

Abschlussbericht Nr.: 1/A440/24

Abschlussbericht

Verbundvorhaben: Integrale Leichtbau-Profilsysteme aus Faser-Thermoplast-Verbund funktionalisiert im Spritzform-Prozess (InPro)

Teilprojekt: Konzeption, Design und prozesstechnologische Beschreibung funktionalisierter Faser-Thermoplast-Verbund Hohlprofile

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. Maik Gude

Projektnummer / 20Q1918C
Förderkennzeichen:

Seiten: 91
Abbildungen: 77
Tabellen: 7
Anlagen: 0

Datum: 05/2024

Förderungszeitraum: 01.08.2020 – 31.01.2024

Berichtszeitraum: 01.08.2020 – 31.01.2024

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutzaufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung.....	4
2	Voraussetzungen des Verbundvorhabens	7
3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	8
4	Stand der Wissenschaft und Technik	9
4.1	Stand der Wissenschaft und Technik	9
4.1.1	Technologien zur Herstellung von Faser-Thermoplast-Hohlstrukturen	10
4.1.2	Auslegung und Struktur-/Prozessmodellierung	10
4.1.3	Funktionalisierung von Hohlprofilen im Spritzgießprozess.....	12
4.2	Bisherige Arbeiten des TUD-ILK	13
4.2.1	Kontinuierliche Hohlprofilkonsolidierung – Continuous Blow Moulding (CBM)	13
4.2.2	Funktionalisierung von Hohlprofilen im Spritzgießprozess.....	15
4.2.3	Auslegung und Struktur-/Prozessmodellierung	16
5	Zusammenarbeit mit Dritten	20
6	Ergebnisse des Teilprojektes	22
6.1	Demonstrator & Prozessroute	22
6.2	Struktur & Prozessmodellierung.....	24
6.2.1	Vorauslegung Bauteil-Demonstrator	24
6.2.2	Virtuelle Strukturmodellierung	29
6.2.3	Virtuelle Prozesskettenmodellierung.....	34
6.3	Kontinuierliche Hohlprofil-Konsolidierung.....	43
6.3.1	Detaillkonzeption CBM-Prozess.....	43
6.3.2	Entwicklung Werkzeugsystem.....	48
6.3.3	CBM-Konzeptvalidierung für PEEK	51
6.4	Spritzform-Funktionalisierung	51
6.4.1	Detaillkonzeption Spritzform-Prozess	51
6.4.2	Entwicklung & Fertigung Spritzform-Werkzeug.....	58
6.4.3	Spritzform Konzeptvalidierung	64
6.4.4	Aufbau & Inbetriebnahme Spritzform-Prozess	68
6.5	Charakterisierung & Validierung.....	69
6.5.1	Experimentelle Charakterisierung CBM-Profile.....	69
6.5.2	Experimentelle Validierung Spritzform-Prozesssimulation	72
6.5.3	Experimentelle Charakterisierung Spritzform-Funktionalisierung.....	79

6.5.4	Experimentelle Validierung Demonstrator	82
7	Verwertung der Forschungsergebnisse.....	84
7.1	Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten	84
7.2	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	84
8	Forschungsergebnisse Dritter	85
9	Veröffentlichungen	85

1 Aufgabenstellung

Vor dem Hintergrund des stetig steigenden Luftverkehrsaufkommens (vgl. Abbildung 1) bei gleichzeitig immer strikteren Umweltaforderungen kommt der Reduzierung des Ausstoßes klimarelevanter Treibhausgase eine hohe Bedeutung zu. Die konsequente Anwendung des Leichtbaus stellt eine vielversprechende Möglichkeit dar, die Flugzeugreichweiten zu erhöhen, den Treibstoffverbrauch zu senken und dabei gleichzeitig den ökologischen sowie ökonomischen Anforderungen gerecht zu werden. Darüber hinaus erhöht sich mit dem sich neu entwickelnden Markt der elektrisch angetriebenen Fluggeräte die Nachfrage nach kostengünstigen Leichtbau-Luftfahrtkomponenten für Serienanwendungen.

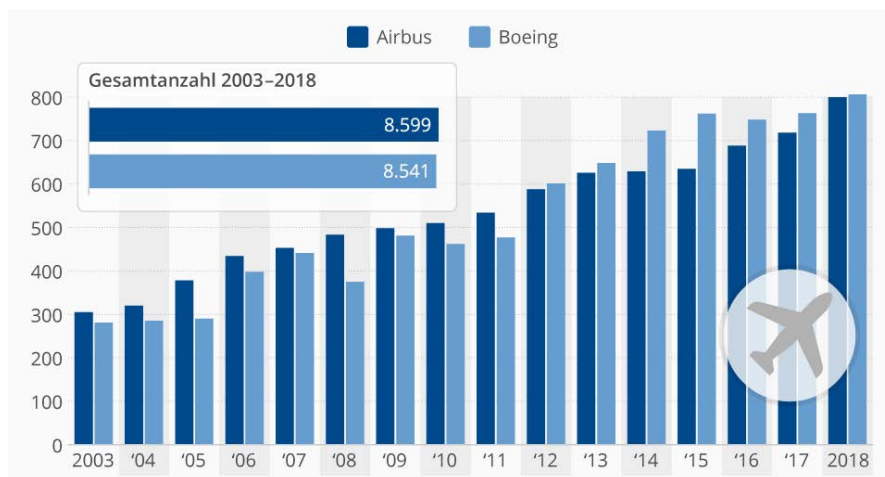


Abbildung 1: Anzahl der von AIRBUS und BOEING ausgelieferten Flugzeuge [Jan19]

Die daraus resultierende Nachfrage an Hochleistungsbauteilen für die Luftfahrt unter recyclinggerechten Aspekten erfordert die Entwicklung und Umsetzung ressourcenschonender und gleichzeitig effizienter Herstellungsprozesse. Im Rahmen des Verbundprojektes soll eine KMU-gerechte, hochproduktive Prozesskette (vgl. Abbildung 2) zur Herstellung integraler Faser-Thermoplast-Verbunde (FTV)-Hohlprofilstrukturen mit Hochleistungs-Thermoplasten entwickelt und umgesetzt werden.

Das Verbundvorhaben InPro hat sich zum Ziel gesetzt, effiziente, automatisierbare und vernetzte Fertigungstechnologien mit kurzen Taktzeiten und hohen Produktionsraten zu entwickeln, um der steigenden Nachfrage nach Luftfahrzeugkomponenten gerecht zu werden. FTV können mit kürzesten Taktzeiten verarbeitet werden und bieten zudem das Potential zur Umsetzung faserverbundgerechter integraler Bauweisen, die nachgelagerte Montageprozesse

einsparen und damit Kosten und Masse reduzieren können. Existierende Technologien für FTV-Hohlprofile (HP) wie Blasformen oder Tape-Wickeln sind entweder hinsichtlich ihrer Produktivität oder der realisierbaren geometrischen Komplexität beschränkt. Ziel dieses Vorhabens ist zum einen die simulative Auslegung luftfahrtrelevanter Strukturbauteile und die virtuelle Abbildung der kombinierten Prozesskette. Darüber hinaus soll diese Prozesskette entwickelt, umgesetzt und validiert werden. Dabei soll mit Hilfe von drei Teilschritten die Herstellung von FTV-HP in diesem Projekt erfolgen. Zu Beginn steht die flechttechnische Verarbeitung von Tapes zu Tape-Preforms, gefolgt von dem neuartigen Continuous-Blow-Moulding- (CBM) Verfahren zur kontinuierlichen Konsolidierung der Preforms zu Hohlprofilen und letztendlich dem Spritzform-Verfahren, was eine Kombination aus Umspritzen sowie Umformen darstellt und die formschlüssige Integration von Lasteinleitungselementen ermöglicht.

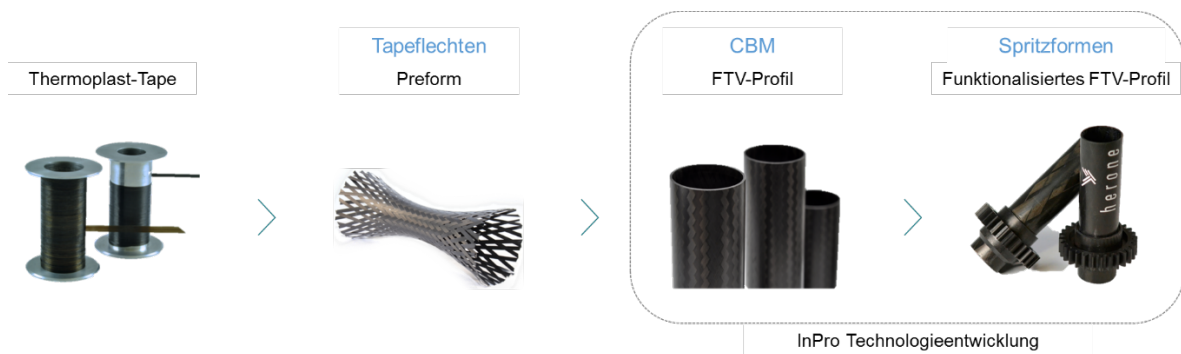


Abbildung 2: Angestrebte Prozesskette zur Realisierung funktionalisierter Hohlprofile

Darüber hinaus erfolgt die Entwicklung gekoppelter Simulationsmethoden, um eine virtuelle Prozess- und Strukturbeschreibung zu ermöglichen. Diese bildet den Grundstein für die zukünftige Digitalisierung der Technologie. Die Umsetzung des Verbundvorhabens InPro erfolgt in enger Kooperation zweier KMU, einer Forschungseinrichtung und den beiden assoziierten Partnern BOEING und VICTREX.

Für die im Gesamtvorhaben InPro zu entwickelnde Prozesskette zur automatisierten und reproduzierbaren Fertigung zukünftiger FTV-Luftfahrtprofile (z.B. Zug-Druck-Streben) sind für das INSTITUT FÜR LEICHTBAU UND KUNSTSTOFFTECHNIK (TUD-ILK) der TU DRESDEN folgende Teilziele zu definiert:

1. Verbesserung der Prozesseffizienz durch eine virtuelle Struktur- und Prozessbeschreibung
2. Erhöhung der Produktivität bei der Konsolidierung und Funktionalisierung im Spritzform-Verfahren

3. Bereitstellung einer Technologie zur kontinuierlichen Fertigung von luftfahrtspezifischen Strukturen
4. Reduzierung der Fehlerrate durch erhöhte Prozesssicherheit und Inline-Qualitätskontrolle
5. Reduktion von Hilfsmaterialien

Im Teilvorhaben des TUD-ILK „Konzeption, Design und prozesstechnologische Beschreibung funktionalisierter Faser-Thermoplast-Verbund Hohlprofile“ werden wesentliche Teilprozesse der Gesamtprozesskette entwickelt, eine virtuelle Struktur- und Prozessauslegung erarbeitet und die Projektpartner befähigt ihre Projektziele zu erreichen, womit das Teilprojekt direkt zum Erreichen der Gesamtziele beiträgt.

In dem vom TUD-ILK geleiteten Hauptarbeitspaket (HAP) 2 soll eine Beschreibung des Strukturverhaltens des Bauteil-Demonstrators und der virtuellen Prozesskette aus CBM- und Spritzformen als Grundlage für das Handbuch „Hybrid-Moulding für Hohlprofile“ erarbeitet werden. Im ersten Teilarbeitsschritt erfolgt die Vorauslegung der Laminatarchitektur, der Lasteinleitung des Funktionselements zum Hohlprofil sowie des Funktionselements selbst. Dies dient als Grundlage für die Entwicklung des virtuellen Strukturmodells des Lasteinleitungskonzepts zur numerischen Detailauslegung der Funktionalisierung. Um eine Voraussage über die prozesstechnische Komplexität des Spritzformprozesses treffen zu können, wird eine Prozesssimulation zur Beschreibung der makroskopischen Deformation des Hohlprofils und der im Spritzform-Prozess resultierenden Faserarchitektur als Input für die Struktursimulation entwickelt. Aus den sich hieraus ergebenden Resultaten werden Prozessgestaltungshinweise für das Handbuch „Hybrid-Moulding für Hohlprofile“ abgeleitet.

In dem zweiten vom TUD-ILK geleiteten HAP 5 soll ein Nachweis der Funktionsfähigkeit in Einsatzumgebung erbracht werden. Hierfür soll im ersten Schritt eine strukturmechanische Charakterisierung der im CBM-Verfahren hergestellten Hohlprofile unter den im Lastenheft definierten anwendungsnahen Belastungen durchgeführt werden. Im Weiteren werden weitreichende Fertigungsstudien zum Spritzformen umgesetzt und die Strukturaufklärung der Spritzform-Funktionalisierung am TUD-ILK in Zusammenarbeit mit HPF erarbeitet. Hieraus werden Prozessgestaltungshinweise für das Hohlprofil-Spritzformen auf Basis des Hybrid-Moulding-Ansatzes von VICTREX (Handbuch) abgeleitet. Die mechanische Charakterisierung der Spritzform-Funktionalisierung erfolgt unter anwendungsnahen Belastungen. Abschließend führt das TUD-ILK eine detaillierte Strukturaufklärung sowie mechanische Prüfung des Bauteil-Demonstrators unter anwendungsnahen Belastungen durch.

Des Weiteren unterstützt das TUD-ILK in dem HAP 3 und HAP 4 die Projektpartner HERONE und HPF bei der Konzeptionierung, Entwicklung und Umsetzung des CBM-Prozesses sowie des Spritzformens.

2 Voraussetzungen des Verbundvorhabens

Am TUD-ILK werden umfangreiche Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Entwicklung beanspruchungsgerechter Leichtbaustrukturen durchgeführt. Diese Arbeiten erfolgen sowohl in öffentlich geförderten Grundlagenprojekten als auch anwendungsbezogen in Kooperationsprojekten gemeinsam mit einschlägigen Industriepartnern. Dabei wird ein ganzheitlicher Ansatz verfolgt, der die gesamte Entwicklungskette

- Werkstoffcharakterisierung,
- Konstruktion und Bauweisenentwicklung,
- Strukturberechnung und Simulation,
- Versagens- und Schadensanalyse,
- Prototypenentwicklung und Pilotversuch,
- Prozess- und Verfahrensentwicklung,
- Bauteilprüfung und -überwachung sowie Qualitätssicherung

umfasst.

Einen besonderen Schwerpunkt der Forschungstätigkeit am TUD-ILK bildet die Entwicklung innovativer Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde sowie die Ableitung von entsprechenden Konstruktions- und Auslegungsstrategien. So war das TUD-ILK u.a. Sprecher des SFB 639 „Textilverstärkte Verbundkomponenten für funktionsintegrierende Mischbauweisen bei komplexen Leichtbauanwendungen“, war Standortsprecher des SFB/TR39 „Großserienfähige Produktionstechnologien für leichtmetall- und faserverbundbasierte Komponenten mit integrierten Piezosensoren und -aktoren“ und war Koordinator des DFG-Schwerpunktprogramms 1123 „Textile Verbundbauweisen und Fertigungstechnologien für Leichtbaustrukturen des Maschinen- und Fahrzeugbaus“.

Weiterhin erfordert die Entwicklung ressourceneffizienter, reproduzierbarer Leichtbaustrukturen werkstoffgerechte Verarbeitungsstrategien. Dabei werden sowohl Faser-Kunststoff-Verbunde mit duroplastischer als auch mit thermoplastischer Matrix betrachtet. Im Fokus der thermoplastischen Verarbeitungstechnologien stehen neben den technischen Polymeren zunehmend die Hochleistungspolymere mit und ohne Endlosfaserverstärkung. Im Rahmen einer Vielzahl grundlagen- und anwendungsorientierter Forschungsvorhaben, konnte am TUD-ILK ein hohes technologisches Know-how hinsichtlich sowohl der Gestaltung von Werkzeugen als auch der ur- und umformtechnischen Verarbeitung von thermoplastischen Halbzeugen generiert werden. Hierzu zählen beispielsweise:

- SFB 639 - Teilprojekt B3: "Methodische Entwicklung sowie experimentelle Untersuchung von formschlüssigen und kombinierten Verbindungssystemen für textile Leichtbaustrukturen",
- SFB 639 - Teilprojekt D4: „Textilgerechte Verarbeitungstechnologien für ebene und einfach gekrümmte Basiskomponenten mit hoher Funktionsintegration“,
- SFB/TR 39 - Teilprojekt A5: „Entwicklung thermoplastverbundkompatibler Piezokeramik-Module (TPM) und zugehöriger Herstellungsverfahren“,
- SFB/TR 39 - Teilprojekt B4: „Robuste Fertigungstechnologien für faserverstärkte Thermoplastverbundkomponenten mit integrierten Piezokeramik-Modulen“
- BMBF ToHoP: „Entwicklung eines prozessaktiven Werkzeugsystems für die Formgebung komplexer topologischer Hohlprofile aus textilverstärkten Verbundwerkstoffen mittels Heißpressen“
- CF-PEEK-Tragbandage für die Überbrückung von Kontinuitätsdefekten des Unterkiefers
- Industrieforschung: Faserverstärkte PEEK-Pultrusionsstäbe.
- LuFo IV-3 - Vorhaben ‚HiLiFT CenTraTec‘
- LuFo IV-4 DIANA – Teilprojekt: „Fertigungsverfahren für Rohrsysteme aus Hochleistungs-Thermoplastwerkstoffen mit variabler Querschnittsgeometrie“
- LuFo IV-2 SINTEG: „Auslegungsmethoden für steifigkeits- und dämpfungsoptimierte Kabinenbauteile in hybrider Leichtbauweise“
- AIF Forschungsprojekt: “T4 – Tailored Thermoplastic Tape Tubes“
- LuFo V-1 Sylvia – Teilprojekt: „Entwicklung eines automatisierten Fertigungsprozesses für Luftfahrt-Tankstrukturen durch belastungsgerechte Ablage von Faserverbund-Thermoplast-Patches (TPL-Verfahren)“
- LuFo V-3 FeLiSa – Teilprojekt: „Tape-Braid-Patch Preforming für komplex geformte Faser-Thermoplast-Verbund-Profile“
- DFG-SPP1712 – Teilprojekt 5: „Erarbeitung der theoretischen und technologischen Grundlagen für intrinsische Thermoplastverbund-Metall-Hohlstrukturen mit beanspruchungsgerecht ausgeführtem skalenübergreifendem Formschluss“

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Teilvorhaben „Konzeption, Design und prozesstechnologische Beschreibung funktionalisierter Faser-Thermoplast-Verbund Hohlprofile“ fügt sich in das Verbundvorhaben „Integrale Leichtbau-Profilssysteme aus Faser-Thermoplast-Verbund funktionalisiert im Spritzform-Prozess (InPro)“ ein, das den übergeordneten technologisch-wissenschaftlichen Rahmen für ausgewählte strategische Forschungsvorhaben bildet, mit denen auf die

zukünftigen Herausforderungen eines stark wachsenden Passagier- und Frachtverkehrs in der Luftfahrt reagiert werden soll.

Die Vorgaben des Fördergebers bezüglich inhaltlicher Anforderungen und entsprechender Berichte wurden termingerecht und vollumfänglich eingehalten. Der geplante Kostenrahmen wurde ebenfalls eingehalten, so dass die zur Durchführung der Entwicklungsaufgaben notwendige personelle und materielle Ausstattung abgesichert werden konnte. Die durch den Zuwendungsgeber bereitgestellten Mittel wurden im Laufe des Projektes ausgeschöpft.

4 Stand der Wissenschaft und Technik

4.1 Stand der Wissenschaft und Technik

Faserverstärkte Kunststoffe sind bereits in der zivilen Luftfahrt Stand der Technik und weit verbreitet. Jedoch steigen die Herausforderungen in Bezug auf Wirtschaftlichkeit und Recycling zunehmend durch das steigende Luftverkehrsaufkommen, da entwickelte Prozesse und Produkte meist auf duroplastischen Matrixmaterialien basieren. Diese Werkstoffe sind aufgrund ihrer Prozessrestriktionen durch lange Zykluszeiten und einem damit verbundenen hohen Fertigungsaufwand charakterisiert.

Vor diesem Hintergrund sind Verbundwerkstoffe auf Basis von thermoplastischen Hochleistungs-Kunststoffen (v.a. PPS, PAEK, PEEK, PEKK) aufgrund ihres Potentials für leistungsfähigere und effizientere Herstellungsprozesse von hohem industriellem und wissenschaftlichem Interesse. Zykluszeiten lassen sich durch die Verwendung von vorimprägnierten Halbzeugen wie Organoblechen oder Faser-Thermoplast-Tapes und aufgrund nicht notwendiger chemischer Vernetzung reduzieren. Darüber hinaus bieten sie durch wiederholbares Erwärmen über die Matrixschmelztemperatur neue Möglichkeiten für leistungsfähigere Fertigungsverfahren- und Prozessketten, stellen jedoch aufgrund ihrer hohen Prozessverarbeitungstemperaturen hohe Herausforderungen an die Prozessführung und Werkzeugtechnik dar.

Nachfolgend werden die aktuellen Entwicklungsstände zu den im Teilvorhaben relevanten Technologien dargestellt. Die thematische Gliederung erfolgt dabei entlang der InPro-Prozesskette und der im Teilvorhaben des TUD-ILK liegenden Arbeitspakete der Struktur- und Prozessmodellierung sowie der Charakterisierung und Validierung des CBM-Verfahrens.

4.1.1 Technologien zur Herstellung von Faser-Thermoplast-Hohlstrukturen

Die Herstellung von FTV-HP erfolgt aktuell durch Fertigungsverfahren, wie z.B. dem thermoplastischen Tape-Wickeln mit In-situ-Konsolidierung [Que14, Bre13], der thermoplastischen Endlos-Pultrusion [Gar17, Kyo16], der Schrumpfbandkonsolidierung [Com16] sowie dem Schleuder- [Ehl06, Fle15] und Blasformverfahren [Huf07, Bar16, Leh97]. Alle Verfahren weisen prozessspezifische Vor- und Nachteile auf, unterscheiden sich aber vor allem in der erreichbaren Laminatqualität. Diese wird insbesondere durch den vorhandenen Porengehalt im Laminat, der Faserstreckung und anhand des Kristallisationsgrades definiert. Über Tape-Wickeln direkt konsolidierte semi-kristalline Thermoplast-Lamine neigen in Abhängigkeit der Ablagerate zu hohen Abkühlraten und somit meist unzureichenden Kristallisationsgraden. Zusätzlich können Porengehalte kleiner als zwei Prozent, wie es im Luftfahrtsektor gefordert ist, meist nicht eingehalten werden [Com15]. Im Blasformverfahren können über eine variotherme Temperierung Heiz- und Kühlraten sowie Haltezeiten im Bereich der Polymerschmelze definiert eingestellt werden, um Porosität zu minimieren und den Kristallisationsgrad zu maximieren. Gleichzeitig werden die Fasern durch die Bedruckung von innen gestreckt [Man96], was ein Verschwimmen in der Laminebene wie bei der Schrumpfbandkonsolidierung [Com16] verhindert. Zusätzlich können im Blasformverfahren hohe Geometriefreiheitsgrade im Gegensatz zum Pultrusions- und dem Schleuderverfahren realisiert werden.

