen für diese Solver nur durch effektive Permeabilitäten approximiert werden. Die Berücksichtigung der Kapillarwirkung ist mit ABAQUS möglich, während dies bei ANSYS derzeit nicht der Falls ist, weshalb sich der ABAQUS-Standard als Vorzugslösung darstellt.

Im Anschluss wurde von RRD eine Untersuchung über das Fließverhalten von Infiltrationsharz durch periodische Textilstrukturen mit Hilfe von RVE-Modellen durchgeführt (s. Abbildung 39).

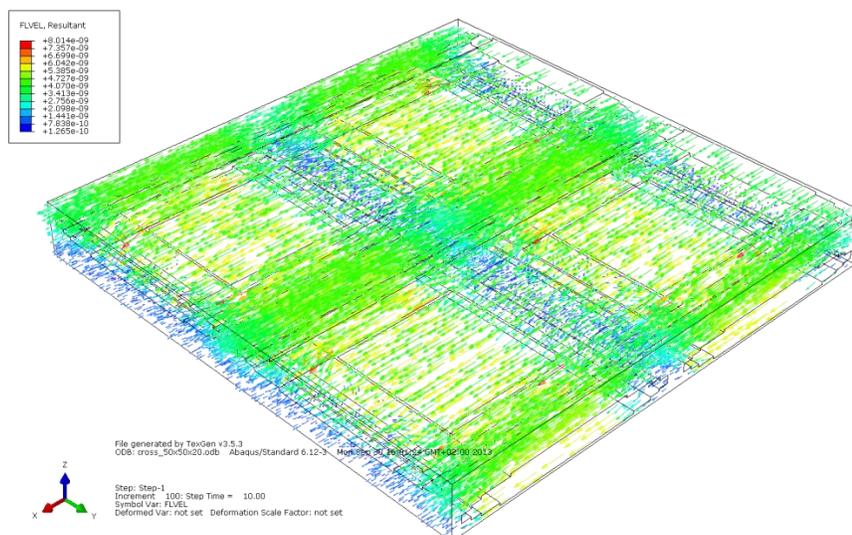


Abbildung 39: ABAQUS RVE-Fließmodell eines gekreuzten Faserbündels

Aus der Fließsimulation für gekreuzte Faserbündel geht hervor, dass der Harzfluss mit dem Gradient des Injektionsdrucks stärker für die faserparallele Richtung korreliert als

für die Richtung senkrecht zum Faserbündel. Das Harz fließt vorrangig parallel zu Faserbündeln bzw. in Faserrichtung. Abweichungen der Flussvektoren treten an Kreuzungspunkten der Garne auf, wo sich das Harz schnell in den Garnzwischenräumen ausbreitet. Daraus folgt, dass Luftblasen potentiell dort entstehen, wo die Flussvektoren inhomogen sind: an Garnrändern und im Bereich von Garnkreuzungen.

Entsprechend sind für eine verbesserte Durchtränkung der textilen Faserverstärkung die Abstände zwischen den Garnen zu minimieren und die Injektionsdrücke so zu reduzieren, dass der schnelle Harzfluss in den Kanälen zwischen den Garnen eingedämmt wird. Weiterhin bietet die Veränderung der Injektionsrichtung senkrecht zu den Faserorientierungen aller textilen Lagen, wie z. B. die Dickenrichtung, und die Reduktion der Winkelabweichung zwischen zwei aufeinanderfolgenden Lagen (z. B. 0/45 statt 0/90) Potentiale zur Reduktion der Luftblasenbildung.

Das Berechnungswerkzeug auf der Ebene der textilen Faserarchitektur liefert eine wichtige Erweiterung des Kenntnisstandes über die potentielle Entstehung von Luftblasen bei der Harzinfiltration. Der Umstand, dass die Simulationsalgorithmen derzeit nur stationäre Lösungen ermöglichen, zeigt den Umstand für zukünftige Forschungsvorhaben in diesem Themenbereich auf.