4.1.2 Auslegung und Struktur-/Prozessmodellierung

In der Literatur existiert eine Vielzahl von Veröffentlichungen zur Gestaltung und Auslegung von Faser-Kunststoff-Verbund (FKV)-Rohrstrukturen. Vorrangig erfolgten hierbei Untersuchungen für FKV-Antriebswellen und somit Studien der Effekte unter Torsionsbelastung [Gub00, Gud14, Lee04, Sch90]. Besonders umfassend sind hierbei die Gestaltungs- und Dimensionierungshinweise für FKV-Antriebswellen von SCHÜRMANN und KLESCHINSKI [Kle05, Sch07]. Bauweisen und Fertigungsprozesse für auf Zug und Druck beanspruchte Strukturen sind ebenfalls untersucht [Bec00, Hel06]. LENZ, LIN und SPITZER forschten an hybriden Profil- und Pinverbindungen aus FKV und metallischen Lasteinleitelementen und geben Empfehlungen zur Gestaltung und Dimensionierung von Antriebswellen unter Torsionslast, inklusive der Auswirkungen von Parametern im Fertigungsprozess auf die mechanischen Eigenschaften (vgl. Abbildung 3) [Len14, Lin04, Spi14]. Um die Wechselwirkungen des im Vorhaben geplanten Spritzformens zwischen der Tape-Flechtpreform und des angespritzten kurzfaserverstärkten Polymers realitätsnah simulativ abbilden zu können, ist zunächst die Fadenlage in der Flechtpreform zu beschreiben. Ausgangspunkt für eine Drapiersimulation ist die Geometrie und Struktur des konsolidierten FTV-Hohlprofils unter Berücksichtigung der komplexen Kontaktbedingungen innerhalb des Textils sowie zwischen Textiloberfläche und dem angespritzten Polymer.

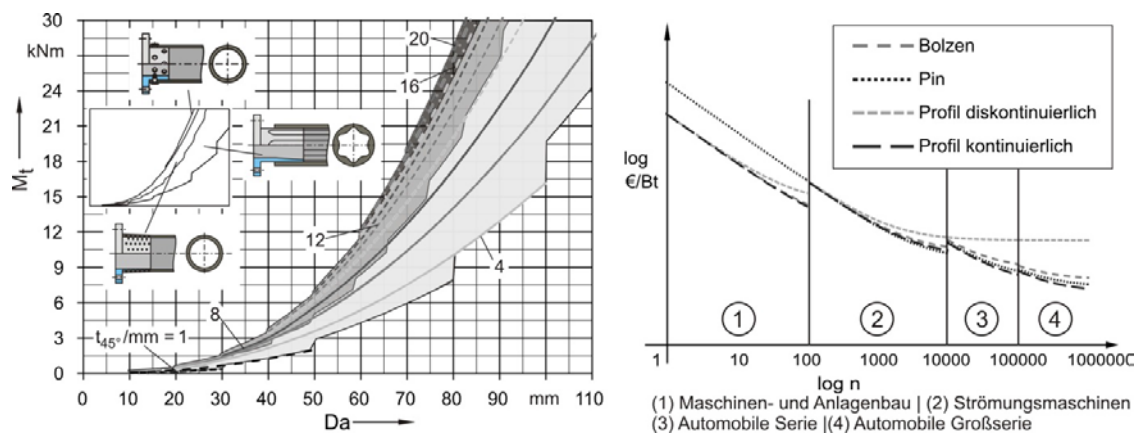


Abbildung 3: Hinweise zum Einsatz unterschiedlicher Lasteinleitungsarten in Abhängigkeit des Durchmessers, der Wandstärke und des Torsionsmomentes (links) und Hinweise für einen stückzahlabhängigen Einsatz der Verbindungsarten (rechts) [Len14]

In der Literatur wurden verschiedene Ansätze zur analytischen Beschreibung des Geflechtes auf Basis von Faserrovings aufgezeigt [Che99, Guy13, Raw13]. Lomov et al. entwickelten Werkzeuge zur numerischen Modellierung textiler Halbzeuge [Lom00, Lom01]. Zur numerischen Simulation des Spritzformverfahrens kann derzeit nicht auf standardisierte Lösungen zurückgegriffen werden. Die rheologische Formfüllsimulation (z.B. mittels AUTODESK MOLDFLOW) ist an dieser Stelle nur eingeschränkt nutzbar. Zwar können anisotrope Werkstoffeigenschaften von Einlegeteilen für die Verzugs- und Kernversatzanalyse berücksichtigt werden, jedoch beschränken sich diese Analysen zumeist auf linear elastische Verformungen. Zur Berücksichtigung großer Kernverformungen und eingebrachten Eigenspannungen bestehen derzeit Ansätze zur Kopplung von Formfüllsimulationen und Struktursimulationen [Goo17]. Hierfür können kommerziell verfügbare Mapping-Programme (z.B. CONVERSE, PART ENGINEERING GMBH) verwendet werden.

Zur Vorhersage der Tragfähigkeit von FKV-Bauteilen ist die Verwendung der FEM mit Hilfe von etablierten phänomenologischen Versagensmodellen [Cun98, Puc96] auf der Meso- und Makroskala Stand der Technik. Voraussetzung zur Verwendung dieser Versagensmodelle ist die Modellierung von klar identifizierbaren Einzelschichten mit unidirektionaler Verstärkung. Zur Abbildung komplexer textiler Verstärkungsstrukturen existieren Methoden auf Basis von repräsentativen Volumenelementen [Kan09, Gee10].

Die genannten Ansätze bilden eine gute Grundlage um KMU-gerechte Simulationsmodelle für die Versagens- und Prozessanalyse, der im Vorhaben fokussierten überspritzten geflechtverstärkten FTV zu entwickeln.

4.1.3 Funktionalisierung von Hohlprofilen im Spritzgießprozess

Metallische Hohlprofile werden bereits in Serie durch das Spritzgießverfahren funktionalisiert [Ree08, Pet10]. Prozesstechnisch erfolgt hierbei eine Kombination aus Innenhochdruckumformen (IHU) und Spritzgießen, in welcher ein dünnwandiges metallisches Rohr in ein Spritzgießwerkzeug eingelegt und unter hohem Druck (600 bar) mit Wasser gefüllt wird. Aufgrund des hohen Innendruckes formt das Rohr die innere Werkzeugoberfläche ab und wird gleichzeitig im selben Werkzeug gegen den hohen Spritzdruck von außen gestützt [Elr15].

Die Funktionalisierung im Spritzgießprozess von FTV-Hohlprofilen ist dagegen noch Stand der Forschung (Abbildung 4). Am Beispiel eines KFZ-Batterieträgers wurde im BMBF-Projekt e-generation [BMB12] die Funktionalisierung eines aus Hybridgarn geflochtenen und im Schlauchblasprozess konsolidierten Hohlprofils demonstriert, welches nachgelagert mit langfaserverstärktem Thermoplast umspritzt wurde (Abbildung 4 c) [Alb15]. Rieselfähige Partikel wurden in das Hohlprofil vor dem Umspritzen eingefüllt, um dieses gegen den Spritzdruck abzustützen, wodurch die einwirkenden Belastungen schadungsfrei ertragen und das Profil ohne Kollabieren funktionalisiert werden konnte. Alternative Ansätze verfolgen ein fluides Kernsystem, welches analog zum IHU-Prozess in das Hohlprofil im Spritzgießwerkzeug gefüllt und mit Druck beaufschlagt wird, um die Stützwirkung zu erreichen [Eng17].

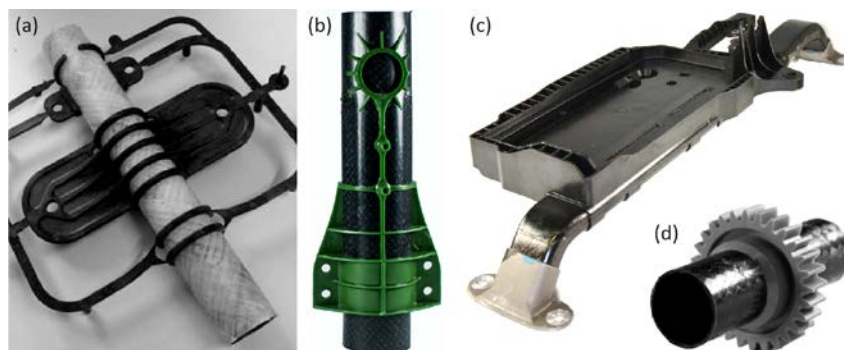


Abbildung 4: Vorarbeiten zum Umspritzen thermoplastischer FKV-Hohlprofile a: [Alb15], b-c: TUD-ILK

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass die im Vorhaben über das CBM-Verfahren herzustellende endlosfaserverstärkte Hochtemperatur-Thermoplast-Hohlstrukturen und deren geplante Funktionalisierung über das Spritzform-Verfahren bisher nicht Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen waren, diese aber ein hohes Potential für eine effiziente Fertigung von Leichtbautragstrukturen für Luftfahrtanwendungen aufweisen.

4.2 Bisherige Arbeiten des TUD-ILK

Auf dem Feld der durchgängigen Entwicklung ressourceneffizienter Leichtbaustrukturen liegen am TUD-ILK material- und branchenübergreifend einschlägige Erfahrungen, sowohl aus zahlreichen Grundlagen-Forschungsprojekten als auch aus anwendungsnahen (AiF, BMBF, BMWi) und bilateralen industriellen Kooperationsprojekten vor. Die Forschungsaktivitäten der 240 Mitarbeiter reichen dabei werkstoffklassen- und produktübergreifend von der Materialcharakterisierung über die rechnerische Bauteilsimulation und -auslegung, die Prozessauslegung und Fertigung, die experimentelle Prüfung von Prototyp- Demonstratoren bis hin zu ihrer Einführung bei den Industriepartnern. Das TUD-ILK ist insbesondere anerkannt für seinen Forschungsansatz des funktionsintegrativen Systemleichtbaus im Multi-Material-Design. Umfangreiche projektspezifische Grundlagen wurden etwa im DFG-Sonderforschungsbereich SFB639 oder im Schwerpunktprogramm SPP1712 erarbeitet. Forschungsarbeiten mit Industriepartnern überführen diese Erkenntnisse in praxisrelevante Technologie-, Berechnungs- und Bauteilkonzepte. Aktuell wurden im Rahmen der Plattform FOREL projektrelevante Vorarbeiten geleistet, etwa in den Projekten QPro, FuPro, LEIKA, SAMPA. Darüber hinaus arbeitet das TUD-ILK seit ca. fünf Jahren in bilateralen Projekten mit Boeing zur Entwicklung und Qualifizierung der thermoplastischen Tape-Flecht-Technologie für Luftfahrt-Anwendungen zusammen.

4.2.1 Kontinuierliche Hohlprofilkonsolidierung – Continuous Blow Moulding (CBM)

Innerhalb des Forschungsprojekts "LeiTra" wurde eine neuartige KMU-gerechte und modulare Prozesskette zur wirtschaftlichen Herstellung funktionaler FTV-Tragwerksprofilstrukturen entwickelt, technologisch umgesetzt, erfolgreich erprobt und patentiert [Bar19]. In Kombination mit lastangepassten Verbindungselementen steht ein modulares Baukastensystem zur Verfügung, bei dem mit nur geringen konstruktiven oder fertigungstechnischen Modifikationen Tragelemente für verschiedene Anwendungsbereiche umgesetzt werden können. Die wesentlichen und innovativen Glieder der Prozesskette sind eine Preform-Station zur automatisierten Herstellung mehrlagiger Flecht-Preforms auf multifunktionalen thermoplastischen Linern, eine modulare Konsolidierungsstrecke zur effizienten Herstellung von FTV-Hohlprofilen aus Hybridgarnen sowie eine Umform-Station zur materialgerechten Integration metallischer Lasteinleitungselemente. Damit ist es möglich, FTV-Profilstrukturen aus Hybridgarn praktisch endlos in einem Großserienprozess herzustellen und mit Lasteinleitungselementen prozessintegriert zu kombinieren (Abbildung 5).

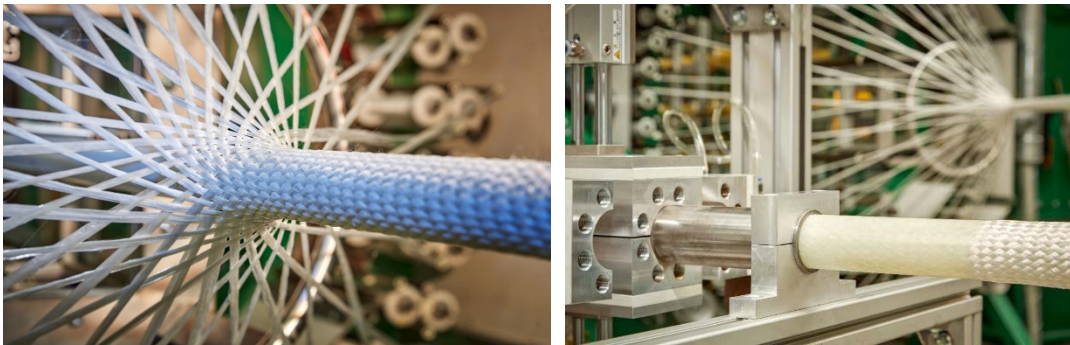


Abbildung 5: Hybridgarn-Preform (links) und kontinuierliche Profilherstellung aus Hybridgarn-Preforms im CBM-Verfahren (rechts)

Die zugrundeliegende Flechttechnologie erlaubt die Kombination unterschiedlicher Faserhalbzeuge (z.B. Glas- und Kohlenstofffaserhybridgarne) zur Anpassung des Materials an wirtschaftliche und technische Anforderungen (Abbildung 6). Darüber hinaus können mechanische Kennwerte wie Steifigkeit oder Festigkeit über Flechtwinkel und Faserarchitektur eingestellt werden. Dies ist insbesondere für Strukturbauteile wie Zug-Druck-Streben und deren Lasteinleitungsbereiche, welche eine höhere Steifigkeit und Festigkeit erfordern, von großer Bedeutung.

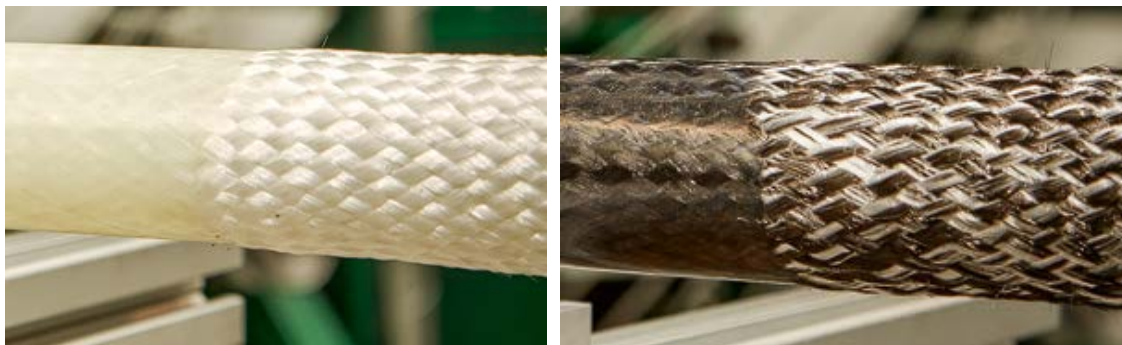


Abbildung 6: Übergangsbereich unkonsolidierte Preform zu konsolidiertem Hohlprofil aus Glasfaser-PA6 (links) und Kohlenstofffaser-PA6 (rechts)

Aufgrund des hohen Grads der Automatisierung sowie der geringen erzielbaren Taktzeiten eignet sich das kontinuierliche Blasformen in besonderem Maße für die Serienproduktion von Hohlprofilen für Leichtbauanwendungen. Darüber hinaus gewährt die modulare Prozesskette eine weitreichende Flexibilität bezüglich der Geometrie herzustellender Strukturen. Gegenüber etablierten Verfahren zur Herstellung von FTV-Profilstrukturen, wie etwa der Pultrusion, können beim CBM-Prozess durch den Austausch des formgebenden Werkzeuges unterschiedliche Profildurchmesser und sogar -querschnitte entlang des Profils schnell und kostengünstig

realisiert werden. Als Resultat entstehen nachbearbeitungsfreie Bauteile mit hoher Oberflächengüte, bei denen bereits Lasteinleitungselemente integriert sein können.

Das CBM-Verfahren erfüllt mehrere Kriterien der Nachhaltigkeit. Im Vergleich zum Schlauchblasverfahren wird der Grundmaterialeinsatz verringert. Mithilfe der automatischen Preformeinheit kann durch definierte Umlenk- bzw. Trennzonen in den Randbereichen der Verschnitt deutlich reduziert und damit im Vergleich zur Ausgangstechnologie ca. 10 % Material eingespart werden.

In Folge einer direkten Integration von Inserts zur Funktionalisierung der FTV-Struktur können Klebstoffe und Verbindungselemente wie Niete oder Schrauben eingespart werden. Die Schweißbarkeit des Thermoplast-Matrixwerkstoffes ermöglicht die Umsetzung weiterer Fügevarianten. Zusätzlich sind durch den modularen Fertigungsansatz weniger Formwerkzeuge bei der Herstellung von Profilvarianten notwendig. Des Weiteren besteht eine gute Recyclingfähigkeit des Produktes.

Bisher wurde der Prozess nur für technische Polymere wie Polyamid 6 entwickelt. Die Anpassung für Hochtemperatur-Thermoplaste erfordert aufgrund der hohen Verarbeitungstemperaturen eine neue Konzeption vieler Teilaspekte des Prozesses wie der Dichtungstechnik, der Temperierung, der Werkzeugkonzepte sowie der Verbrauchsmaterialien.

4.2.2 Funktionalisierung von Hohlprofilen im Spritzgießprozess

Das Umspritzen thermoplastischer FKV-HP stellt eine effiziente und großserienfähige Möglichkeit zur Funktionalisierung dar. Erstmals wurde das hohe Leichtbaupotential solcher Strukturen innerhalb des BMBF-Projektes e-generation in enger Kooperation des TUD-ILK mit der DR.-ING. H.C. F. PORSCHE AG anhand eines KFZ-Batterieträgers demonstriert. Das aus Glasfaser-Polyamid-6-Hybridgarn gefertigte Hohlprofil wurde bereits im Urfomprozess mit den Aluminium-Lasteinleitungselementen verbunden. Die Tragplattform zur Befestigung der KFZ-Batterie wurde anschließend im Spritzgießprozess großflächig an das Hohlprofil angebunden. Durch die so umgesetzte Integralbauweise konnte bei Erhalt der vollen Funktionsfähigkeit eine Massereduktion von 30 % erzielt werden. Innerhalb des BMBF-Projektes FuPro wurde diese Bauweise aufgegriffen und in ein Werkstoff-Baukasten-System bestehend aus torsions- und biegesteifen FKV-Hohlprofilen, flächigen Bauelementen aus Organoblechen und komplexen Spritzgieß-Knotenstrukturen überführt. Die technologische Umsetzbarkeit wurde anhand einer Gurtintegralrücksitzlehne demonstriert. Im Ergebnis konnte eine hochbelastete crashrelevante Struktur geschaffen werden, welche die hohen gesetzlichen Vorgaben erfüllen und dabei gegenüber dem Referenzbauteil eine Masseersparnis von 30 % erzielen konnte.

Im Projekt Tailored Thermoplastic Tape Tubes erfolgte erstmalig die Umsetzung des Spritzform-Verfahrens zur Funktionalisierung von FTV-Hohlprofilen. Das grundlegende Konzept sieht die

Nutzung eines metallischen Lasteinleitungselements zur Anbindung der Faserverbundstruktur vor (Abbildung 7).

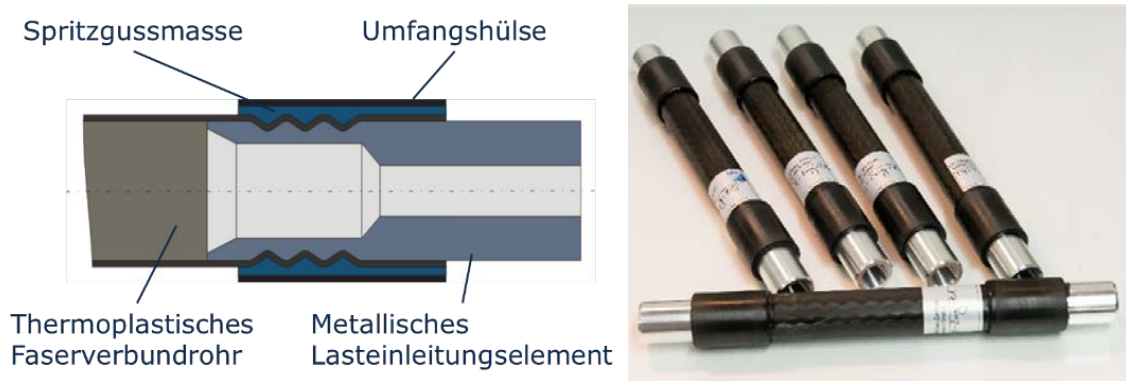


Abbildung 7: Bauweisenkonzept der spritzgeformten Zug-Druckstrebe (links) und gefertigte Probekörper (rechts)

Dieses weist Hinterschnittgeometrien in Umfangsrichtung auf, welche die Übertragung von axialen Lasten ermöglichen. In diese Hinterschnitte wird das FTV-HP mit Hilfe von Spritzgussmasse hineingeformt, wobei gleichzeitig eine zylindrische Außengeometrie erzeugt wird. Auf dieser sitzt zum Abschluss eine in Umfangsrichtung verstärkte Hülse, welche die durch die Form des Lasteinleitungselementes induzierten radialen Lasten aufnimmt. In [Bar18] wurde die Übertragbarkeit der Hohlprofilfunktionalisierung in den Bereich der Hochleistungsthermoplaste demonstriert und der Proof-of-Concept erbracht. Hier wurde exemplarisch ein CF-PAEK-Hohlprofil im Spritzgießprozess mit einer PEEK-Formmasse funktionalisiert. Im geplanten Vorhaben soll diese Technologie auf ein seriennahes Niveau angehoben werden.

4.2.3 Auslegung und Struktur-/Prozessmodellierung

Um ein besseres Verständnis für die Funktionsweise und Beanspruchungen spritzgeformter Zugstreben zu erlangen, wurde im Projekt Tailored Thermoplastic Tape Tubes in der Finite-Elemente (FE)-Software ANSYS® ein parametrisches, numerisches Simulationsmodell erstellt. Abbildung 8 zeigt den Aufbau der Verbindung und der einzustellenden geometrischen Größen. Zur Reduktion der Modellgröße bei gleichzeitigem hohem Detaillierungsgrad bildet das Modell nur einen 1° Sektor aufgrund der zyklischen Symmetrie des Bauteils und der axialen Belastung ab. Aufbauend auf den Untersuchungen von Ulbricht [Ulbr12] wurde eine rundtrapezoidförmige Gestalt der Makrokontur als sehr vorteilhaft ermittelt. Im Modell ist bereits die fertigungsbedingte Änderung der Faserwinkel aufgrund der Drapierung in die vorhandenen Hinterschnitte idealisiert analytisch berücksichtigt [Man96]. Zusammen mit der Ondulation der Tapes [Bar15] werden so die effektiven Verbundeigenschaften mittels eines

Homogenisierungsansatzes bestimmt. Die linear elastischen Materialparameter, welche zur genauen Beschreibung des FE-Modells notwendig sind, wurden experimentell zerstörend ermittelt. Eine Optimierung der Hinterschnittkontur ist durch das parametrisierte FE-Modell anhand der Beurteilung des Verbundversagens über das phänomenologische Festigkeitskriterium nach Cuntze [Cun98] möglich.

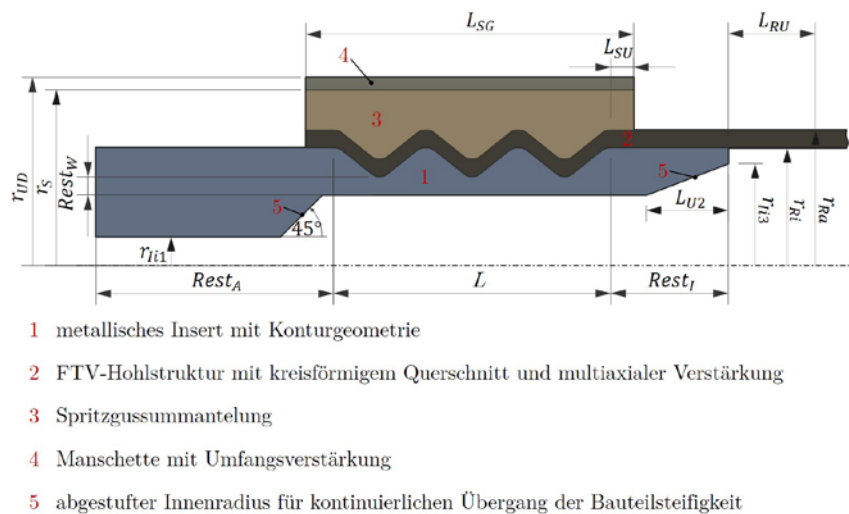


Abbildung 8: Parametrisiertes Modell des Lasteinleitungsbereiches

Im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms SPP1712 wurde das Modell für ein außenliegendes metallisches Lasteinleitungselement erweitert und der Einfluss von Mikro- sowie Mesostrukturierung des metallischen Partners über ein Kontakt-Kohäsivzonenmodell berücksichtigt. Als relevante Versagensszenarien zur Beurteilung des Tragverhaltens von Konturverbindungen wurden der Zwischenfaserbruch, Ablösung der Grenzschicht und Faserbruch betrachtet. Der positive Einfluss einer die Verbindung in Umfangsrichtung versteifenden Bandage ist in Abbildung 9 (links) dargestellt. Aufgrund von komplexen Zusammenhängen der Konturparameter erfolgte die Generierung eines Wirkflächenmodells über eine statistische Versuchsplanung. Damit lassen sich Parametereffektdiagramme (Abbildung 9 rechts) ableiten, welche die Wechselwirkungen einzelner Parameter aufzeigen und sich dadurch generelle Gestaltungshinweise ableiten lassen.

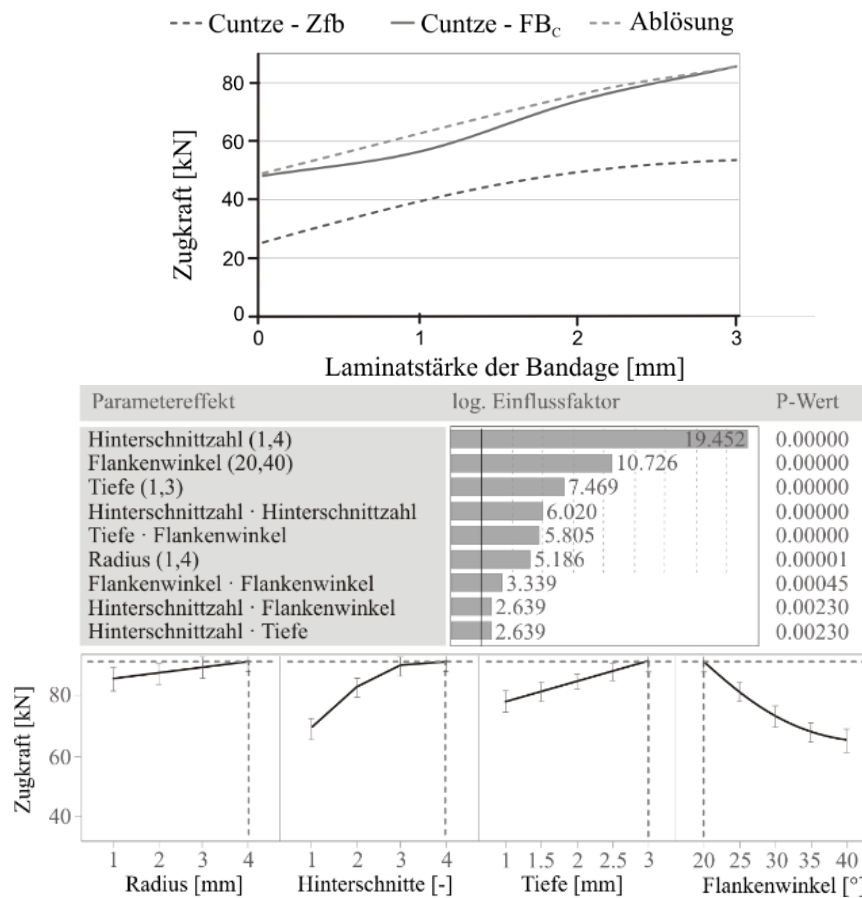


Abbildung 9: Berechnete Versagenslasten einer Konturverbindung in Abhängigkeit der Wandstärke (oben) und Beispielhaftes Parametereffektdiagramm für ein Grenzschichtversagen (unten)

Um eine FTV-Konturverbindung, wie sie im Vorhaben umgesetzt werden soll, auszulegen, bedarf es genauer Kenntnisse der prozessbedingten Einflüsse auf die FKV-Struktur. Im Projekt SPP1712 wurde aus diesem Grund eine Modellierungsstrategie zur Abbildung des Drapiervorgangs der geflochtenenen Tape-Preform in ein multiskalenstrukturiertes Lasteinleitungselement einer Zug-Druckstrebe entwickelt. Mit Hilfe der „Embedded-Element-Methode (EEM)“ und der mesoskopischen Geflechtarchitektur wurde ein parametrisiertes FE-Modell erstellt. Dabei wird die Flechtarchitektur für ein repräsentatives Volumenelement (RVE) modelliert, welche über Translations- und Rotationsvorgänge vervielfacht wird und somit ein Rundgeflecht abbildet. Der darauf aufbauende Mehrschichtverbund kann danach für eine Drapiersimulation genutzt werden (Abbildung 10).

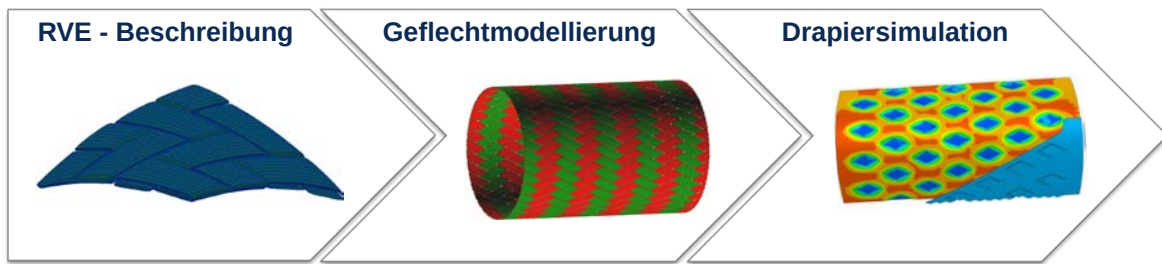


Abbildung 10: Modellierungsstrategie zur virtuellen Beschreibung des Drapierprozesses während des Blasformprozesses im Projekt SPP1712

Durch die EEM kann generell die Netz- und Ergebnisqualität gesteigert und der Modellierungs- und Rechenaufwand reduziert werden. Über die Drapiersimulation können die umformungsbedingten Faserwinkeländerungen sowie das Einformverhalten des Faserverbundes in die Hinterschnitte der formgebenden Geometrie untersucht werden. Lufteinschlüsse, die im Vorhaben geplanten Spritzformprozess entstehen können, sind jedoch mit der EEM nicht abbildbar, da sie keine Fließbewegung im Sinne einer fluidmechanischen Simulation zulässt.

Zur gezielten Prozessgestaltung umspritzter Hohlprofile wurde am TUD-ILK eine integrative Prozess-Struktur-Simulation parallel zum Entwicklungsprozess derartiger Strukturen entwickelt (Abbildung 11). In dieser sind über systematische Untersuchungen die während des Spritzgießprozesses einwirkenden Belastungen sowie die daraus resultierenden Verformungen bei der Verwendung von Stützsystemen analysiert worden. Die Belastungsprofile werden über eine Formfüllsimulation erfasst und nachfolgend in eine Struktursimulation überführt. Zuerst wird die Füllung des Hohlprofils mit der Stützstruktur numerisch untersucht um die Befüllung des Hohlprofils, welche durch Hinterschnitte oder ungünstig gewähltes Stützmedium beeinträchtigt sein kann, zu validieren. Anschließend erfolgt die Struktursimulation des Verformungsverhaltens des durch den Spritzgussdruck belasteten Hohlprofils. Die Simulation muss dabei das anisotrope Werkstoffverhalten des FTV-Hohlprofils als auch dessen Interaktion mit dem eingebrachten Stützmedium berücksichtigen. Durch die kombinierte Prozess- und Struktursimulation können frühzeitig in der Konstruktionsphase Aussagen zur fertigungstechnischen Umsetzbarkeit über die Bewertung der Verformungen und Belastungen getroffen werden.

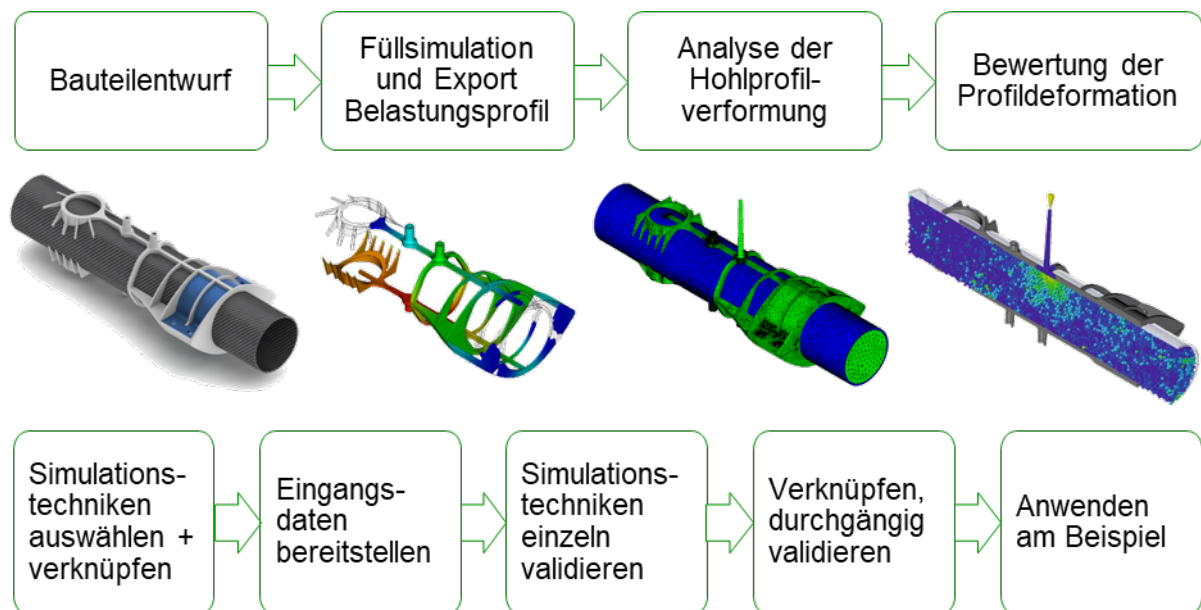


Abbildung 11: Simulationssystematik zur virtuellen Analyse des Hohlprofilumspritzens im Rahmen des BMBF-Projektes FuPro

5 Zusammenarbeit mit Dritten

Als Ausgründung der TU DRESDEN übernahm die HERONE GMBH die fachliche Leitung des InPro-Verbundvorhabens und unterstützte die Projektpartner als Konsortialführer beim Projektmanagement. Als Partner im Projekt fungierten HERONE und die HPF GMBH & Co. KG. Unterstützt wurde das Konsortium durch BOEING und VICTREX, welche als assoziierte Partner agierten. Das TUD-ILK übernahm für die Hauptarbeitspakete (HAP) 2 und HAP 5 die Leitung. Die Struktur- und Prozessmodellierung sowie Charakterisierung und Validierung stehen hierbei im Mittelpunkt.

Die Bearbeitung der vielschichtigen Thematiken dieses Forschungsvorhabens erforderte ein interdisziplinäres Netzwerk aus grundlagen- und anwendungsorientierter Wissenschaft sowie industrieller Forschung und Entwicklung. Im beantragten Teilprojekt war daher eine enge Zusammenarbeit mit allen Verbundpartnern und Projektbeteiligten erforderlich. Im Hinblick auf die umgesetzten Arbeiten im Teilprojekt war hier insbesondere ein intensiver kontinuierlicher Informationsaustausch und Abgleich der Ergebnisse mit HERONE und der jeweils in den entsprechenden Arbeitspaketen verantwortlichen Projektpartner notwendig.

Als zentraler Know-how-Träger arbeitete das TUD-ILK mit allen Projektpartnern eng zusammen und unterstützte diese bei deren Arbeitspaketen aktiv (siehe Abbildung 12). So arbeitete das

TUD-ILK innerhalb des HAP 1 mit dem Ziel der Erarbeitung der Demonstrator- und Prozessroute dem Partner HERONE mit dem notwendigen Prozessverständnis zu und gewährleistete damit eine zielorientierte Umsetzung der Technologie. Im HAP 2 wurde durch das TUD-ILK die Entwicklung eines Modells zur Struktur- und Prozessmodellierung fachlich verantwortet. Im HAP 3 unterstützte das TUD-ILK den Partner HERONE bei der Konzeption und Validierung des CBM-Prozesses und unterstützte in HAP 4 bei der Entwicklung des Spritzformwerkzeuges HPF. Die Materialcharakterisierung sowie die abschließende Demonstratorfertigung mit den notwendigen Qualitätsuntersuchungen und Bauteilprüfungen führte das TUD-ILK zusammen mit HERONE mit der fachlichen Unterstützung von HPF, BOEING und VICTREX im HAP 5 durch.

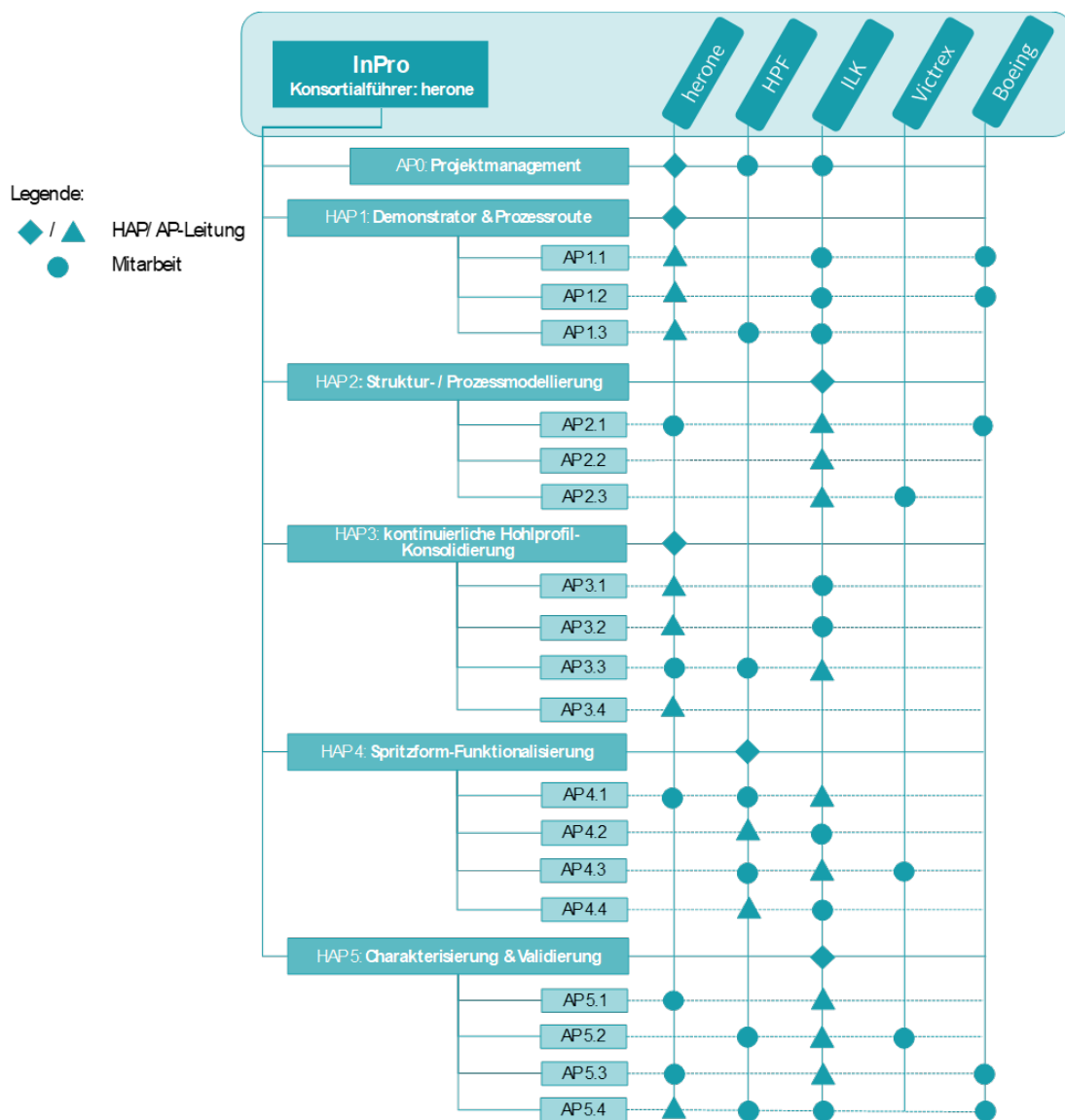


Abbildung 12: Vernetzung der Partner im Verbundprojekt InPro

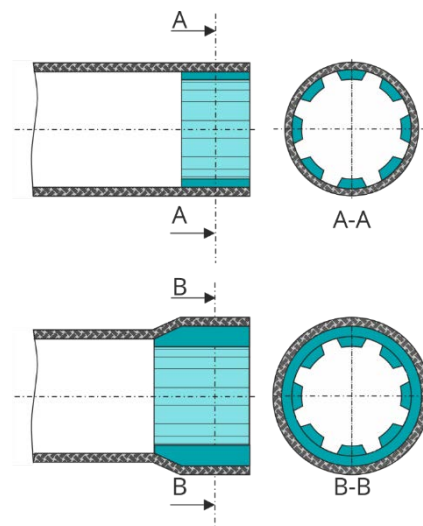
6 Ergebnisse des Teilprojektes

Aufgrund der am TUD-ILK entwickelten Technologie zur flechttechnischen Verarbeitung von thermoplastischen, faserverstärkten Tapes kommt dem TUD-ILK im Rahmen des InPro-Projektes eine Schlüsselrolle zu. Obwohl HAP 3 und HAP 4 primär von HERONE und HPF bearbeitet wurden, war das TUD-ILK vor allem in der Konzeptionierung und Entwicklung des CBM-Prozesses (HAP 3) sowie der Spritzform-Funktionalisierung (HAP 4) involviert, um hochgradig an die Prozessabläufe angepasste Lösungen gemeinsam mit den jeweiligen HAP-Verantwortlichen zu entwickeln.

6.1 Demonstrator & Prozessroute

In gemeinsamen Workshops mit dem assoziierten Partner BOEING wurden mögliche Luftfahrzeugstrukturen identifiziert, welche durch die zu entwickelnde Prozesskette adressiert werden können. An der Demonstratorstruktur sollte das CBM-Verfahren sowie die Spritzform-Funktionalisierung erforscht und deren Potenzial nachgewiesen werden. Das TUD-ILK unterstützte HERONE in der Auswahl der Demonstratorstruktur und deren Anforderungen durch Erfahrung aus vergangenen Luftfahrtforschungsprojekten. Als Demonstrator wurde eine Keilwellenverbindung aus kohlenstofffaserverstärktem Polyaryletherketon (CF/PAEK) Hohlprofil und innenliegendem spritzfunktionalisierten Keilwellenprofil aus glasfaserverstärktem Polyetheretherketon (GF/PEEK) ausgewählt. Die Technologieentwicklung erfolgte in zwei Stufen, welche in Abbildung 13 dargestellt sind.

Technologie-Level 1:
Konstanter Durchmesser mit umspritzter Keilwelle



Technologie-Level 2:
Aufgeweiteter Durchmesser mit spritzgeformter Keilwelle

Abbildung 13: InPro Demonstratorstruktur in zwei Technologie-Level

Die Wahl der Technologie-Level (TL), den geometrischen Abmessungen und dem Lageraufbau des Hohlprofils erfolgte parallel zu der Vorauslegung des Demonstrators und der Konzeptionierung des Spritzform-Prozesses. Die Abmessungen des Hohlprofils wurden an die Flechtanlagen des TUD-ILK und bereits vorhandenen Werkzeugsystemen für Voruntersuchungen angepasst. Als Geometrie der Keilwellenverbindung wurde eine nach DIN ISO 14 normgerechte Verbindung (8x36x40) ausgewählt, da diese aufgrund der Normierung ein breites Einsatzspektrum besitzt. Aufgrund der höheren technologischen Herausforderung wurde im Projekt eine innenliegende Profilierung untersucht. Durch die Hinterschnittausprägung ergeben sich wesentliche Herausforderungen, welche im Laufe des Forschungsvorhabens erarbeitet werden sollen (siehe Abschnitt 1.1.4). Die funktionalen und geometrischen Anforderungen an die Struktur wurden im Lasten- und Pflichtenheft festgehalten und sind in Tabelle 1 aufgelistet. Die mechanischen Anforderungen wurden orientierend an verkehrsluftfahrttypische Transmissionskomponenten gewählt und exemplarisch an die Lasten einer Luftfahrt-Hochauftriebswelle angepasst.