Zur Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse bzgl. lokaler Defektausbildung bei Harzinfiltrationsprozessen für Faserverbundstrukturen sind im KoLiBri Vorhaben auch Simulationsmodelle auf Bauteilebene erarbeitet worden. Unter Verwendung des kommerziell verfügbaren Berechnungsprogramms PAM-RTM sind Infiltrationssimulationen am Beispiel einer Triebwerkswellengeometrie durchgeführt worden, um Optimierungspotentiale für die textile Faserarchitektur sowie für Fertigungsprozessparameter und Werkzeugkonzepte zu ermitteln. Die Infiltrationssimulation für die Triebwerkswelle greift auf das in AP 2 definierte Werkstoffsystem zurück. Das numerische Modell für die Infiltrationssimulation zeigt Abbildung 40. Einzelne Lagen sind hinsichtlich ihrer Eigenschaftsbeschreibung durch entsprechende Modellsektionen voneinander abgegrenzt, die im linken Bildteil farbig markiert sind. Der rechte Bildausschnitt verdeutlicht die Ausrichtung der Permeabilitätsvektoren, welche orthotrop entsprechend der Faserorientierungen beschrieben sind.

Zur Stützung der Berechnungen auf realitätsnahe Eingangsparameter, speziell die Permeabilitätskonstanten der Textilstruktur, sind im KoLiBri Vorhaben über die Beauftragung des LZS Prüfvorrichtungen entwickelt worden, mit denen anschließend Permeabilitätsmessungen durchgeführt wurden. Die gewonnenen Daten aus der Charakterisierung der gewählten Kohlenstofffasern sind in die Modellerstellung eingeflossen.

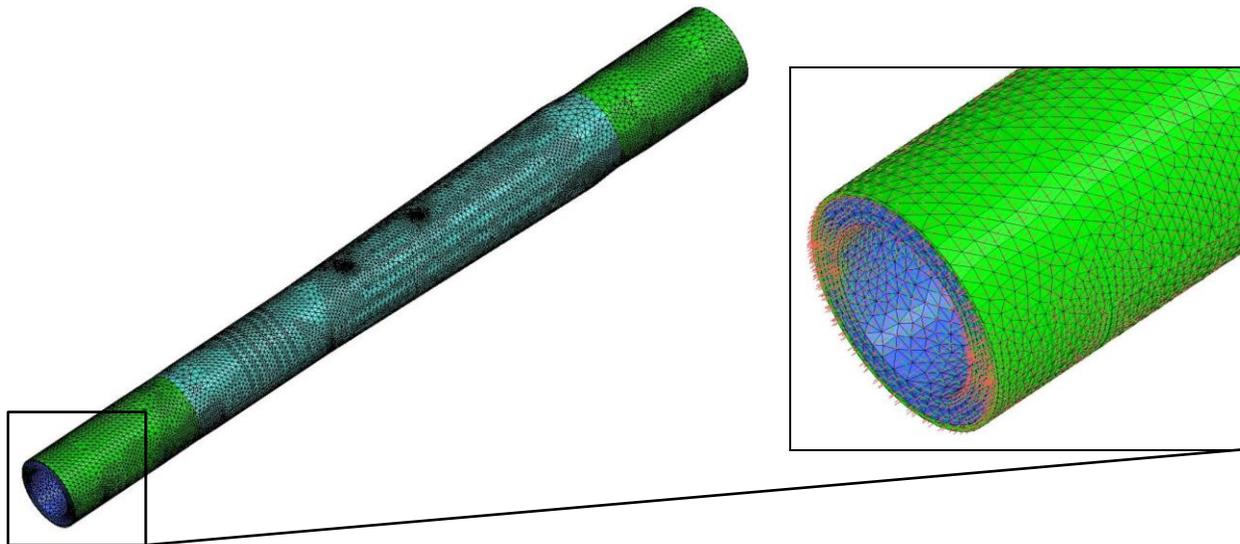


Abbildung 40: Modell einer Faserverbund Triebwerkswelle für die Infiltrationssimulation

Das Prinzip der Probekörperherstellung und die Prüfvorrichtung zur Bestimmung von Permeabilitätskonstanten der ausgewählten Kohlenstofffasern ist in Abbildung 41 dargestellt.