Tabelle 1: Anforderungsliste des Demonstrators, TL 1

Nr.	Anforderung	Bezeichnung	Wert	F / W	Ursprung / Erläuterung
1	Grundfunktion / Kräfte / Momente				
1.1	Übertragbares Torsionsmoment	M_t	450 Nm	W	0,5 - 1 rad/kNm/m
1.2	Übertragbare Axialkraft	F_a	4500 N	W	
1.3	Übertragbares Biegemoment	M_B	150 kg	W	
1.4	Übertragbare Drehzahl	n	3000 rpm	W	Eigenfrequenz 30 -60 Hz
2	Rohrprofil				
2.1	Material			F	CF/PAEK 60% - Victrex PAEK AE250 UD-Tape
2.2	Lageraufbau			F	[± 45 ± 45 0 ± 45 ± 45 0 ± 45 ± 45 0 ± 45 ± 45]
2.3	Länge des Rohrprofils	l_p	1000 mm	F	
2.4	Außendurchmesser des Rohrprofils	d_a	45 mm	F	
2.5	Innendurchmesser des Rohrprofils	d_i	40,6 mm	F	
2.6	Wandstärke des Rohrprofils	s	2,2 mm	F	
3	Funktionselement				
3.1	Material			F	CF/PEEK 30% - Victrex PEEK 150GL30
3.2	Art der Profilwellenverbindung		8x36x40	F	DIN ISO 14 - Keilwellenverbindung
3.3	Länge des Krafteinleitungsbereichs	l_k	35 mm	F	33mm Profil / 2mm Übergang

Das TUD-ILK unterstützte HERONE zudem in der Konzeption der Gesamtprozessroute, welche sich in drei Hauptarbeitsschritte einteilen lässt: 1. Flechten der Preform, 2. Konsolidieren im CBM-Prozess und 3. Funktionalisierung im Spritzform-Prozess (Abbildung 14). Durch die Wahl von CF/PAEK als Material des Hohlprofils und GF/PEEK als Material der Funktionalisierung ist es

möglich die beiden Polymere auf Basis der von VICTREX entwickelten „Hybrid Moulding“-Technologie zu verschmelzen und gute Verbindungseigenschaften zu erzielen. Durch die niedrigere Schmelztemperatur kann das PAEK-Hohlprofil durch das Anspritzen der PEEK-Funktionalisierung ausreichend an der Oberfläche aufgeschmolzen werden, wodurch eine verbesserte Polymerkettendiffusion und somit stoffschlüssige Verbindung im Interface erreicht werden kann, ohne Notwendigkeit des Erhitzens über Schmelztemperatur des Hohlprofils vor dem Spritzprozess [Fer20].

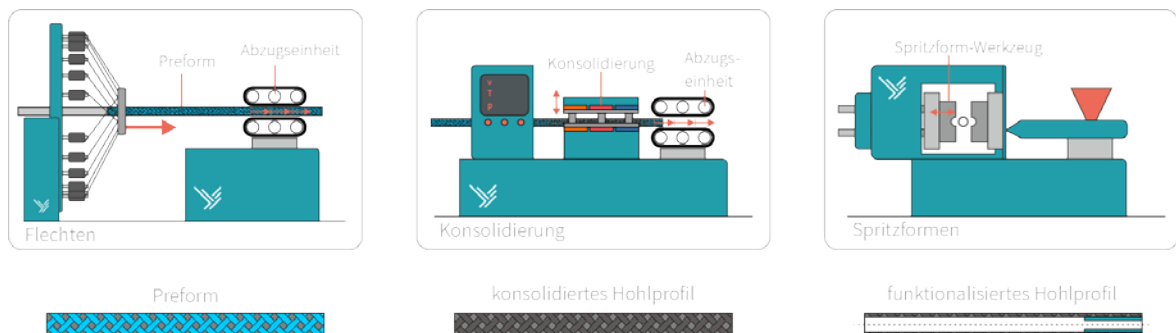


Abbildung 14: Gesamtprozessroute – Flechten, Konsolidierung & Spritzformen

6.2 Struktur & Prozessmodellierung

6.2.1 Vorauslegung Bauteil-Demonstrator

Zur Vorauslegung des Bauteil-Demonstrators in Form der gewählten Welle mit Keilwellenprofil wurde auf das am TUD-ILK erarbeitete und vorhandene Wissen zur materialgerechten Gestaltung und Auslegung von FKV-Wellen zurückgegriffen [Spi19], [Len17]. Nach der Erarbeitung der wesentlichen mechanischen und funktionellen Anforderungen sowie geometrischen Randbedingungen wurde weitestgehend gemäß den von SPITZER und LENZ erarbeiteten Grundlagen zur Auslegung von FKV-Wellen vorgegangen (siehe Abbildung 15). Dies betrifft vor allem die Dimensionierung des ungestörten Wellenbereichs, wofür zusätzlich auf TUD-ILK-interne Berechnungstools zurückgegriffen wurde.

Dimensionierung des ungestörten Bereichs

Für die Auslegung des *ungestörten* oder *freien Wellenbereichs* nach [Len17] ist lediglich die Faserorientierung und Lagenanzahl bzw. Dicke des Laminats festzulegen, da die anderen erwähnten Parameter (Außendurchmesser, Werkstoff, Bindungstyp) durch die Anforderungsprofile und Randbedingungen vorgegeben sind. Gemäß VDI 2014 kommen für FKV-Torsionswellen zwei grundsätzliche Konzepte bzgl. Faserorientierung bzw. Faserarchitektur

in Frage, welche beide mit der im Verbundprojekt adressierten Preforming-Technologie des Tape-Flechtens realisiert werden können. Abbildung 16 zeigt schematisch beide Konzepte.

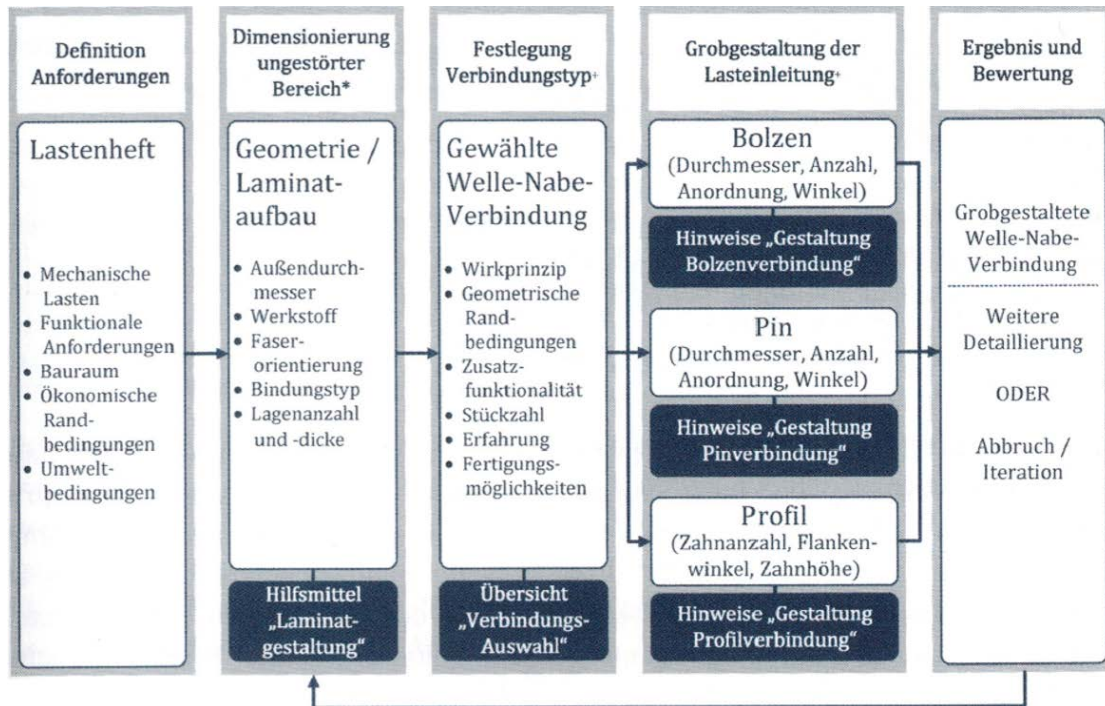


Abbildung 15: Ablaufdiagramm für die Grobgestaltung und Vordimensionierung von FKV-Antriebswellen, nach [LEN17]

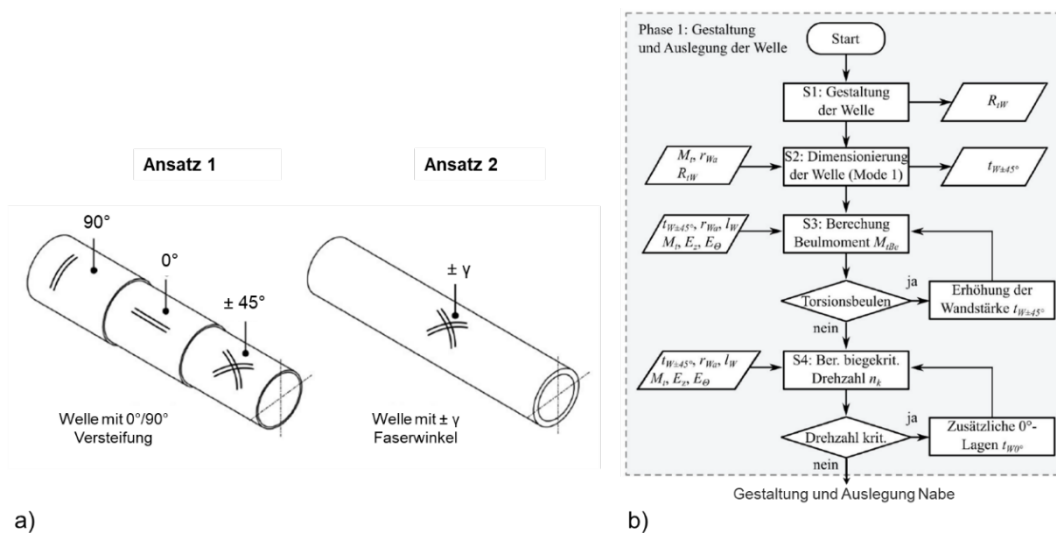


Abbildung 16: a) Möglichkeiten zur Gestaltung dünnwandiger Wellen nach VDI 2014, b) Prozessablaufdiagramm zur Gestaltung und Dimensionierung von FKV-Antriebswellen [SPI19]

Für das Forschungsvorhaben wurde *Ansatz 1*, der *funktionstrennenden* Aufbau gewählt, da dieser durch eine größere Anzahl einstellbarer Paramater meist zu technisch leistungsfähigeren und flexibleren Lösungen führt [Spi19]. Entgegen der Abbildung kann für den Bauteil-Demonstrator auf die bandagierenden 90°-Lagen verzichtet werden. Die konkrete Ermittlung der erforderlichen Anzahl an Tape-geflochtenen $\pm 45^\circ$ -Lagen sowie der im Flechtprozess eingezogenen UD-Lagen (0°) erfolgte mithilfe eines auf analytischen Berechnungen basierenden Auslegungstools, welches sich im Ablauf am in Abbildung 16 b) gezeigten Schema orientiert. Zusammen mit Materialkennwerten aus Datenblättern des UD-Tapes und bekannten Abminderungsfaktoren zur konservativen Abschätzung der erreichbaren Steifigkeiten der Tape-geflochtenen Lagen wurde die benötigte Lagenanzahl für den Bauteil-Demonstrator hinsichtlich Tragfähigkeit, Stabilitätsverhalten und dynamischen Verhalten bestimmt. In einem weiteren Tool wurde iterativ der finale Lagenaufbau unter Berücksichtigung der Fertigbarkeit der Tape-geflochtenen Preform sowie der resultierenden mechanischen Eigenschaften bestimmt.

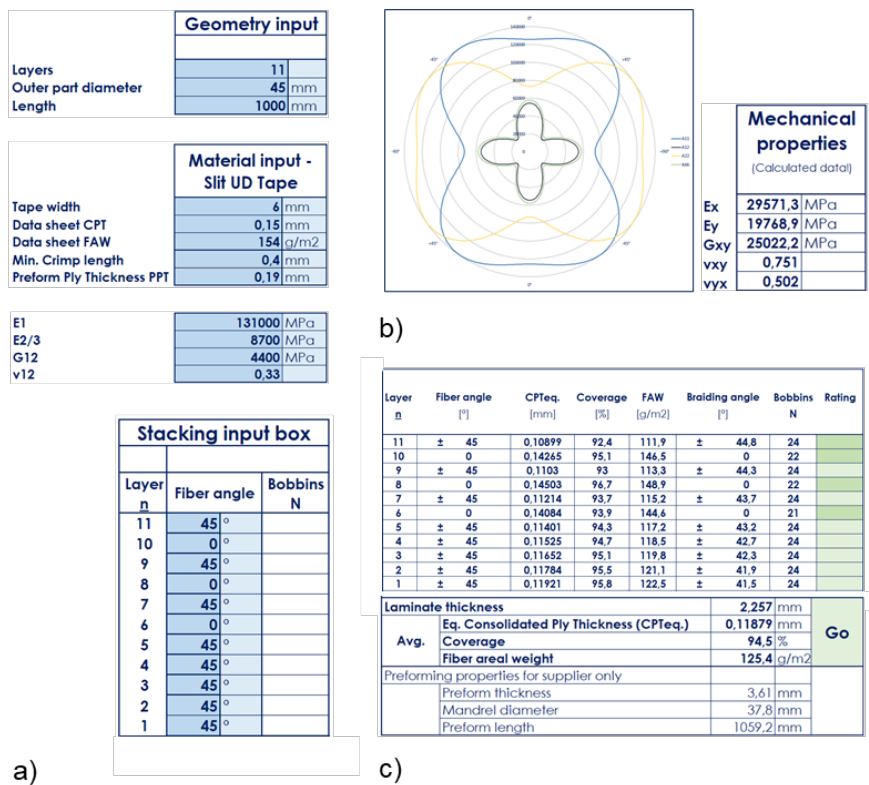


Abbildung 17: Auszug aus dem TUD-ILK -internen Auslegungs- und Vorhersagetools zur Gestaltung Tape-geflechtener Preforms. a) Input und b) Output des Tools mit Laminatsteifigkeiten und c) resultierender Einzellagendicke, Gesamtlaminatstärke und zu flechtenden Faserwinkeln

Durch die Anwendung der klassischen Laminattheorie wurden die Wandstärken und äquivalente Laminatsteifigkeiten in der Ebene berechnet (siehe auch Abbildung 17 b). Diese wurden in der frei verfügbaren Software eLamX erfolgreich validiert. Mit den in eLamX hinterlegten Versagenskriterien wurden Abschätzungen zur Tragfähigkeit aller definierten Lastfälle getroffen. Der finale Lagenaufbau des freien Wellenbereiches als Ergebnis der analytischen Vorauslegung findet sich in Abbildung 17 c).

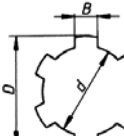
Dimensionierung Lasteinleitung / Keilwellenprofil

Die Gestaltung und Dimensionierung der Lasteinleitung (LE) in Form eines innenliegenden Keilwellenprofils unterliegt engen Randbedingungen, die sich sowohl aus dem Lasten- und Pflichtenheft, der gewählten Geometrie der FKV-Welle als auch aus der technologischen Umsetzbarkeit ergeben. Konkret sind folgende Randbedingungen zu nennen:

- Durchmesser: Innendurchmesser FKV-Welle, variiert in Abhängigkeit des Technologie-Levels (TL) bei der Spritzform-Funktionalisierung
- Länge und Hinterschnittausformung LE-Geometrie: geometrisch beschränkt durch Einfallkern
- Gestaltung nach DIN ISO 14 (aus Pflichtenheft HAP 1, bestimmt Zahnanzahl und -flankenhöhe, Außendurchmesser Keilprofil D und Innendurchmesser Keilprofil d)
- Auslegung nach Drehmomentvorgabe (Lastenheft, $M_t = 450 \text{ Nm}$)

In Berücksichtigung der genannten Randbedingungen wurden die Keilwellengeometrien entsprechend der DIN ISO 14 für die TL, wie in Tabelle 2 aufgelistet, ausgewählt.

Tabelle 2: Ausgewählte Keilwellengeometrie, Auszug aus DIN ISO 14

TL	Keilwellengeometrie nach DIN ISO 14					
	Kurzzeichen	d [mm]	Anzahl Keile N	D [mm]	B [mm]	
1 & 2	8x36x40	36	8	40	7	

Für die LE-Geometrie wurden bei Belastung durch ein Drehmoment drei versagensrelevante Zonen bzw. Lastfälle identifiziert:

- Zahnflanke (Flächenpressung – Druckversagen),
- Zahnboden (Schubspannungen - Schubversagen), sowie das
- Interface zwischen Spritzmaterial und FKV-Welle (Schubspannungen – Schubversagen)

Als freier Parameter zur Dimensionierung bleibt für das TL 1 lediglich die Länge des Keilprofils, welche durch technologische Randbedingungen nach oben beschränkt ist. Ab dem TL 2 kann durch die Durchmesseraufweitung im Spritzformprozess der Zahnboden vom Interface entkoppelt werden, womit eine Auftrennung der versagensrelevanten Bereiche erfolgt und von einer Erhöhung der ertragbaren Bruchlast ausgegangen wird. Das TL 1 kann somit als *Worst-Case-Szenario* bzw. als das TL angesehen werden, dem am wenigsten Tragfähigkeit zugesagt werden kann, weshalb die Vordimensionierung lediglich für dieses TL durchgeführt wurde.

Zur Dimensionierung des variablen Parameters der Zahnlänge l_z werden Vergleichsfestigkeitswerte des zu verwendenden Spritzgussmaterials benötigt. Dafür wurden von dem Projektpartner HERONE vorhandene experimentelle Daten ausgewertet und mit Literaturwerten für das Material ergänzt.

Zur Ermittlung der zulässigen Scherfestigkeit wurden Gewinde-Auszug-Versuche an Probekörpern aus GF30 PEEK durchgeführt (siehe Abbildung 18).

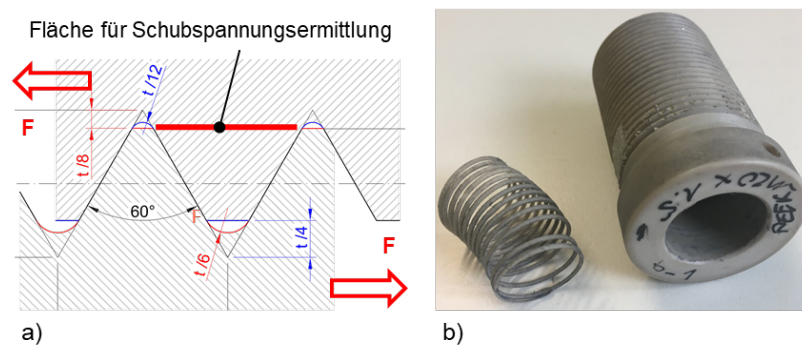


Abbildung 18: Ermittlung Scherfestigkeit an GF30 PEEK – Probekörpern, a) Berechnungsgrundlage, b) Probekörper nach Prüfung [HERONE]

Zusammen mit einem über Literaturrecherche ermittelten Wert der zulässigen Flächenpressung von $p_{zul} = 80 \text{ MPa}$ ergab die analytische Berechnung der minimal erforderlichen Zahnlänge l_{zmin} unter Verwendung eines Sicherheitsfaktors von $S = 1,5$ die folgenden Werte für die Lastfälle:

- Flächenpressung: $l_{zmin} = 29,6 \text{ mm}$, und
- Zahnboden/Schubversagen: $l_{zmin} = 12,4 \text{ mm}$

Für den Lastfall des Versagens am Zahnboden/Interface ist derzeit keine Vergleichsfestigkeit für das zu verwendende Material bekannt. Jedoch kann davon ausgegangen werden, dass diese bei Wahl geeigneter Spritzprozessparameter nicht wesentlich von der experimentell ermittelten Schubfestigkeit des Materials abweicht. Da der Lastfall Flächenpressung anhand der genannten

Werte für l_{zmin} als ausschlaggebend zur Dimensionierung identifiziert wurde, erfolgte die finale Dimensionierung der Zahnlänge $l_z = 33 \text{ mm}$. Dieser Wert ist zusammen mit den gegebenen geometrischen Randbedingungen aus der DIN ISO 14 als bestmögliches Ergebnis hinsichtlich der Strukturmechanik aller TL sowie der starken technologischen Einschränkungen zu betrachten. Abbildung 19 zeigt schematisch die Abmessungen als Ergebnis der Dimensionierung des LE für TL 1.

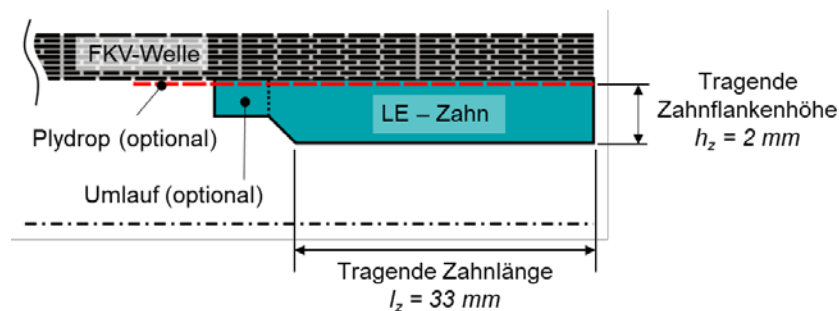


Abbildung 19: Schnittdarstellung durch das LE der TL 1 mit optionalen Plydrop und Umlauf als technologische Varianten sowie den auslegungsrelevanten Gestaltungsparametern

6.2.2 Virtuelle Strukturmodellierung

Das Ziel der virtuellen Strukturmodellierung war die detaillierte, numerisch gestützte lastgerechte Auslegung des Bauteil-Demonstrators. Die wesentlichen Aspekte waren dabei der Lagenaufbau des Hohlprofils sowie die Gestaltung der Spritzgussstruktur. Darüber hinaus wurde das Interface zwischen Spritzgießstruktur und Hohlprofil des Hybridbauteils näher untersucht. Der Laminataufbau, die Gestaltung der Spritzgießstruktur als auch das Interface wurden dazu nicht nur unter strukturmechanischen, sondern auch unter fertigungstechnischen und technologischen Aspekten betrachtet und in Abstimmung mit den Ergebnissen aus der Prozessentwicklung in ihrer Gestaltung iteriert. Im Laufe des Vorhabens wurden mehrere Iterationen der Geometrie zur virtuellen Strukturbewertung des Demonstrators simuliert und ausgewertet, deren Notwendigkeit sich aus erfolgten Anpassungen der Demonstratorbauteile des TL 1 und TL 2 ergab. Die Anpassung begründen sich dabei vornehmlich aus fertigungstechnologischen Aspekten. Des Weiteren erfolgte eine Gestaltänderung seitens der Spritzgießstruktur, die sich aus Limitationen seitens der Fertigung des im Spritzform-Prozess verwendeten Einfallkerns begründet. Gemeinsam mit den Projektpartnern wurden die erarbeiteten TL Varianten in CAD-Modelle überführt, welche vorteilhaft hinsichtlich der strukturmechanischen Eigenschaften sowie der technologischen Umsetzung bewertet wurden. Die CAD-Modelle wurden anschließend in strukturmechanische FE-Modelle überführt, wobei auf die Simulationsumgebung SIMULIA ABAQUS zurückgegriffen wurde.

Für die Materialbeschreibung wurde auf ein linear-elastisches Materialmodell zurückgegriffen, wobei die Daten für die angenommen isotrope Spritzgießmasse vollständig den

Herstellerdatenblättern entnommen werden konnten. Das Hohlprofil wurde in orthotrope Einzlagen diskretisiert und entsprechend der jeweiligen Laminatarchitektur homogenisiert abgebildet. Diese Vorgehensweise erlaubt es, mithilfe der TUD-ILK-internen analytischen Auslegungstools, der klassischen Laminattheorie sowie unter Verwendung anerkannter Mischungsregeln (HUANG) jede Laminatlage in Abhängigkeit der eingestellten Einzlagenparameter (Dicke, Faserwinkel) in Abhängigkeit der Hersteller-Datenblattkennwerte abzubilden. Dies ist insbesondere für das TL 2 relevant, da sich die Parameter *Lagendicke* und *Faserwinkel* als Folge der Aufweitung des Hohlprofils ändern und somit lokal variierende Laminatsteifigkeiten hervorrufen. Für die numerisch gestützte Detailauslegung der Demonstratorstruktur wurden ausgewählte Variationen des TL 1 und 2 in FE-Modelle überführt und analysiert. In Abbildung 20 ist der prinzipielle Modellaufbau des TL 1 und TL 2 dargestellt. Da es sich bei dem Demonstrator um ein rotationssymmetrisches Bauteil handelt, konnte auf ein rechenintensives Vollmodell zugunsten eines Achtel-Modells verzichtet werden.

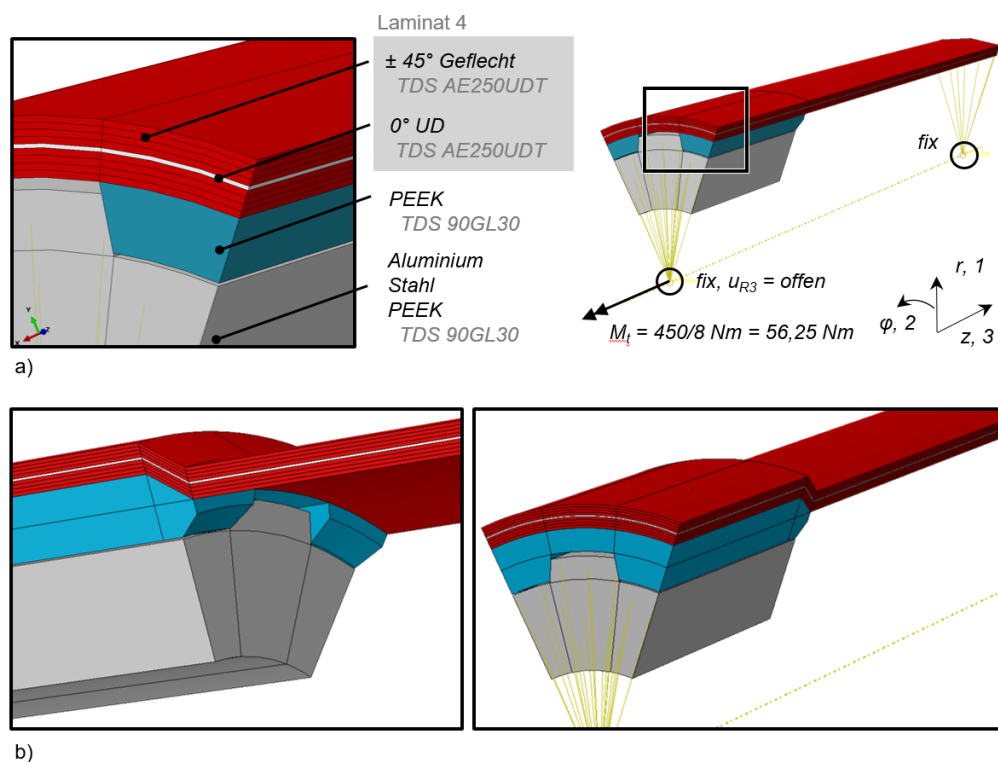


Abbildung 20: a) Übersicht modellierter Materialien anhand des TL 1 sowie grundlegender Modellaufbau, b) Detailansichten des Strukturmodells vom TL 2

Das FE-Modell besteht aus zwei Volumenkörpern; einem Nabensegment zur Lasteinleitung sowie dem Bauteildemonstrator. Letzteres kann in der Simulationsumgebung von ABAQUS partitioniert werden, um diesen verschiedene Materialmodelle und -Kennwerte zuzuweisen.

Hierdurch kann einerseits der Lagenaufbau aus mehreren jeweils einzeln homogenisierten Einzellagen realisiert, als auch auf eine gesonderte Beschreibung des Interfaces zwischen FTV-Hohlprofil und dem Spritzformteil verzichtet werden. Da das TL 1 keine Aufweitung des Hohlprofils vorsieht, entsprechen die Parameter Lagedicke und Faserwinkel jeder Lage dem definierten finalen Lagenaufbau.

Die Rand- und Lastbedingungen werden über zwei *Referenzpunkte* (RP) an die Strukturen gekoppelt. Der RP 1 überträgt dabei ein Drehmoment auf das Nabensegment während der RP 2 das Demonstratorsegment fixiert. Durch eine Kontaktbedingung zwischen Naben- und Demonstratorsegment wird die auf den RP 1 aufgebrachte Last in das Demonstratorsegment eingeleitet, wobei die aufgebrachte Last des RP 1 entsprechend der gewählten Symmetrie einem Achtel der im Lastenheft festgehaltenen Belastung entspricht. Gegenüber einer direkten Aufbringung der Lastrandbedingung auf das Spritzformteil ermöglicht diese realistischere Abbildung der Nabe gezielte Aussagen über den Einfluss von Nabenform und -material. Hinsichtlich der Lasteinleitung wurden als Materialien Aluminium, Stahl und PEEK (*Victrex TDS 90GL30*) analysiert.

Die Analyseergebnisse verschiedener in Erwägung gezogener Materialien für die Prüfwelle wurden anhand der von-MISES-Spannung miteinander verglichen. Diese Ergebnisse sind in Abbildung 21 dargestellt. Während bei Verwendung von Aluminium und Stahl als Wellenmaterial aufgrund deren hohen Steifigkeiten lokale Spannungsüberhöhungen innen an der Spritzgießstruktur berechnet wurden, zeigten sich diese bei Verwendung eines PEEK-Systems insbesondere stirnseitig. Diese lokalen Spannungsüberhöhungen sind betragsmäßig höher als bei der Stahl-Prüfwelle, was durch die deutlich geringere Steifigkeit von PEEK begründet werden kann. Die Prüfwelle aus Aluminium stellt weiterhin die Vorzugsvariante dar, mit der die gleichmäßigste Flächenpressung an den Zahnflanken erreicht werden kann. Diese Prüfwelle zeigte im Vergleich zur Stahl-Prüfwelle geringere Spannungsüberhöhungen innen an der Spritzgussstruktur. Die nachfolgenden Ergebnisse der virtuellen Strukturbewertung beruhen daher auf den Modellen mit einer Aluminium-Prüfwelle.

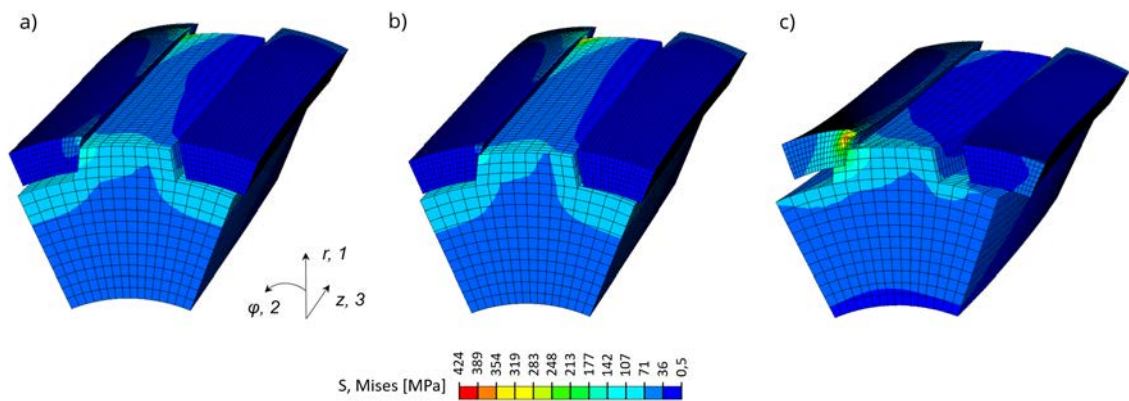


Abbildung 21: Vergleich verschiedener Materialien für das Lasteinleitungselement anhand des TL 1; a) Aluminium, b) Stahl, c) PEEK TDS 90GL30

Das Versagen des funktionalisierten Hohlprofils ist im Interface zwischen dem Laminat und der Spritzgießstruktur zu erwarten. Die Auswertung der Ergebnisse der Struktursimulationen erfolgte daher anhand der Spannungen in diesem Kontaktbereich. In Tabelle 3 sind die maximalen berechneten Spannungen auf Seiten der Spritzgießstruktur sowie des Laminates im Modell nach TL 1 sowie TL 2 aufgeführt. Im TL 2-Modell wurden am Interface der Spritzgießstruktur sowie des Laminates maximale Spannungen berechnet die zwischen 30-80 % niedriger als im TL 1-Modell sind. Nachfolgend werden einige ausgewählte Spannungsergebnisse genauer dargestellt.

Tabelle 3: Vergleich maximaler Spannungsergebnisse in TL1 und TL2 am Interface von a) Spritzgussstruktur und b) Laminat

	Spannung	TL 1 [MPa]	TL 2 [MPa]	Verringerung
a)	v. Mises	144	100	~ 30 %
	τ_{12}	78	30	~ 60 %
	τ_{23}	61	37	~ 40 %
b)	v. Mises	180	100	~ 45 %
	τ_{12}	78	11	~ 80 %
	τ_{23}	97	32	~ 60 %

In dem TL 1-Modell wurden Spannungen berechnet, die die maximale Schubfestigkeit von $\tau_{max} = 60 \text{ MPa}$ des Materials lokal übersteigen, wodurch ein Initialversagen ab einem eingeleitetem Drehmoment von ungefähr 400 Nm an diesen Stellen zu erwarten ist. In Abbildung 22 sind die Schubspannungen τ_{12} und τ_{23} des TL 1-Modells beispielhaft am Interface des Laminates dargestellt.

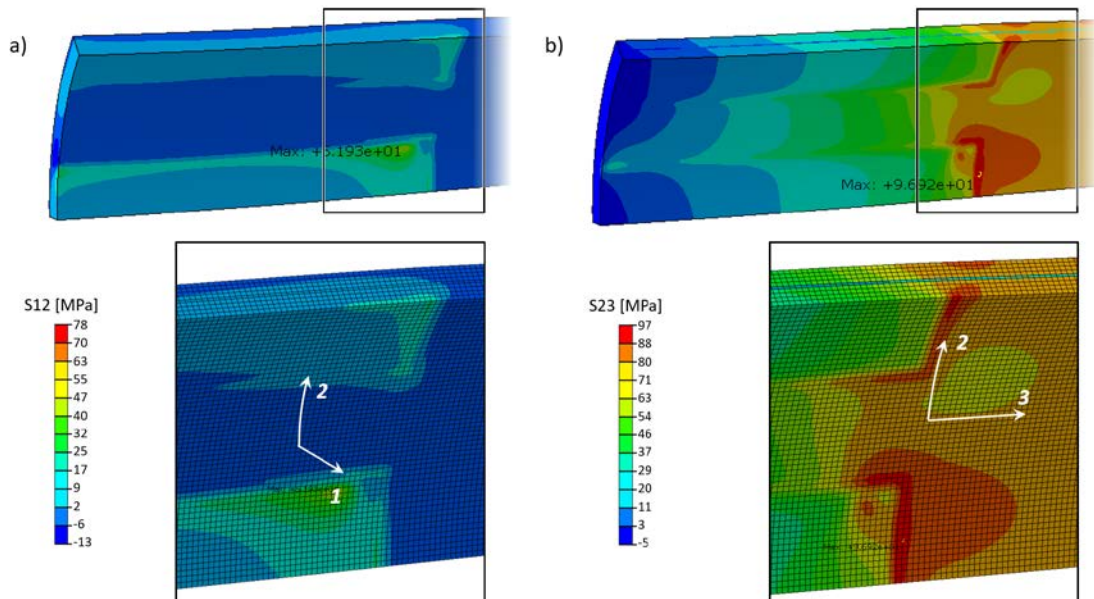


Abbildung 22: Spannungsergebnisse a): τ_{12} und b): τ_{23} am Interface des Laminats in TL1

Die maximalen Schubspannungen von $\tau_{12} = 78 \text{ MPa}$ sowie $\tau_{23} = 97 \text{ MPa}$ wurden im Endbereich des Lasteinleitungselements berechnet. Im TL 1 ist daher an diesem kritischen Bereich das Ablösen der Spritzgussstruktur vom Laminat zu erwarten. Abbildung 23 zeigt diese Spannungsergebnisse im Strukturmodell in TL 2 an Laminat und Spritzgießstruktur. Die Schubspannungen im Spritzgießstruktur-Laminat-Interface des TL 2-Modells überschreiten die maximale Schubfestigkeit von $\tau_{max} = 60 \text{ MPa}$ nicht. Die Abnahme der berechneten Spannungen kann unter anderem auf die erhöhte Interfacefläche zurückgeführt werden. Aufgrund dieser Simulationsergebnisse ist ein Versagen des Prüfkörpers unter der im Lastenheft definierten Prüflast von 450 Nm TL 2 nicht zu erwarten. Demnach sollte das TL 2 höhere Lasten als das TL1 ertragen.

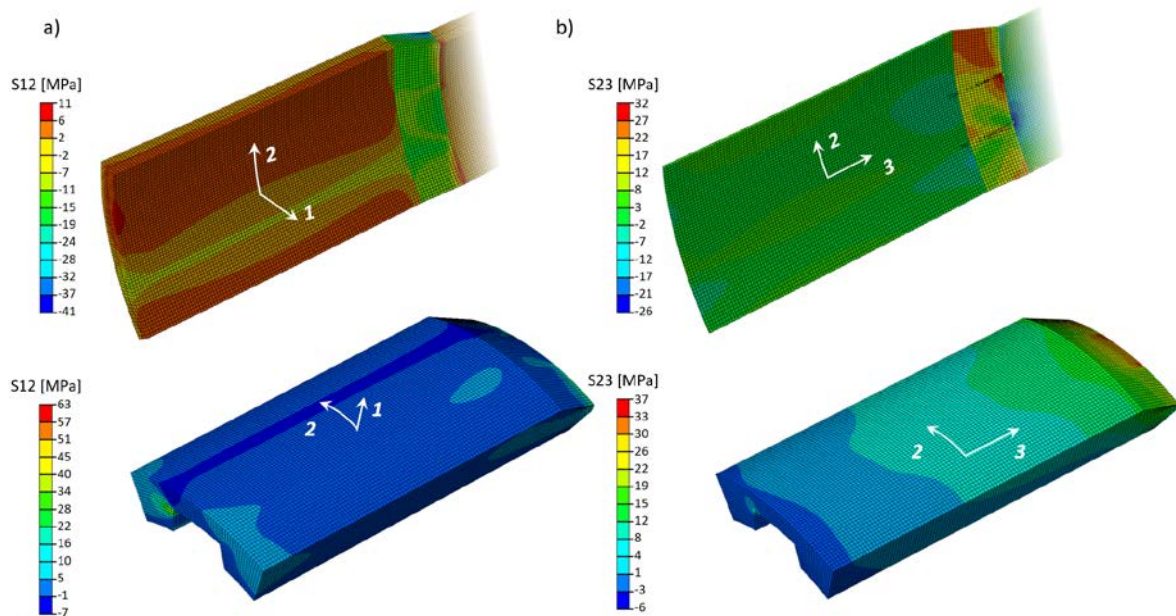


Abbildung 23: Spannungsergebnisse a): τ_{12} und b): τ_{23} am Interface des Laminats und der Spritzgussstruktur in TL 2

Als Ergebnis der FE-Analysen kann festgehalten werden, dass sich durch die Aufweitung des Hohlprofils und damit ermöglichte Vergrößerung der Zahnflankenhöhe beim TL 2 ein höheres Lastübertragungsniveau erreichen lässt. Kritischster Punkt des Bauteil-Demonstrators hinsichtlich seiner Beanspruchung ist bei jedem TL und Gestaltungsvariation der Ort, bei dem die Ecke der Naben Zahnflanke in Kontakt mit der Zahnflanke des Spritzformteils kommt. Infolge der gegenüber dem Spritzmaterials höheren Steifigkeit des Nabenmaterials kommt es hier zu lokalen großen Spannungsüberhöhungen. Für die gewählten Demonstratorstrukturen ist dies in der Mehrheit der Fälle nicht kritisch zu beurteilen, da hier auch seitens der Nabe Anpassungen erfolgen können um den Effekt zu reduzieren (Materialwahl; Kunststoffnabe, Verrundungen der Ecken und Kanten). Die Laminatauslastungen sowie auftretenden Schubspannungen im Interface zwischen Laminat und Spritzformteil sind ebenfalls als unkritisch zu beurteilen.

6.2.3 Virtuelle Prozesskettenmodellierung

Formfüllsimulation des TL1

Ziel der Formfüllsimulation ist die Validierung des in der Detailkonzeptionierung zum Spritzformprozess erarbeiteten Angusskonzeptes (siehe Abschnitt 6.4.1), die Bewertung der Formfüllbarkeit, der Temperierung des Werkzeugs, Durchführung von Verzugs- und Schwindungsanalysen sowie die Ermittlung geeigneter Prozessparameter. Hierfür kam die

Prozesssimulationsumgebung AUTODESK MOLDFLOW zur Anwendung. Das Arbeitspaket erfolgte in enger Abstimmung mit HPF, indem iterativ Werkzeug- und Angussgeometrien weiterentwickelt wurden. In einem ersten Schritt wurde ein CAD-Modell des Spritzformteils des TL 1 mit dem auf der Detailkonzeptionierung basierenden stirnseitigen Ringverteiler mit richtungsgebendem Anschnitt entworfen. Dies ist in Abbildung 24 dargestellt. Dieses Vorgehen erlaubt es, den Ringverteiler und Richtungsgeber in die Formfüllsimulation mit einzubeziehen, da diese als Teil der zu füllenden Kavität modelliert werden. In ersten Studien wurden folgend die relevanten geometrischen Parameter des Angussystems ($d_{\text{Anschnitt}}$, d_{Ring} und $\alpha_{\text{Anschnitt}}$) variiert und hinsichtlich des Strömungsverhaltens der Schmelze sowie der Füllzeiten optimiert.

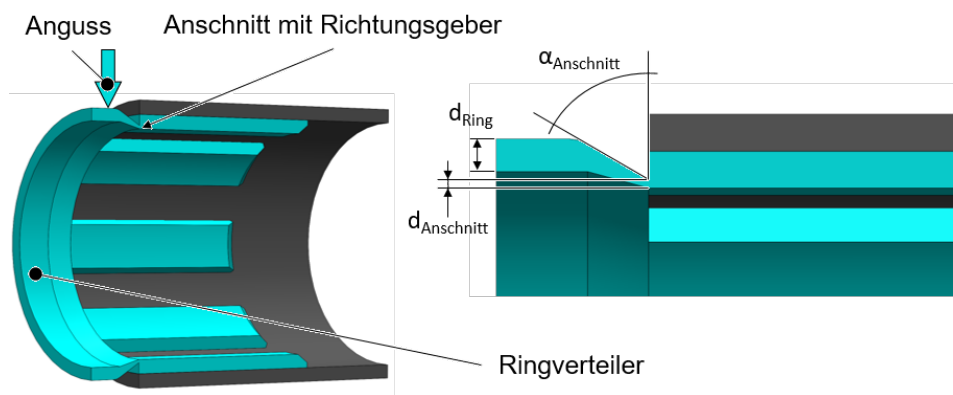


Abbildung 24: CAD-Modell mit Ringverteiler und Anschnitt mit Richtungsgeber für die rheologische Formfüllsimulation am Beispiel des TL 1

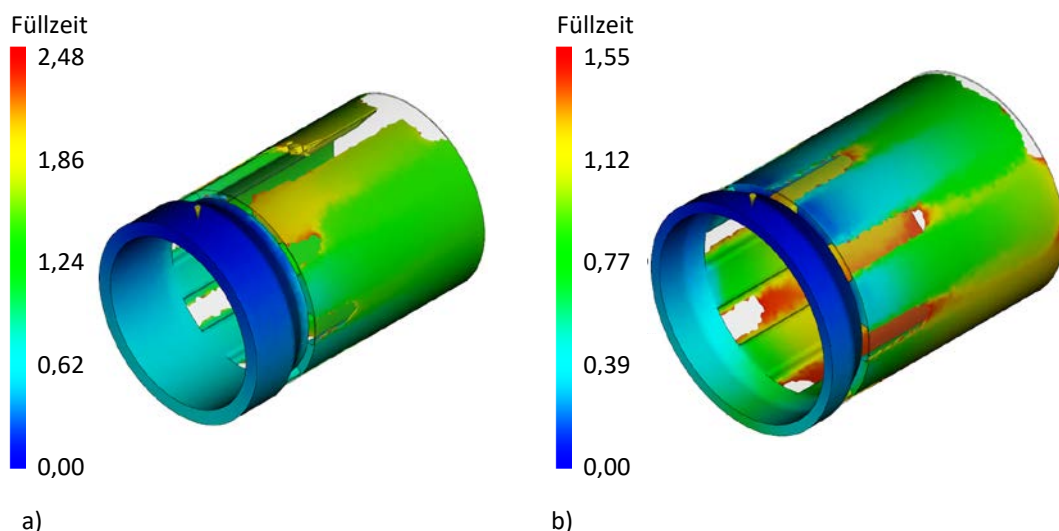


Abbildung 25: Studien zur Formfüllung und Füllzeiten, a) unbalancierter Anguss, b) balancierter Anguss

Aufgrund der einseitigen Lage des Angusses an den Ringverteiler konnte zunächst keine zufriedenstellende Formfüllung erreicht werden, was sich vor allem in langen bzw. unausgeglichenen Füllzeiten der einzelnen Zahnstrukturen des Spritzformteils äußert (siehe Abbildung 25 a) und b)). Daher wurde eine Angussbalancierung vorgenommen, indem der Parameter $d_{\text{Anschnitt}}$ für jeden Zahn der Spritzformstruktur angepasst wurde. Hiermit konnte eine zeitgleiche Füllung aller Zähne erreicht werden. Nach erfolgter Detaillierung und Validierung des Angusskonzeptes wurde ein weiteres FE-Modell des Werkzeugkonzeptes realisiert (Abbildung 26). Die numerische Abbildung der Kühlkanäle ermöglicht dabei die Durchführung präziser Studien zur Schwindung und Verzugsanalyse sowie die Ermittlung geeigneter Prozessparameter.