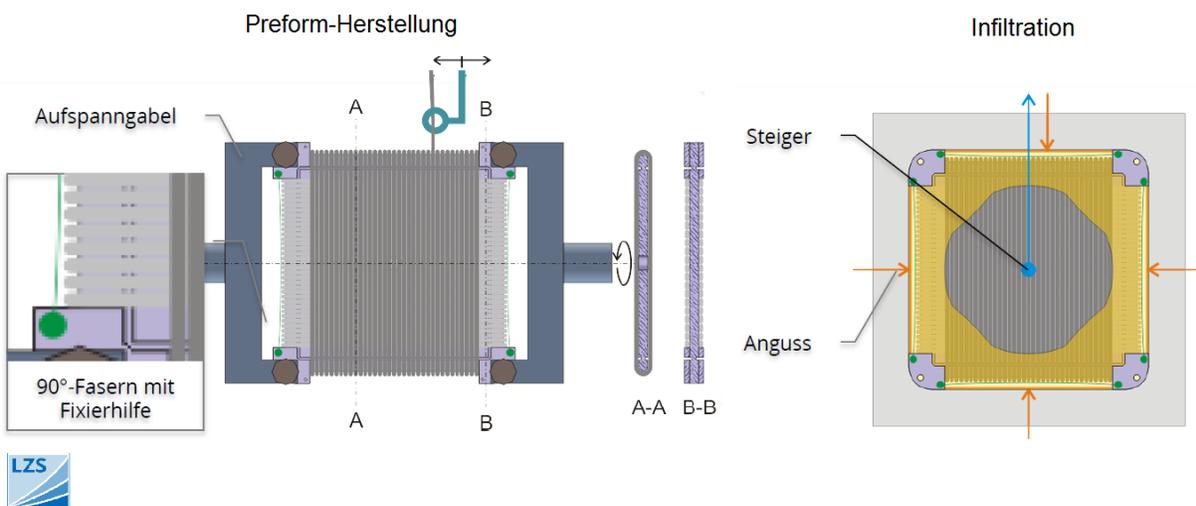


Abbildung 41: Probekörperherstellung und Prüfvorrichtung für die Permeabilitätsmessung

Für die Harzinfiltration sind mehrere Modelle erstellt worden, um verschiedene Einflussgrößen, wie Netzfeinheit, Angussysteme und Lagenorientierungen zu untersuchen. Mit den in vorhergehenden Forschungsvorhaben hergestellten Faserverbund Wellen-

prototypen sind innerhalb von KoLiBri Computertomographie-Messungen durchgeführt worden, um die Messdaten mit den Simulationsergebnissen in Zusammenhang zu bringen. Beispielhaft zeigt Abbildung 42 das Ergebnis zwei verschiedener Rechnungsläufe zur Untersuchung der Netzfeinheit in Verbindung mit zwei gewählten Untersuchungsquerschnitten der CT-Messung.