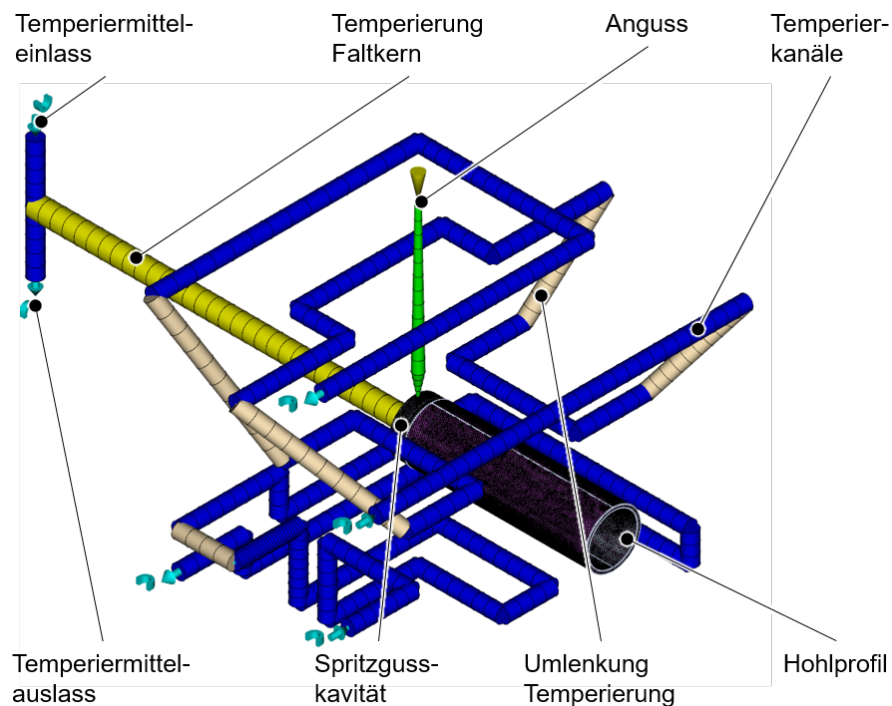


Abbildung 26: Detailliertes FE-Modell des Spritzgusswerkzeugs mit Kühlkanälen

Die Ergebnisse der Verzugs- und Schwindungsanalysen finden sich in Abbildung 27. Wie aus der Abbildung ersichtlich wird, treten keine lokalen Hotspots bezüglich des Verzugs oder der Schwindung auf. Dies spricht für Anzahl und Lage der Kühlkanäle, sodass hier keine weiteren Optimierungen notwendig waren. Anhand der Formfüllsimulation kann noch kein Rückschluss gezogen werden, ob der Verzug kritisch in Hinblick auf den Bauteildemonstrator zu bewerten ist. Hierin besteht ein technisches Risiko, da das Spritzformteil nach innen schwindet und daher Ablösungserscheinungen vom Hohlprofil nicht ausgeschlossen werden können. Das

Werkzeugkonzept konnte anhand der durchgeführten Studien erfolgreich weiter iteriert und optimiert werden.

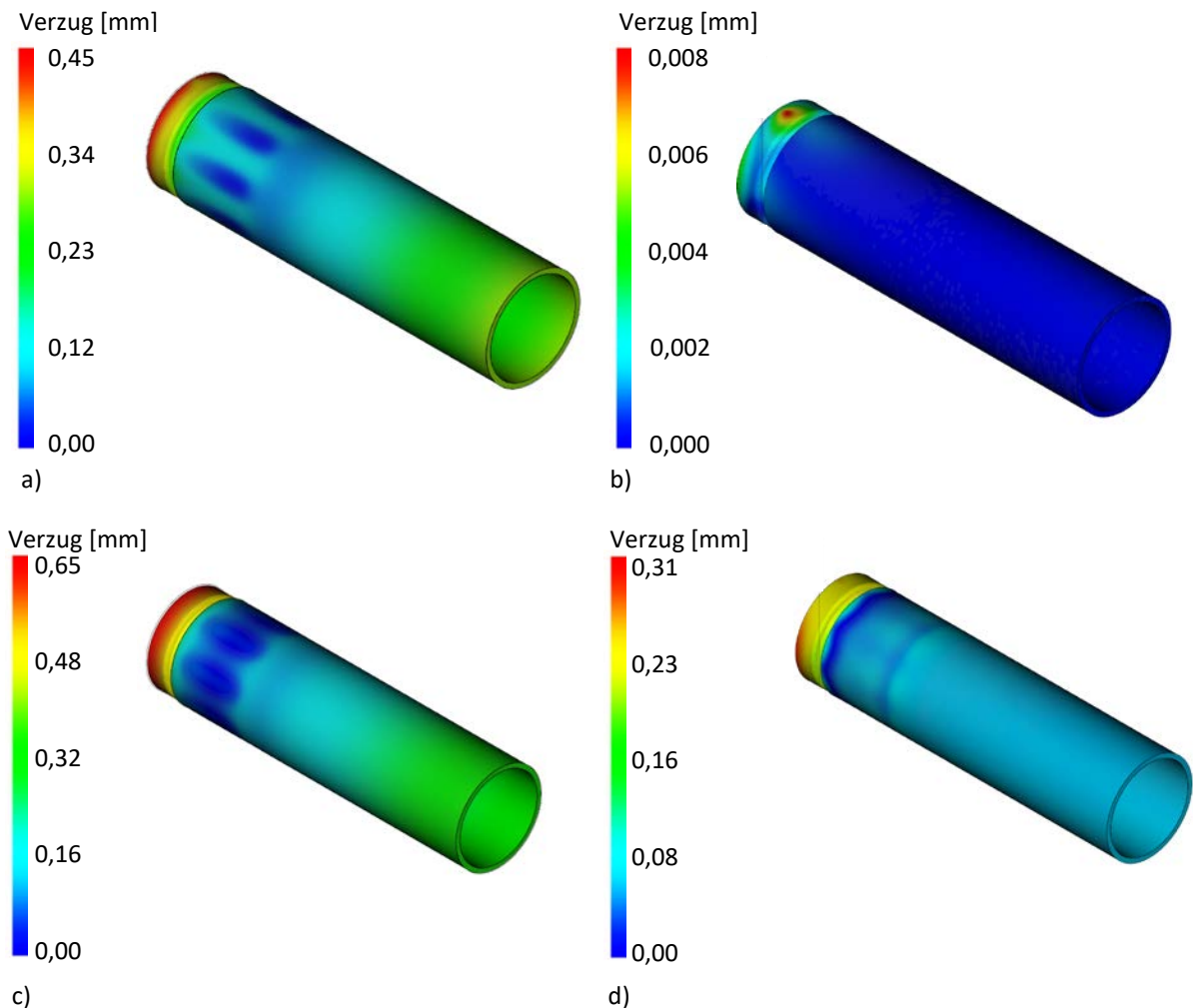


Abbildung 27: Verschiedene Einflüsse auf die Schwindung und den Bauteilverzug: Verzug kumuliert
a), Einfluss Temperierung b), Einfluss Schwindung c) und Einfluss Ausrichtungseffekte d)

Spritzformsimulation des TL2

Im Anschluss an die Formfüllsimulationen und die Ermittlung einer Anguss-Strategie für das Innenanspritzen der FTV-HP ist die virtuelle Abbildung des Deformationsverhaltens des Demonstrators auf Basis gekoppelter Spritzgieß-Struktur-Simulationen im Spritzformverfahren ein weiteres Ziel. Auf Basis von Voruntersuchungen wurden Limitationen in der Software AUTODESK MOLDFLOW zur Abbildung des Deformationsverhaltens von Einlegern im Spritzgießprozess erkannt. Die Deformation von Einlegern infolge von während des Anspritzens

auf sie wirkenden Temperaturen und Drücken können in AUTODESK MOLDFLOW nicht berücksichtigt werden. Weiterhin ist eine detaillierte Modellierung und Analyse eines endlosfaserverstärkten und geflochtenen Laminats nicht möglich, da die Definitionsmöglichkeiten von Materialien in der Software eingeschränkt sind. Dies ist jedoch notwendig, da im Spritzformverfahren ein partiell aufgeschmolzenes FTV-HP durch das Anspritzen mit kurzfaserverstärkter Kunststoffschmelze funktionalisiert und umgeformt werden soll. Um das Deformationspotenzial des Hohlprofils im TL 2 simulativ abbilden zu können, ist die Entwicklung eines Arbeitsablaufes notwendig, der die rheologische Formfüllsimulation und die Umformsimulation kombiniert. In Abbildung 28 ist das TL 2 des InPro-Prozesses schematisch dargestellt.

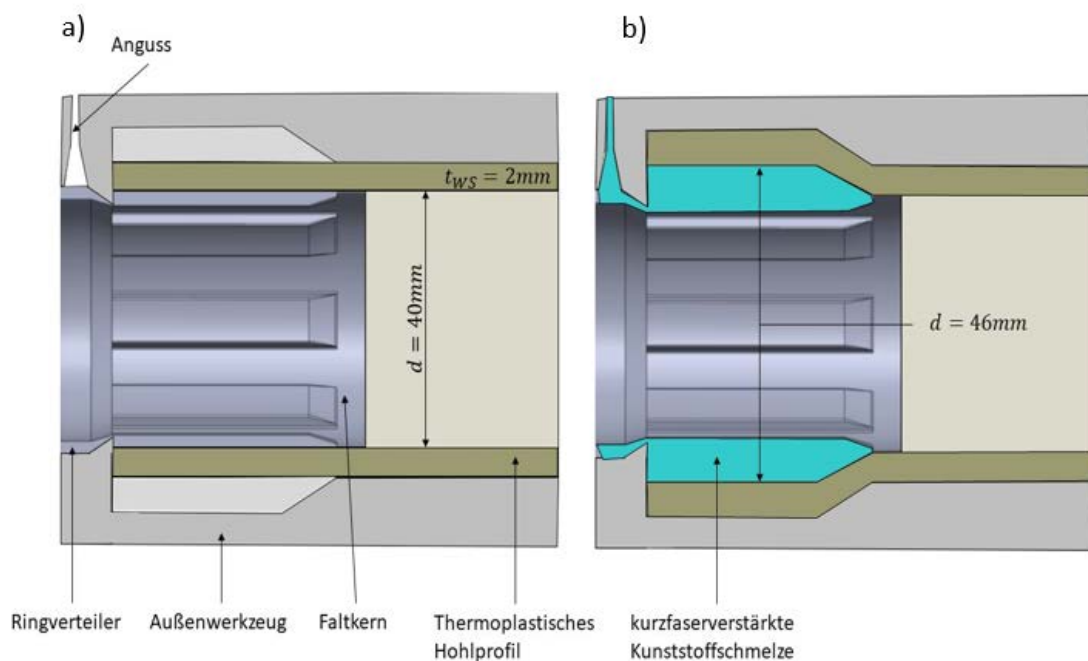


Abbildung 28: Hohlprofil im Spritzform-Werkzeug: a) vor der Formfüllung, b) nach der Formfüllung

Die numerische Analyse der Umformung des Hohlprofileinlegers erfolgt mithilfe der Software SIMULIA ABAQUS CAE. In dieser Umgebung kann das endlosfaserverstärkte Material des Hohlprofils numerisch abgebildet werden. Die Simulationssoftware AUTODESK MOLDFLOW wird eingesetzt, um das Anspritzen der Spritzgießstruktur am Hohlprofil zu simulieren. Ziel dieses Modells ist es, die zeitabhängigen durch die Schmelze eingebrachten Randbedingungen, wie Temperaturen und Drücke, entlang des Hohlprofils abzubilden. Hierfür sollen die resultierenden Drücke und Temperaturen am Schmelze-Einleger-Interface in das Umformmodell implementiert werden. Diese thermischen und mechanischen Randbedingungen sind ausreichend für die Berücksichtigung der Deformation des Einlegers in

der Software ABAQUS, in der die Modellierung der Schmelze sehr aufwendig wäre. Die Kopplung der Umform- mit der Formfüllsimulation erfolgt mit der Software CONVERSE. Um den numerischen Aufwand während der Entwicklung des Simulationsablaufes zu erleichtern, wurde der Prozess zunächst in einem Achtel-Modell analysiert. Das Hohlprofil wird in der Formfüllsimulation als Einleger definiert. So wird dieser Volumenkörper in der Analyse nicht mit Schmelze gefüllt, sondern dient als Begrenzung der Kavität. Dem Hohlprofil können zudem eine Ausgangstemperatur sowie thermomechanische Materialeigenschaften zugewiesen werden. Im Umformmodell wird der Wärmeaustausch zwischen Schmelze und Hohlprofil nicht berechnet. Dieser Wärmeaustausch wird im Formfüllmodell berücksichtigt, weshalb die realitätsnahe Definition der Schmelze-, Hohlprofil- und Werkzeugtemperaturen hier wesentlich ist. Die für die Formfüllsimulation angenommenen Prozessparameter sind in Tabelle 4 aufgelistet.

Tabelle 4: Prozessparameter des Formfüllmodells

Prozessparameter	Werte
Werkzeugtemperatur	200 °C
Temperatur der Schmelze	375 °C
Temperatur des Hohlprofils	390 °C
Nachdruck-Umschaltpunkt	99% Kavitätsfüllung
Einspritzzeit	1 s
Nachdruck	80% des maximalen Einspritzdrucks
Nachdruckzeit	30s
Spritzgussmaschine	ARBURG Allrounder 370H
Abkühlzeit	30 s
Hohlprofil-Material	KETASPIRE PEEK KT-880 CF40
Formmassen-Material	VICTREX PEEK 90GL30
Werkzeug-Material	Werkzeugstahl A-2
Wärmeübergangskoeffizient	$30.000 \frac{W}{m^2 K}$

Bei der Erstellung des FE-Netzes sollte grundsätzlich auf die Abstimmung der Netzfeinheit in ABAQUS und in MOLDFLOW geachtet werden. Ist das Netz des MOLDFLOW-Modells feiner als das ABAQUS-Netz entsteht ein Mehraufwand der Rechenleistung, welcher nach der Übertragung der Temperaturen und Drücke in CONVERSE nicht ausgenutzt werden kann. In MOLDFLOW können nur dreieckige Schalenelemente oder Tetraeder-Elemente in zweidimensionalen bzw. dreidimensionalen Analysen bei der Vernetzung eingesetzt werden. ABAQUS ermöglicht eine strukturierte Vernetzung des Hohlprofils mit Hexaeder-Elementen, welche Verschiebungen und

Belastungen an jedem Knoten in alle drei Raumrichtungen abbilden können. Im Gegensatz dazu kann in einem Tetraeder-Element nur ein konstanter Spannungszustand abgebildet werden, weshalb diese Elemente sich steifer verhalten als Hexaeder-Elemente. Damit Ergebnisse eines mit Tetraeder-Elementen vernetzten Modells mit den Ergebnissen des Modells mit Hexaeder-Vernetzung vergleichbar sind, muss die Feinheit des Tetraeder-Netzes stark erhöht werden. Für die Umformsimulation wurden daher Hexaeder-Elemente zur Vernetzung des Achtelmodells genutzt.

Für die Modellierung des Spritzform-Prozesses werden die Druck- und Temperaturergebnisse der Formfüllsimulation benötigt. Die Temperaturergebnisse liegen dabei für Einleger und Formmasse in der Kavität vor, deren Wärmeaustausch während der Formfüllsimulation berücksichtigt wird. Durch Übertragung des Temperaturergebnisses am Einleger in die Umformsimulation wird so der Temperatureinfluss der Schmelze auf das Hohlprofil mitberücksichtigt. Druckergebnisse werden in der Formfüllsimulation ausschließlich am Formteil ausgegeben. Da die Kavität einseitig durch den Einleger begrenzt wird, stellt das Druckergebnis auf der dem Hohlprofil zugewandten Kavitätsseite den Einfluss der Schmelze dar und kann in das Umformmodell übertragen werden. In Abbildung 29 ist das Vorgehen des Simulationsablaufs schematisch dargestellt.

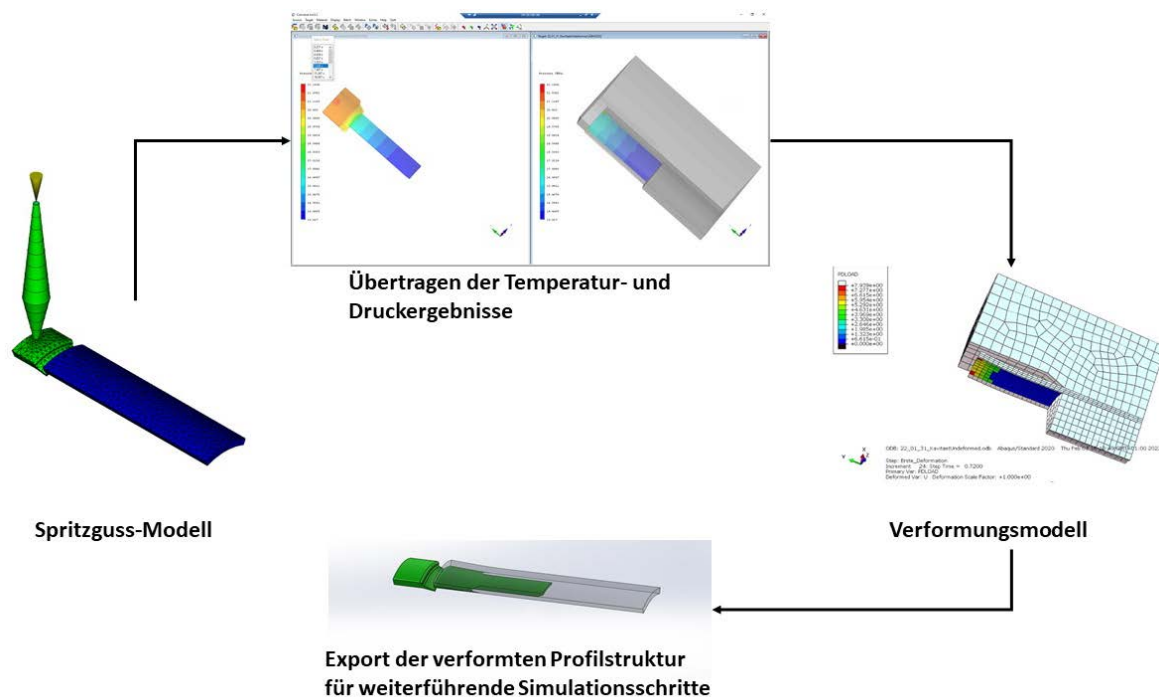


Abbildung 29: Simulationsablauf des Spritzform-Prozesses

Es wurden zwei Variationen des Simulationsablaufes entwickelt. Während bei hohem Modellierungsaufwand die kontinuierliche Kavitätsaufweitung, wie in Abbildung 30 a) schematisch dargestellt ist, berücksichtigt werden kann, zeigt b) die Variation des Simulationsablaufes in dem die kontinuierliche Kavitätsaufweitung vernachlässigt wird um den Modellierungsaufwand stark zu reduzieren.

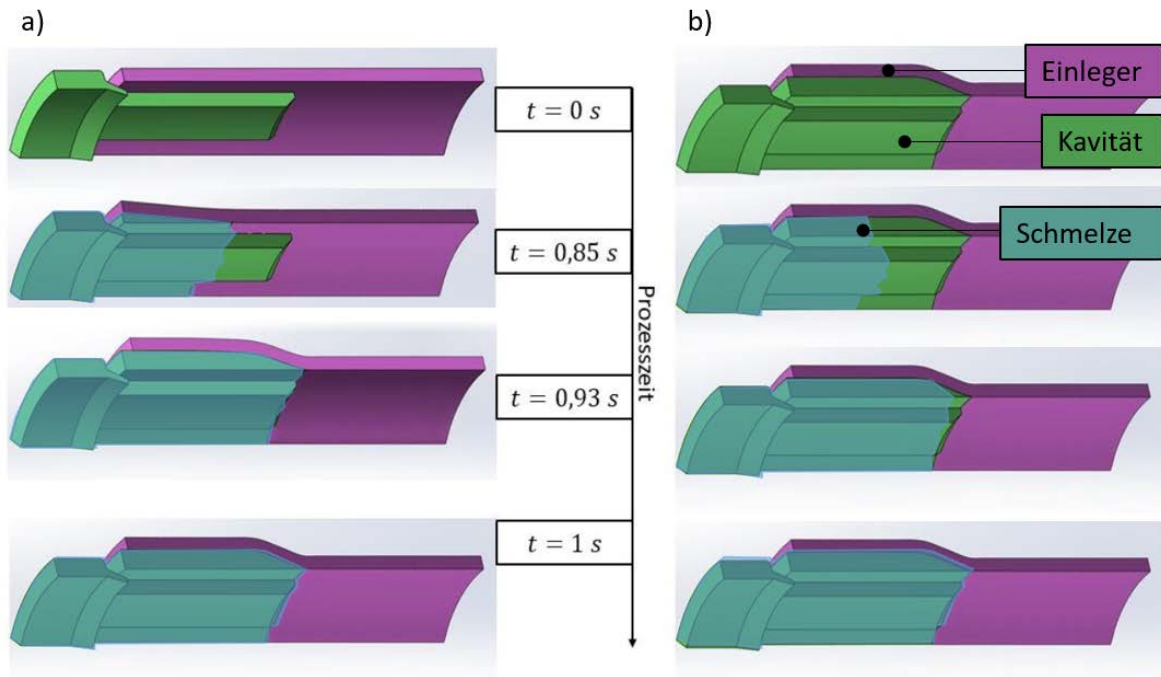


Abbildung 30: Schematische Darstellung der Kavitäten a) im iterativen Simulationsablauf; b) im zwischenschrittlosen Simulationsablauf

Da das Hohlprofil auf Temperaturen oberhalb der Schmelztemperatur der Matrix vorgewärmt wird, bewirkt der Erstkontakt der Schmelze eine sofortige Umformung des Hohlprofils, wodurch sich die Kavität vergrößert und die Schmelze einen größeren Bereich des Hohlprofils kontaktieren kann. Um dieses Verhalten numerisch abzubilden, wird im iterativen Simulationsablauf die bis zu einem selbst gewählten Inkrement, in diesem Falle $t = 0,85 \text{ s}$, verformte Hohlprofilstruktur zunächst als ein *Orphan-Mesh* in ABAQUS exportiert. Dieses *Orphan-Mesh* wird weiterhin in ABAQUS zu einem neuen Volumenkörper transformiert, welcher als STEP-Datei exportiert werden kann. Im nächsten Schritt wird diese STEP-Datei genutzt, um mithilfe einer CAD Software wie SOLIDWORKS die neue aufgeweitete Kavitätsgeometrie zu modellieren. Diese neue Kavitätsgeometrie markiert den Beginn des nächsten Iterationsschrittes, in welchem dieser Ablauf wiederholt wird. So kann die Aufweitung der Kavität während des Anspritzvorgangs beliebig genau berücksichtigt werden, jedoch erhöht jeder weitere Iterationsschritt den Simulationsaufwand enorm. Fehlerbehaftet im iterativen

Simulationsablauf ist jedoch die Simulation der Formfüllung bei einer sich kontinuierlich aufweitenden Kavität. In jedem einzelnen Iterationsschritt, wird ein neues Formfüllmodell aufgebaut in dem die Schmelze erneut in eine leere Kavität fließt. Die in einem vorangegangenen Iterationsschritt beobachtete Formfüllung wird somit vernachlässigt und der Schmelze-Hohlprofil-Kontakt bildet sich in jedem Iterationsschritt etwas unterschiedlich aus.