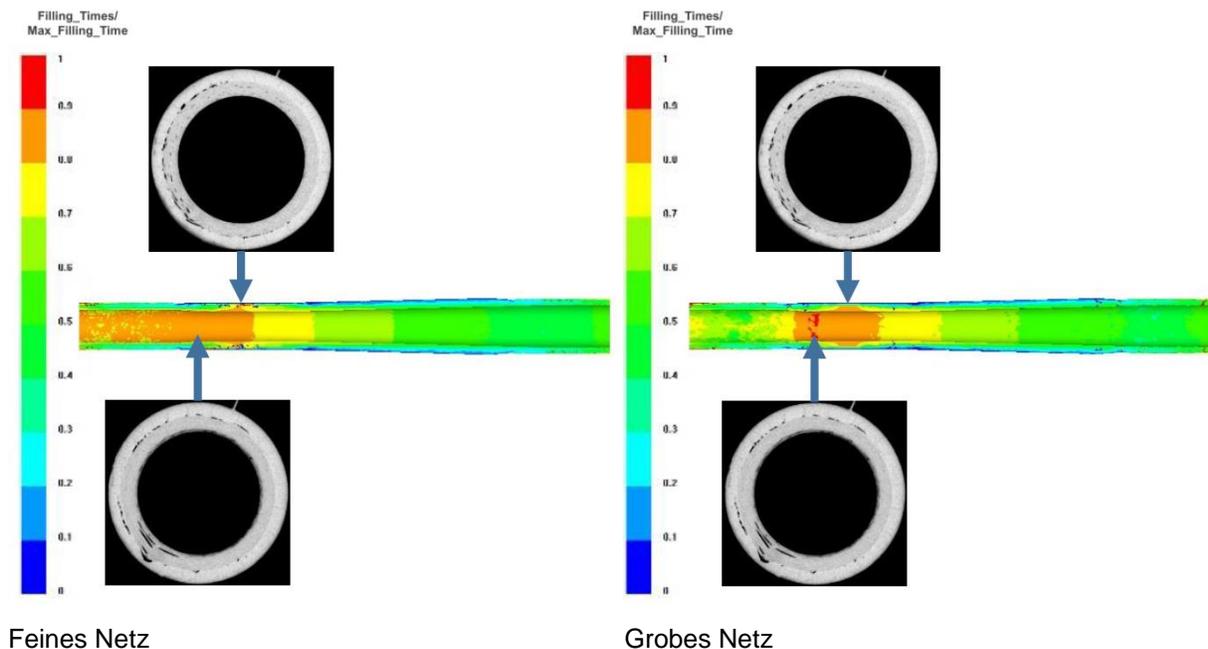


Abbildung 42: Infiltrationssimulationsergebnisse und CT- Querschnittsmessungen

Im Ergebnis der Untersuchung der Netzfeinheit ist festzustellen, dass mit feineren Netzen trockenere bzw. nicht-infiltrierte Stellen tendenziell kleiner, Fließfronten homogener und Sättigungsgrade geringer ausfallen, so dass die Defektausprägungen mit groben Netzen zu eher konservativen Schlussfolgerungen in Bezug auf die Bauteilqualität führen können, während mit feineren Netzen der umgekehrte Fall eintritt. Darüber hinaus haben die Analysen gezeigt, dass eine um 50% feinere Netzstruktur des Modells zu einem Anstieg der Rechenzeit um den Faktor fünf führt. Die Entscheidung für hoch aufgelöste Modelle ist entsprechend durch Beschränkungen hinsichtlich Entwicklungszeiten und -kosten beeinflusst. Aufgrund der zeitlichen Beschränkungen im KoLiBri Projekt sind bis dato nur zwei Feinheitsgrade untersucht worden. Deshalb kann nur eine vorläufige Tendenz dokumentiert, aber noch keine abschließende Empfehlung über den optimalen Detaillierungsgrad von Infiltrationsmodellen gegeben werden.

In Abbildung 43 ist die Analyse des Harzflusses in unterschiedlich orientierten Lagen bzw. Lagenaufbauten für die untersuchte Wellengeometrie dargestellt.