Im zwischenschrittlosen Ansatz wird die resultierende Kavität bei einem ideal umgeformtem Hohlprofil als Ausgangspunkt in der Spritzgussimulation genutzt. Dabei wirken Temperaturen und Drücke im Umformmodell während des Einspritzvorgangs auf die gesamte Hohlprofil-Innenseite und der Grad der Formfüllung in Abhängigkeit der Zeit ändert sich. Der Modellierungsaufwand wird so auf nur eine Iterationsschleife nach Abbildung 29 reduziert. In Abbildung 31 ist ein Vergleich der mithilfe des iterativen und des zwischenschrittlosen Arbeitsablaufes berechneten Radialverschiebung an dem in dieser Abbildung veranschaulichten Referenzpunkt (RP) dargestellt.

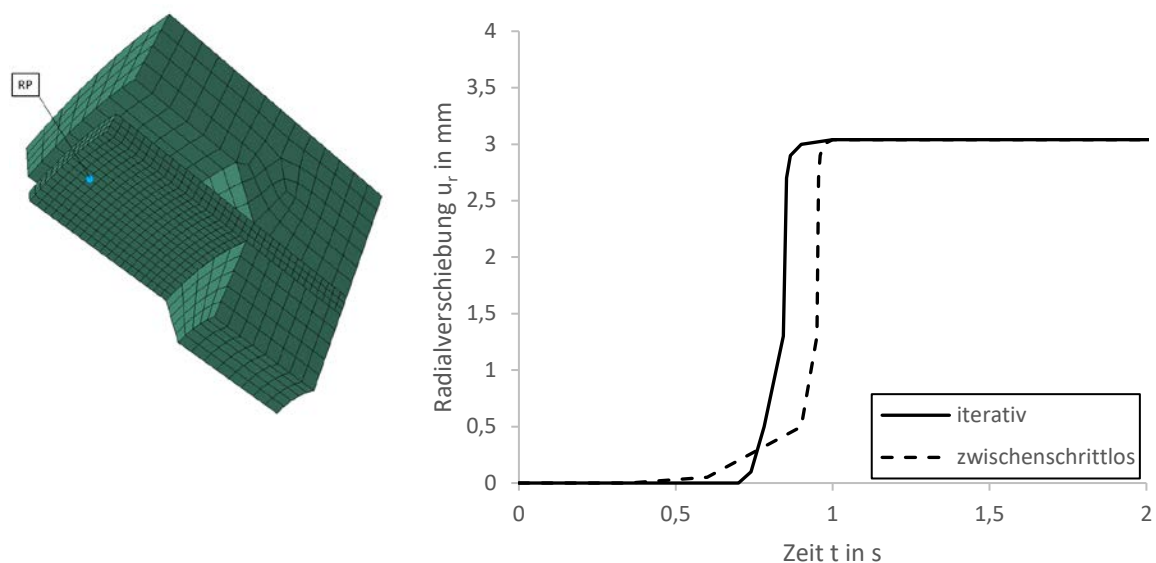


Abbildung 31: Vergleich der Radialverschiebung des RP in Abhängigkeit der Zeit mit dem iterativen und dem zwischenschrittlosen Simulationsablauf

Eine Herausforderung in der Auswertung der Deformation in der iterativen Simulation ist der Verlust der Informationen aus den vorangegangenen Iterationsschritten. In den Zwischenschritten bildet ein bereits verformtes Hohlprofil, welches ein Ergebnis eines vorangegangenen Zwischenschrittes ist, den Ausgangspunkt im aktuellen Zwischenschritt, in welchem die bereits erfolgte Knotenverschiebung unbekannt ist. Um den Verschiebungsverlauf des RP während der gesamten Profilverformung abzubilden, wurde der Startwert der

Verschiebung jedes Zwischenschrittes auf den Endwert der Verschiebung des vorherigen Zwischenschrittes normiert.

Da im zwischenschrittlosen Simulationsablauf eine größere Kavität während des gesamten Formfüllvorgangs berücksichtigt wird und damit die Füllzeit länger ist, kommt es zu einer zeitlichen Verschiebung des Druckmaximums am RP im Vergleich zum iterativen Simulationsablauf. Dadurch wird die maximale Radialverschiebung am RP im zwischenschrittlosen Simulationsablauf ca. $\Delta t = 0,2\text{ s}$ später erreicht. In den beiden Simulationsansätzen wird das Hohlprofil vollständig aufgeweitet, bis es durch das Außenwerkzeug begrenzt wird, weshalb die gleiche maximale Radialverschiebung von $u_R = 3\text{ mm}$ erreicht wurde. Aufgrund der kurzen Füllphase ist der Einfluss der Kavitätsaufweitung während des Spritzformens in diesem Modell für das Deformationspotential des Einlegers nicht signifikant. Zudem kann eine realitätsnahe Kavitätsfüllung im iterativen Simulationsablauf unabhängig von der Anzahl der Iterationsschritte nicht modelliert werden, da die Formfüllung in jedem Zwischenschritt der Formfüllsimulation erneut beginnt. Daher wird der zwischenschrittlose Simulationsansatz eingesetzt.

Die Prozesssimulation des Spritzform-Prozesses muss softwareübergreifend durchgeführt werden. Daher ist der Aufbau eines parametrisierbaren Modells bisher nicht möglich. Die Änderung von Materialeigenschaften in der Struktursimulation ändern das Umformverhalten des Hohlprofils und dessen Geometrie nach der Verformung. Das Hohlprofil muss erneut exportiert und die neue Kavität modelliert werden. Die Veränderung der Prozessparameter der Formfüllsimulation resultiert in neuen Temperatur- und Druckverläufen, die erneut auf das Umformmodell übertragen werden müssen und das Deformationsverhalten des Hohlprofils ändern. Die Spritzgießstruktur am Hohlprofil wird mithilfe eines Ringverteilers gefüllt, welcher einseitig angespritzt wird. Die Keilstrukturen, welche dem Anguss am Ringverteiler am nächsten sind, werden so früher mit Schmelze gefüllt als die auf der dem Anguss abgewandten Seite. Durch diesen Zeitversatz ist ein abweichendes Deformationsverhalten des Hohlprofils im Vergleich zum Achtelmodell zu erwarten. In weiterführenden Untersuchungen zur Prozesssimulation des Spritzform-Prozesses sollten die Modellierungsstrategien daher auf ein Vollmodell angewendet werden.

6.3 Kontinuierliche Hohlprofil-Konsolidierung

6.3.1 Detailkonzeption CBM-Prozess

Ein weiteres Ziel des InPro-Vorhabens ist die Überführung der am TUD-ILK patentierten CBM-Technologie auf die Verarbeitung von Hochtemperatur-Thermoplasten wie PAEK, PEEK oder PEKK. Dadurch wird eine sehr effiziente Herstellung von Profilstrukturen für die Luftfahrt ermöglicht. Das Prinzip-Schema des Verfahrens ist in Abbildung 32 dargestellt.

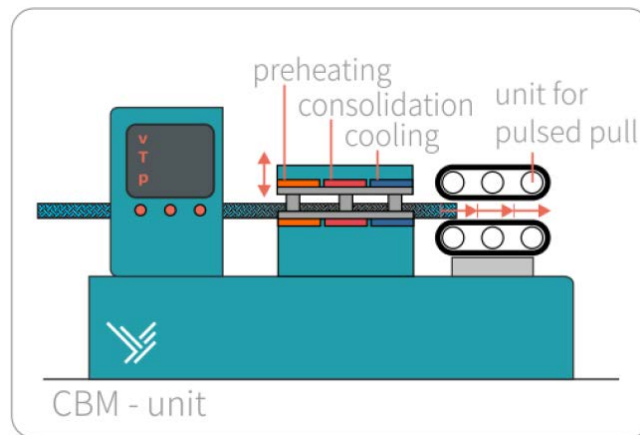


Abbildung 32: CBM-Einheit zur semi-kontinuierlichen Herstellung von Hohlprofilen

Im Gegensatz zum Pultrusionsverfahren, bei dem die Außen- und Innenflächen des Profils durch die Pultrusionsdüse definiert sind, definiert das Werkzeug beim CBM-Verfahren nur die Außenfläche. Dadurch kann die Struktur des Laminats über die Länge des Profils variabel verändert werden. Zusätzlich zu den im Flechtprozess aufgebrachten Lagen kann weiteres Material aufgebracht werden, z. B. durch Patching oder Tapelegen. Wie beim Continuous Compression Molding (CCM)-Verfahren erfolgt die Konsolidierung sukzessive in wiederkehrenden Schritten. Die Teilprozessschritte sind:

1. Einfahren der Preform in das Konsolidierungswerkzeug mittels der Seilwinde / Ausfahren des zuvor konsolidierten Profilabschnitts aus dem Konsolidierungswerkzeug
2. Konsolidierungsphase: Aufheizen der Preform auf Verarbeitungstemperatur und Druckbeaufschlagung der Blase
3. Abkühlung des konsolidierten Profils unter die Erstarrungstemperatur

Die Konsolidierung findet im zweiten Teilprozessschritt des CBM-Verfahrens statt. Zunächst werden das äußere Werkzeug und der Teil des Vorformlings, der sich innerhalb der Konsolidierungszone des Werkzeugs befindet, auf Verarbeitungstemperatur erwärmt. Anschließend wird der Prozessdruck über die flexible Blase an der Innenseite des Vorformlings aufgebracht. Aufbauend auf den eigenen Vorarbeiten im Projekt LeiTra sowie der finalen Demonstratorgeometrie, dem Konzept der Gesamtprozessroute und dem Pflichtenheft aus HAP 1 unterstützte das TUD-ILK HERONE in der Detailkonzeption des CBM-Prozesses für Hochtemperatur-Thermoplaste. Dabei wurden die wesentlichen Herausforderungen für die Herstellung der geplanten Demonstratoren im CBM-Prozess identifiziert:

- Erhöhung der Verarbeitungstemperatur von 240°C auf 400°C

- Herstellung von variablen Wandstärken (Ply-drop-offs)
- Entwicklung eines Online Prozess-Monitoring-System
- Automatisierung der Prozessstrecke

Nachfolgend sind die Anforderungen und Wünsche, welche iterativ in Gesprächen mit HERONE erarbeitet wurden, an die einzelnen Module der CBM-Einheit in Tabelle 5 aufgelistet.

Tabelle 5: Anforderungen und Wünsche an die CBM-Anlage

Modul	Anforderung	Wunsch
Werkzeug/ Kavität	• einteiliges Werkzeug für hochrotierende Bauteile (Rundlaufeigenschaften – keine Naht auf der Bauteiloberfläche) • zweiteiliges Werkzeug für nicht bzw. gering rotierende Bauteile • Entformbarkeit bei großem $\Delta\alpha$ zwischen Hohlprofil und Werkzeug • Konsolidierung von Winkelverbunden 0° – 55° • Temperaturbeständigkeit bis 400°C	• geringer Entwicklungsaufwand (Nutzung vorhandener Infrastruktur) • geringe Taktzeit (20 min für 0,5 m) • Modularität zwischen ein- und zweiteiligen Werkzeugkonzepten • komplexe Bauteile (Hinterschnitte)
Temper- ierung	• Temperaturverteilung im Werkzeug ($\Delta T < 5^\circ\text{C}$) • möglicher Temperaturbereich bis 400°C	• geringe Prozesszeit (hohe Heiz- und Kühlrate)
Druckauf- bau / Dichtung	• unterschiedliche Bauteilwandstärken (Ply-drop) • keine Nahtbildung auf der Innenoberfläche durch übermäßigen Schlauch • mediendicht bei $p = 6\text{ bar}$ • temperaturbeständig bis 400°C	• Vermeidung von Verbrauchsmaterial • Langlebigkeit des Moduls (50 m konsolidiertes Profil) • Enge Formtoleranz und konstante Wanddicken durch den Druckschlauch
Abzug	• Überwindung der Reibung zwischen Hohlprofil und Werkzeug	• Minimierung der Abzugskräfte

Qualitätssicherung	Erfassung von Konsolidierdruck, -zeit und -temperatur
--------------------	---

In mehreren Workshops wurden dabei die Konzepte für die einzelnen Module der CBM-Anlage federführend von HERONE und in Unterstützung des TUD-ILK erarbeitet. Als Werkzeugkonzept sind zwei Varianten erarbeitet worden: das einteilige Werkzeug und das zweiteilige Werkzeug. Das einteilige Rohrwerkzeug ist einfach umzusetzen und generiert gute Rundlaufeigenschaften des zu fertigenden Bauteils aufgrund nicht vorhandener Bauteilnähte. Jedoch ist die Entformung aufgrund der unterschiedlichen Längsdehnungskoeffizienten zwischen Werkzeug und FTV eine Herausforderung. Aufgrund des Laminataufbaus $[\pm 45^\circ_4 | 0^\circ | \pm 45^\circ_4]$ ergibt sich der Wärmeausdehnungskoeffizient in Quer- bzw. Umfangsrichtung des Laminates zu $\alpha_{Laminat4_quer} = 2,21 * 10^{-6} K^{-1}$, wohingegen der Wärmeausdehnungskoeffizient des Stahlwerkzeugs $\alpha_{E235} = 10 * 10^{-6} K^{-1}$ beträgt. Dadurch verspannt sich das Laminat beim Abkühlen im einteiligen Rohrwerkzeug. In Abbildung 33 sind vergleichend die Längsdehnungskoeffizienten von verschiedenen relevanten Werkzeugmaterialien gegenüber den CF/PEEK Materialien dargestellt. Für ein Edelstahlwerkzeug liegt der maximale Flechtwinkel bei $\pm 40^\circ$ und für Titan bei $\pm 50^\circ$, für welchen das FTV-Rohr nach der Konsolidierung noch entformbar ist. Damit können übliche Zug-Druck-Streben hergestellt werden. Die Herstellung von Torsionswellen und Rohrleitungssystemen wird in einem zweiteiligen Werkzeug erleichtert, da in diesem die Klemmkräfte aufgrund des thermischen Aufschumpfens des Formwerkzeugs auf das gefertigte Hohlprofil während des Abkühlvorgangs kompensiert werden können. Geplant ist, dass im Werkzeugkonzept der CBM-Anlage sowohl einteilige als auch zweiteilige Werkzeuge eingesetzt werden können. Der Temperierung des Werkzeugsystems kommt eine hohe Bedeutung zu. Die Verarbeitung von PEEK ist mit vielseitigen technologischen Herausforderungen verbunden. Viele Vorkenntnisse wurden in dem LuFo-V-3 Projekt FeliSa erarbeitet. Für die Werkzeugtemperierung der CBM-Einheit ist ein variothermes sowie ein isothermes Werkzeug denkbar. Im variothermen System werden Werkzeug und FTV-Preform gemeinsam über die Schmelztemperatur des Polymers erwärmt und durchlaufen den Konsolidierzyklus.

6 Ergebnisse des Teilprojektes

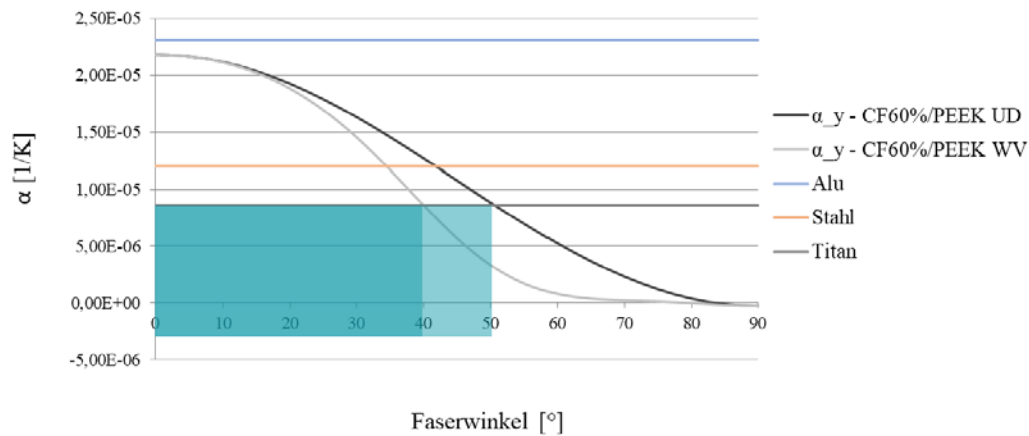


Abbildung 33: Unterschiedliche Längsdehnungskoeffizienten α von Werkzeug und Faser-Kunststoff-Verbund Hohlprofilen

In der isothermen Verarbeitung kommen entweder seriell temperierte Zonen (Heizen / Kühlen) zum Einsatz oder es findet eine externe Erwärmung der Preform statt und das Werkzeug dient zur Konsolidierung und Abkühlung. Abbildung 34 gibt einen Überblick über die relevanten Temperierverfahren sowie deren Vor- und Nachteile.

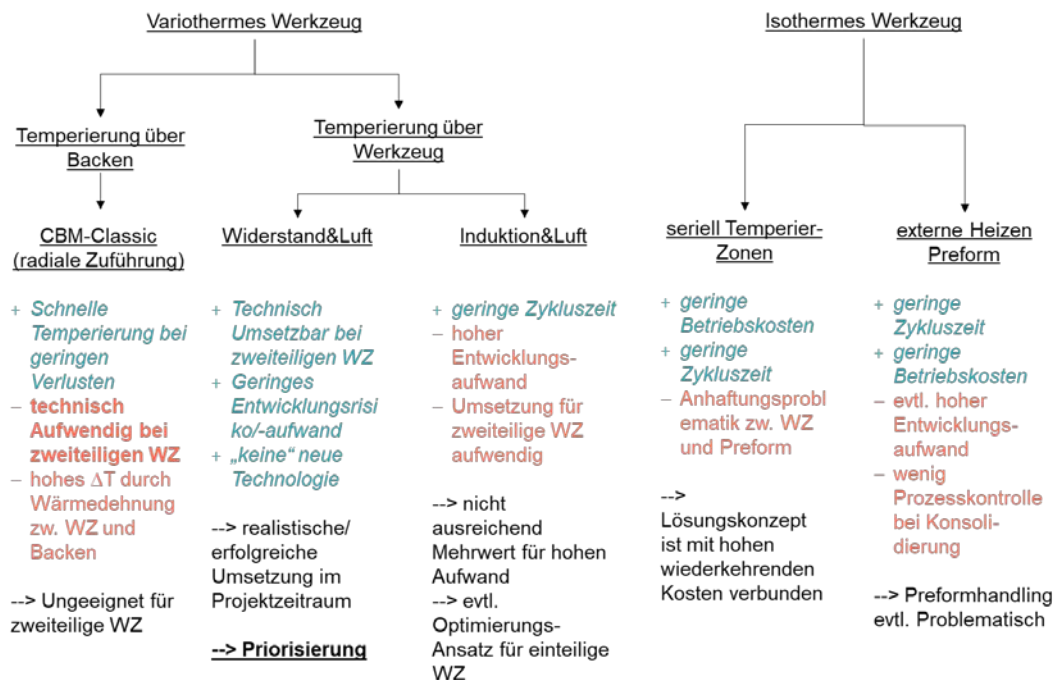


Abbildung 34: Übersicht und Bewertung relevanter Temperierkonzepte für das CBM-Verfahren [HERONE]

Aufgrund der Kompetenzen und eigenen Vorarbeiten von HERONE wurde ein variothermes Werkzeug, temperiert über Widerstandserwärmung und Luftkühlung, im Projekt bevorzugt. Damit lassen sich Heiz- und Kühlraten entsprechend der Werkstoffanforderungen genau einstellen um die Konsolidierqualität zu gewährleisten und die Kristallinität der semi-kristallinen Polymere zu optimieren. Fokus in der Technologieentwicklung lag auf dem Schlauch- und Dichtsystem der CBM-Einheit. Über Brainstorming und Workshops wurden drei relevante Konzepte für Schlauch- und Dichtsystem identifiziert. Das bisher am TUD-ILK entwickelte CBM-System für technische Thermoplaste wurde über einen Dichtmolch und instationären PA6.6 Schlauch für die Verarbeitung von CF/PA6 Hohlprofilen umgesetzt. Die im Vergleich zu PEEK (380 °C) niedrigeren Verarbeitungstemperaturen von PA6 (230 °C) ermöglichten die Nutzung von Silikonkissen im Dichtmolch. Darüber hinaus konnte ein PA6.6 Folienschlauch als günstige Druckmembran eingesetzt werden. Für die Verarbeitung von Hochleistungsthermoplasten wurden drei verschiedene Konzepte von HERONE entwickelt und experimentell untersucht.

6.3.2 Entwicklung Werkzeugsystem

Anlagenkonzept

In mehreren Workshops wurden die Konzepte für die einzelnen Module der CBM-Anlage federführend von HERONE und in Unterstützung des TUD-ILK erarbeitet. Im Rahmen der Konzeptionsphase wurde die Entscheidung getroffen, eine Vorversuchsanlage zum Proof-of-Concept zu konstruieren und umzusetzen, um die wesentlichen Herausforderungen auf ihre Lösbarkeit hin zu untersuchen. In Abbildung 35 ist die Konstruktion der CBM-Vorversuchsanlage dargestellt. Sie besteht aus einem Grundgerüst aus Aluminiumprofilen, einer Abzugseinheit aus einer Seilwinde und Gurtführung und in der Konsolidiereinheit aus Formwerkzeug und Dichtsystem. Die Länge des Preformbereichs vor dem Konsolidierwerkzeug sowie des Bauteilbereichs nach dem Konsolidierwerkzeug wird durch die maximale zu verarbeitende Bauteillänge bestimmt. Durch die Wahl eines variothermen Temperiersystems des Formwerkzeugs kommt der Lagerung des Formwerkzeugs eine hohe Bedeutung zu. Infolge der signifikanten Temperaturdifferenz zwischen Raumtemperatur und Konsolidierungstemperatur (bis zu 400 °C) muss die Lagerung die thermische Längsdehnung des Formwerkzeugs kompensieren. Dies wurde über eine schwimmende Lagerung aus Festlager bauteilseitig und Loslager preformseitig umgesetzt. Das TUD-ILK unterstützte HERONE in der Entwicklung und der Inbetriebnahme der Anlage, vor allem in der Auslegung einzelner Komponenten sowie der Elektronik der Anlage.