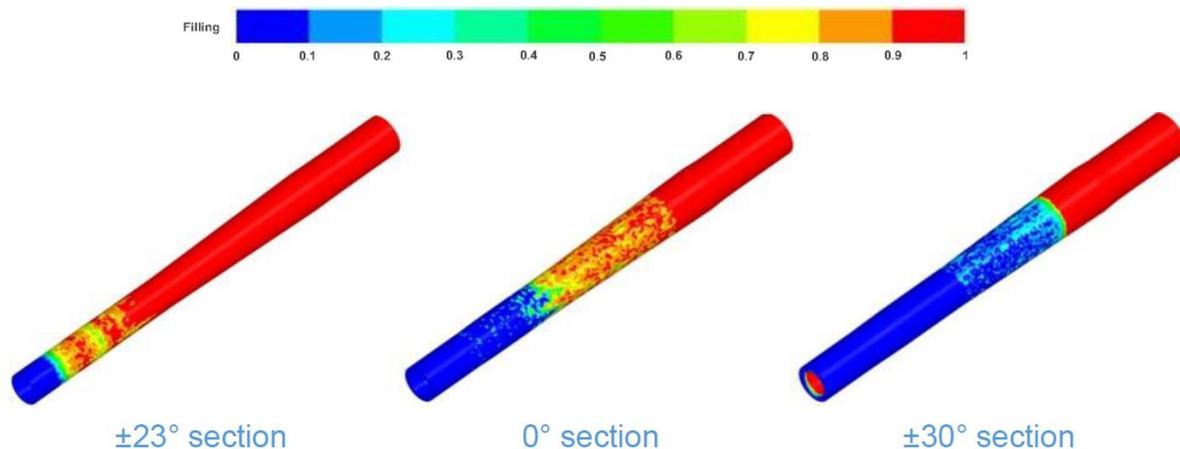


Abbildung 43: Infiltrationssimulation für verschiedene Lagenorientierungen

Die Simulation der Veränderung von Faserorientierungen einzelner Lagen im Bauteil hat zum Ergebnis, dass es fertigungstechnisch im Sinne der Harzinfiltration vorteilhafter ist, den Winkelunterschied zwischen zwei aufeinanderfolgenden Lagen zu reduzieren, um die hohe Permeabilität parallel zu den Fasern homogener über den gesamten textilen Werkstoff zu verteilen. Weiterhin ist festzuhalten, dass zu infiltrierende textile Faserarchitekturen so zu gestalten sind, dass sie durchgängig über die gesamte Bauteilgeometrie ohne Unterbrechung bis zu den Bauteilgrenzen verlaufen. Eine gute Infiltrierbarkeit schränkt die Variation der Wandstärke innerhalb einer Bauteilgeometrie ein, da eingeschobene Zwischenlagen an den jeweiligen Lagengrenzen Permeabilitätsunterschiede verursachen, die die Defektrisiken in Form von z. B. Lufteinschlüssen wieder steigern würden.

Der Vergleich der Angussysteme hat gezeigt, dass der Harzanguss an der vorderen Stirnfläche für die untersuchte Wellengeometrie eine bessere Option im Vergleich zu einem Linienanguss parallel zur Längsachse der Welle in der Werkzeugtrennungsebene darstellt. Mit dem Anguss an der Stirnfläche beginnt der Harzfluss in allen Lagen relativ gleichzeitig und breitet sich entlang der Längsachse mit einer gleichmäßigen Fließfront aus. Beim Linienanguss in der Werkzeugtrennungsebene beginnt der Harz hingegen zunächst in Dickenrichtung und breitet sich allmählich in Umfangsrichtung über zwei separate Fließfronten aus, die an der gegenüberliegenden Seite aufeinandertreffen und dort Lufteinschlüsse verursachen. Trotz der Einschränkungen bei der Modellierung der Permeabilitäten wurden mit Hilfe der Infiltrationssimulationen wichtige Erkenntnisse für die optimierte Fertigung von Faserverbund Wellen gewonnen.

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der zahlenmäßige Nachweis wird separat zugesendet.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeit

Die in diesem Verbundvorhaben erzielten Ergebnisse sollen für die zukünftige Entwicklung, Verifikation und Serienfertigung von strukturellen Bauteilen im Triebwerksbau angewendet werden. Dabei fließen die mit maßgeblicher Unterstützung der Forschungseinrichtungen entwickelten Verfahren in eine optimierte Werkstoffauswahl und Auslegung sowie eine hocheffiziente, automatisierbare Fertigung ein. Zudem werden neu entwickelte Prozesse für die Herstellungsüberwachung von faserverstärkten Kunststoffbauteilen angewendet. Nach erfolgreicher Durchführung des Vorhabens verfügen die industriellen Partner des Verbundvorhabens sowohl über die notwendigen Kompetenzen, als auch über die Ressourcen für eine entsprechende Industrialisierung und Produktumsetzung. Nach Auswahl der Subkomponenten werden von den Projektpartnern Lösungswege zur effizienten Auslegung einer Vielzahl von mehrachsigen belasteten Strukturbauteilen erarbeitet und geeignete, automatisierte Herstellungsverfahren ausgewählt. Dadurch können Komponententests reduziert und Entwicklungszeiträume auf die für metallische Bauteile üblichen Zeiten verkürzt werden.

4 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

RRD setzt auf eine verstärkte Anwendung von Faserverbundwerkstoffen in der Entwicklung/Fertigung von Komponenten und Bauteilen. Die Eignung von Faserverbundwerkstoffen für das Fanggehäuse ist jedoch noch in der Diskussion. Die Ergebnisse des Tests mit dem KoLiBri Fanggehäuse werden deshalb maßgebend für die Entscheidung zum Einsatz von Faserverbundwerkstoffen bei diesem Bauteil sein.

5 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Es ist kein Fortschritt bei anderen Stellen während des Durchführungszeitraumes bekannt geworden.

6 Veröffentlichungen

Es ist keine Veröffentlichung gem. NKBF Nr. 11 erfolgt oder geplant.