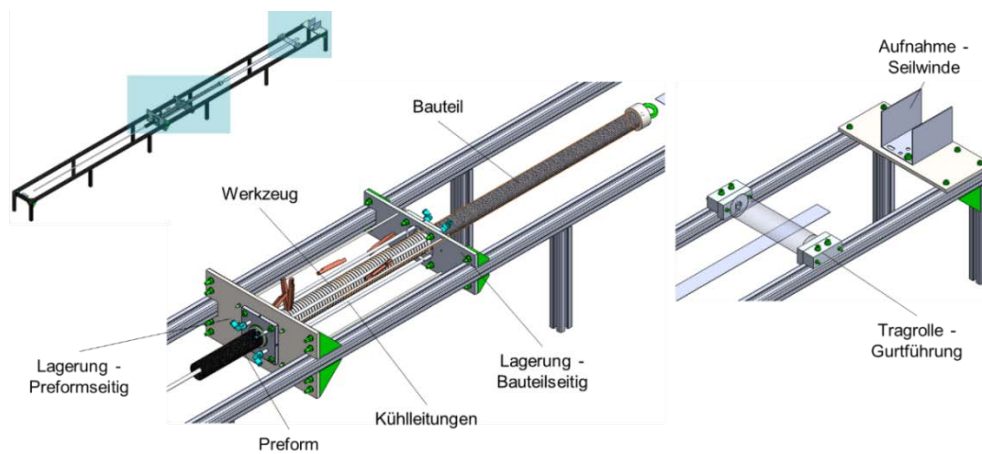


Abbildung 35: CAD der CBM-Vorversuchsanlage zur Konzeptvalidierung

Formwerkzeug und Temperierung

In Workshops mit HERONE wurde sich für eine variotherme Temperierung des Formwerkzeuges entschieden. Das umgesetzte variotherme Temperierkonzept besteht aus elektrischen Heizleitern und Luftkühlung zur Erwärmung und Abkühlung eines einteiligen Rohrwerkzeuges. Es wurde in experimentellen Studien untersucht (siehe Abbildung 36).

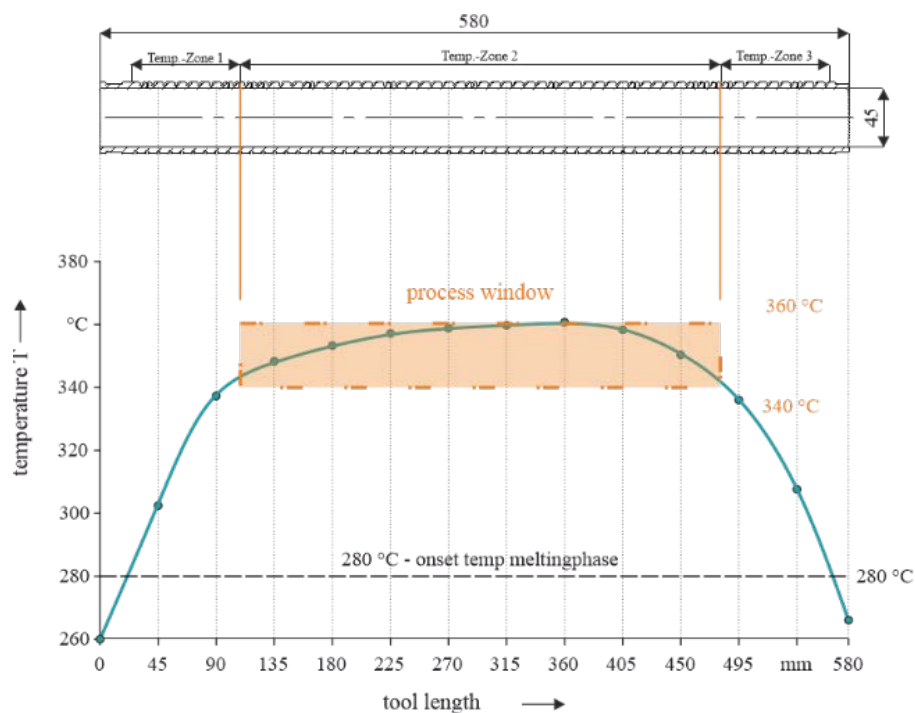


Abbildung 36: Gemessene Temperaturverteilung entlang des Konsolidierwerkzeuges [Gar22]

Aufgrund der unterschiedlich regelbaren Zonen entlang der Länge des Konsolidierwerkzeuges kann die Prozesstemperatur in einem Bereich von ± 10 K eingestellt werden. Dadurch wird die FTV-Preform in einem definierten Bereich aufgeschmolzen und nicht überhitzt. Die Temperatur in den Außenbereichen des Werkzeuges liegt unterhalb des Schmelzbereiches des Polymers und damit besitzt das Hohlprofil eine strukturelle Integrität. Aus diesem Grund kann durch die Zentrierung des Rohres in diesem Bereich die Konzentrität der einzelnen konsolidierten Segmente des Hohlprofils im semi-kontinuierlichen Fertigungsprozess sichergestellt werden.

Abzugseinheit

In Vorversuchen wurden am TUD-ILK die Auszugskräfte des Laminates aus dem Formwerkzeug bei Raumtemperatur und 150°C ermittelt. Hierbei erfolgt die Konsolidierung des Laminates im Schlauchblasverfahren. Ein Aluminiumstempel wird mit einer Kette an einer Seilwinde befestigt und das Laminat so kraftgeregelt herausgezogen (siehe Abbildung 37).

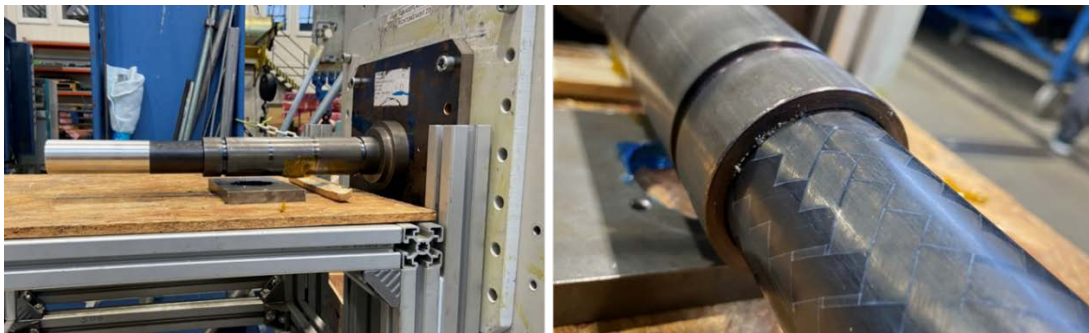


Abbildung 37: Auszugsversuche des konsolidierten CF/PAEK-Hohlprofils und Ermittlung der Abzugskräfte

Bei Raumtemperatur wurde eine Abzugskraft von 9,5 kN und bei 150°C von 2,8 kN des 200 mm langen Laminates ermittelt. Es ist zu empfehlen, dass der semi-kontinuierliche Prozess und nach Erreichen der Glasübergangstemperatur von $T_g = 150^{\circ}\text{C}$ während der Abkühlung beendet und damit die Konsolidierung des nächsten Bereiches des Hohlprofils gestartet wird, da eine weitere Abkühlung auf Raumtemperatur mit höheren Abzugskräften verbunden ist. Die Auslegung der Seilwinde erfolgt bei HERONE auf Basis der ermittelten Abzugskräfte. Am TUD-ILK wurde in Vorversuchen der erste Entwurf einer Abzugseinheit überprüft (siehe Abbildung 38). Hierbei wurde das Laminat 4 mittels Schlauchklemmen auf einem Stahlzylinder befestigt und die Abzugskraft, bei welcher es zum Rutschen des Abzugsadapters kommt, gemessen. Trotz iterativem Steigern des Anzugsmomentes von drei Schlauchklemmen und Anrauen des Stahlzylinders betrug die maximale Abzugskraft 2 kN. Hieraus wurde abgeleitet, dass ein Formschluss über eine Nut in der Abzugseinheit vorteilhaft für eine sichere Fixierung ist, um die

benötigten Abzugskräfte des Laminates im einteiligen Formwerkzeug zu erreichen. HERONE führte auf Basis dieser Erkenntnisse die Entwicklung der Abzugseinheit fort.



Abbildung 38: Zugversuche an der Abzugseinheit des CBM-Prozesses

6.3.3 CBM-Konzeptvalidierung für PEEK

HERONE arbeitet in enger Abstimmung mit dem TUD-ILK zur Konzeptvalidierung des CBM-Prozesses für die Herstellung von CF/PAEK Hohlprofilen. Zunächst erfolgte der Aufbau des CBM-Prozesses am TUD-ILK unter Nutzung verfügbarer Handlingsysteme. Anschließend unterstützte das TUD-ILK HERONE in der Montage der prototypischen Handhabungstechnik und Abstimmung der Prozessstrecke sowie der Prüfung der Grundfunktionen und Erfassung des Temperierverhaltens des Werkzeuges. HERONE führte daraufhin umfangreiche Parameterstudien zur Validierung des CBM-Prozesses und Erfassung des Prozessfensters durch. Die im CBM-Prozess hergestellten CF/PAEK Hohlprofile wurden mittels Schliffbildern und Computertomographie untersucht. Der variotherme Prozess ermöglicht die Herstellung von CF/PAEK-Hohlprofilen mit nahezu porenfrei in sehr guter Qualität. Mit der CBM-Anlage wurde eine Profillänge von 1800 mm erzielt.

6.4 Spritzform-Funktionalisierung

6.4.1 Detailkonzeption Spritzform-Prozess

Technologische Herausforderungen

Aus der erarbeiteten Demonstrator Struktur ergeben sich aus spritztechnologischer Sicht mehrere Herausforderungen. Dazu gehört insbesondere die Funktionalisierung im Spritzform-Prozess mit integrierter Umformung des anzuspritzenden FTV-Hohlprofil. Jedoch existieren in

der Demonstrator Struktur weitere wesentliche Herausforderungen, dazu gehören insbesondere:

- die technische Notwendigkeit der Abdichtung der FTV-Struktur gegen das Werkzeug,
- das Innen-Anspritzen des HP bei stark beschränktem Bauraum und die Notwendigkeit der Verwendung eines Einfallkerns, sowie
- daraus resultierend eingeschränkte Gestaltungsmöglichkeiten der Funktionsstruktur hinsichtlich Länge und Hinterschnittausformung.

Die Detaillierung der Spritzform-Funktionalisierung wurde in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern und insbesondere iterativ mit der Konzeption des Bauteil-Demonstrators und der Technologielevel (TL) bearbeitet. So wurden in regelmäßigen gemeinsamen Workshops die TL sowohl seitens der Bauteil-Demonstratoren als auch seitens des zu entwickelnden Spritzform-Prozesses definiert. Dabei wurden relevante Prozessdetails identifiziert, die im Rahmen des Arbeitspaketes ausgearbeitet wurden. Die Spezifikationen werden dabei grob in konstante und TL-abhängige Details unterschieden. Letztgenannte betreffen dabei die Schwerpunkte des HAP und werden durch die Aufteilung in die TL in kleine, weniger komplexe Teilschritte zerlegt. Die TL bieten die Möglichkeit, für die jeweiligen Prozessdetails experimentelle Untersuchungen bzw. Studien zur Reduzierung des technischen Risikos durchzuführen. In Abbildung 39 sind die identifizierten Prozessdetails sowie ihre Weiterentwicklung in Abhängigkeit der TL dargestellt.

	TL 1	TL 2
Ziel	Innen Anspritzen	Spritzformen
Prozessführung (PF)	kalt / heiß	heiß
Dichtung	Heiß / kalt	
Kern	Faltkern	
Wechseleinsatz	Kavität 1	Kavität 2
Stammform WZ	Backenwerkzeug, Wechseleinsätze (Backen) vertikal feststehender (Falt-)Kern	
Anguss	Ringanguss	
Handling	Roboter	
Temperierung HP	IR-Heizstation, ggfs. lokale Kühlung	

Abbildung 39: Prozessdetails und ihre Entwicklungsstufen in Abhängigkeit der Technologielevel

Die prozesseitigen Ziele für **TL 1** lagen vor allem in der Inbetriebnahme des Spritzprozesses mit der Herausforderung des *Innen-Anspritzens* von Hohlprofilen. Des Weiteren umfasste das Einfahren des Prozesses die Einstellung der notwendigen Nachbearbeitungsschritte am Werkzeug, um die Toleranzen an beiden Dichtbereichen zu optimieren (Einfallkern - HP, innerer Dichtbereich und Werkzeugkavität -HP, äußerer Dichtbereich). Zusätzlich erfolgte die Inbetriebnahme des Handlings der HP zwischen externer Heizstation und Werkzeug.

Vor der Umsetzung des **TL 2** wurden bereits alle offenen Punkte zum *Innen-Anspritzen* von FTV-HP geklärt. Mithilfe einer neuen Wechselform und einer angepassten Prozessführung wurden die FTV-HP hier erstmalig mithilfe des Spritzmassestrahls lokal umgeformt bzw. lokal aufgeweitet. Es wurden Versuchspläne ausgearbeitet mit denen die Einflüsse der Prozessparameter auf die Umformung als auch die Festigkeit der Verbindungszone identifiziert werden konnten. Auch in diesem TL entstehen Probekörper, die für vergleichende Untersuchungen mit Probekörpern der anderen TL verwendet werden konnten.

Prozessführung

Für die Umsetzung der definierten Ziele ist eine Anpassung der Prozessführung notwendig. Mit Prozessführung ist an dieser Stelle die Temperierung des Hohlprofils sowie die Einstellungen der Spritzparameter gemeint. So kann im Allgemeinen beim Spritzfunktionalisieren differenziert werden zwischen *one-shot*- („Heißanspritzen“) und *two-shot*- („Kaltanspritzen“) Verfahren. Am **TL 1** wurden zur Untersuchung der Dichtkonzepte beide Prozessführungen erprobt. Ab **TL 2** kommt nur noch die Temperierung der FTV-HP über Schmelztemperatur des Werkstoffes zur Realisierung der Umformbarkeit zum Einsatz (Heißanspritzen). Dazu mussten die Hohlprofile lokal temperiert bzw. aufgeschmolzen werden.

Dichtung

Die Herstellung des Bauteil-Demonstrators erfordert unabhängig der Umformmechaniken und Prozessführungen ein Abdichten zwischen dem anzuspritzenden Funktionselement und dem FTV-HP. Generell liegen ein äußerer und ein innerer Dichtbereich am Bauteil vor. Der äußere Dichtbereich wurde bei der Wahl und Einstellung passender Toleranzen zwischen Werkzeug und HP als unkritisch eingestuft. Der Fokus der Betrachtungen lag daher auf dem inneren Dichtbereich. Das Spritzwerkzeug bzw. der Einfallkern muss an dieser Stelle die Abdichtung gegen das FTV-Hohlprofil gegenüber dem hohen Einspritzdruck realisieren. Ein Überspritzen bzw. Durchlaufen der Spritzmasse kann an dieser Stelle nicht oder nur in geringem Maße toleriert werden. Die technische Herausforderung lag darin, dass im CBM-Verfahren hergestellte FTV-Hohlprofile innen keine ausreichend glatte Oberfläche aufweisen. Darüber hinaus sind Formabweichungen vom idealen Kreisquerschnitt möglich, die der Einfallkern nicht kompensieren kann. Entsprechende Anforderungen an den zu entwickelnden CBM-Prozess wurden abgeleitet. Zur Minimierung des technischen Risikos wurden daher zwei Dichtkonzepte für den inneren Dichtbereich erarbeitet, die am **TL 1** evaluiert wurden (siehe Abbildung 40).

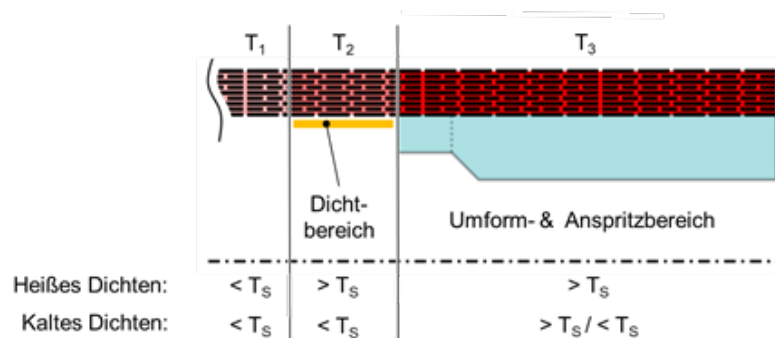


Abbildung 40: Lokale Temperierung des FKV-HP für die Dichtkonzepte heißes und kaltes Dichten mit Schmelztemperatur T_s

Bei dem Konzept der *heißen Dichtung* wird das FTV-HP zunächst extern lokal über die Schmelztemperatur T_s erhitzt. Der aufgeschmolzene Bereich umfasst dabei sowohl die anzuspritzende bzw. spritzzuformende Zone des HP als auch den Dichtbereich. Infolge des Aufschmelzens des Matrixmaterials wird dabei ein geringfügiges Aufbauschen bzw. Dekonsolidieren der FTV-Struktur erwartet. Dieses Aufbauschen wird im Konzept ausgenutzt, um die gewünschte Dichtwirkung zu erzielen, indem die aufgebauchte FTV-Struktur durch den expandierenden Einfallkern wieder auf den Soll-Durchmesser verpresst wird (siehe Abbildung 41).

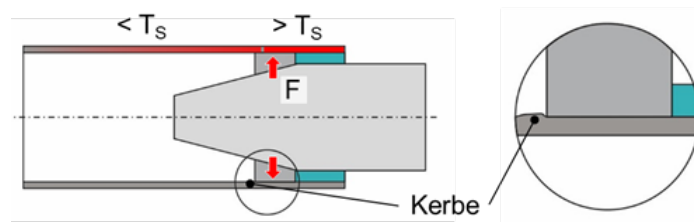


Abbildung 41: Konzept zum heißen Dichten, schematisch

Im Konzept der *kalten Dichtung* wird der Dichtbereich des FTV-HP nicht über T_s erwärmt, sondern, sofern für die Prozessführung erforderlich, lediglich der Anspritz-/Umformbereich. Die Dichtfläche des expandierenden Einfallkerns dichtet für die erste Iterationsstufe des Konzeptes nur durch *leichte Berührung* der Innenkontur des HP ab. Erwartet wurde, dass es hierbei zu geringfügigen Überspritzungen in lokalen Spalten zwischen Einfallkern und FTV-HP kommt, die aber aufgrund der Temperatur und abkühlenden Schmelze noch innerhalb des Dichtspaltes erstarren und somit die gewünschte Dichtwirkung erzielen (Abbildung 42).

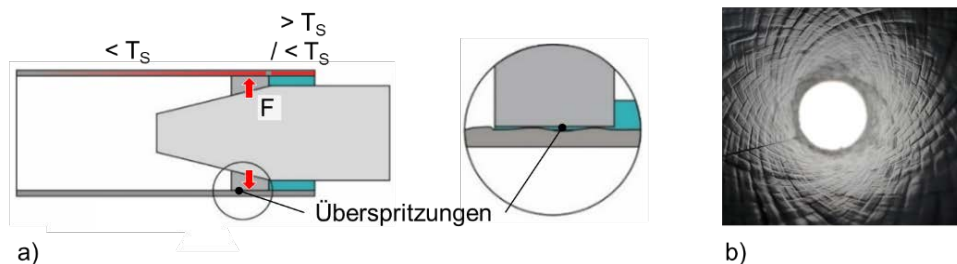


Abbildung 42: a) Konzept zum kalten Dichten, Iterationsstufe 1, schematisch, b) Blick auf die innere Oberfläche eines im Schlauchblasprozess konsolidierten FTV-HP aus Tape-geflochtenen thermoplastischen Preforms

Kern

Die erarbeitete Demonstrator-Struktur macht die Verwendung eines Einfallkerns notwendig. Aufgrund der Kinematik marktüblicher Lösungen sind Einfallkerne in Abhängigkeit des größten Kerndurchmessers D_K hinsichtlich der erreichbaren Hinterschnittentformbarkeit und umsetzbaren Gesamtlänge des Kerns L_K beschränkt. Üblicherweise können Hinterschnidungen von 12 bis 17 % entformt werden (hier bezogen auf Durchmesser Hohlprofil innen $D_K = D_{HPi}$). Die maximale Kernlänge wurde in Absprache mit der Firma WIEDEMANN für die vorliegende Spritzstruktur auf 50 mm beziffert. Zusammen mit den geometrischen Daten des zu funktionalisierenden FTV-HP und der Anforderung, die Lasteinleitung gemäß DIN ISO 14 zu gestalten, wurde mit den Projektpartnern ein CAD-Faltkernmodell erstellt, welches für die **TL 1** und **TL 2** verwendet werden kann.

Wechseleinsatz

Um ab **TL 2** die Umsetzung der Spritzform-Technologie umzusetzen, wurde ein Spritzgießwerkzeug mit auswechselbaren Formnestern vorgesehen und konzeptioniert. Somit kann der Fokus im **TL 1** auf die Dichtkonzepte gelegt, und das FTV-HP ohne Umformung durch Werkzeug oder Massestrahl, angespritzt werden. Die Kavität 1 liegt dafür an der Außenkontur des FTV-HP vollumfänglich an und erlaubt lediglich ein Füllen innerhalb des Hohlprofils ohne dessen Aufweitung. Ab **TL 2** kam die Kavität 2 zum Einsatz, welche die lokale Durchmesseraufweitung des FTV-HP im Bereich der anzuspritzenden LE erlaubt.

Stammform-Werkzeug

Die Verwendung eines Stammformwerkzeuges erlaubt den Einsatz mehrerer Wechseleinsätze bzw. Kavitäten und ist daher zur Umsetzung der drei TL ideal geeignet. Der grundlegende Aufbau des Werkzeugs ist weiterhin bestimmt durch folgende Punkte (siehe auch Abbildung 43) und wurde vom Projektpartner HPF entwickelt:

- Heißkanalangussystem
- Ausführung als Backenwerkzeug
- Drei Entformungsrichtungen und zwei Trennebenen
- Senkrechte Ausrichtung des Einfallkerns und des anzuspritzenden FTV-HP

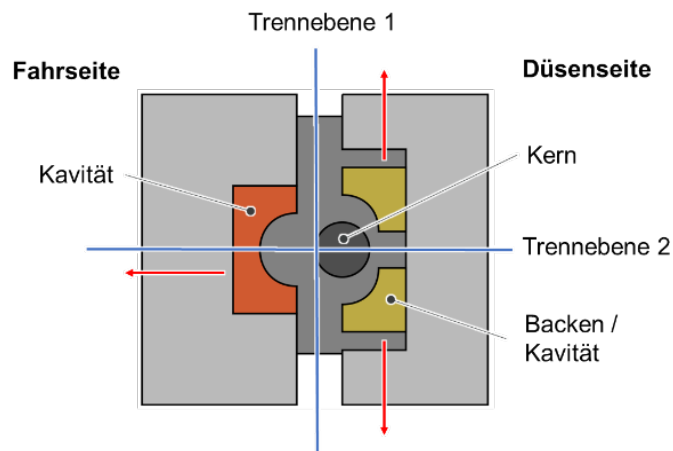


Abbildung 43: Stammform-Werkzeug in Draufsicht, schematisch mit Trennebenen und Entformungsrichtungen

Anguss

Bei der gewählten Demonstratorstruktur stellte die Angussstrategie eine der großen technischen Herausforderungen dar. Dies begründet sich durch die Lage der Spritzstruktur im Inneren des FTV-HP sowie durch den Wunsch, mithilfe des (gerichteten) heißen Massestrahls die FTV-Struktur umzuformen. Während der Konzeptionsphase wurden dafür zwei denkbare Ansätze zur Lage und Strategie des Angusssystems entwickelt.

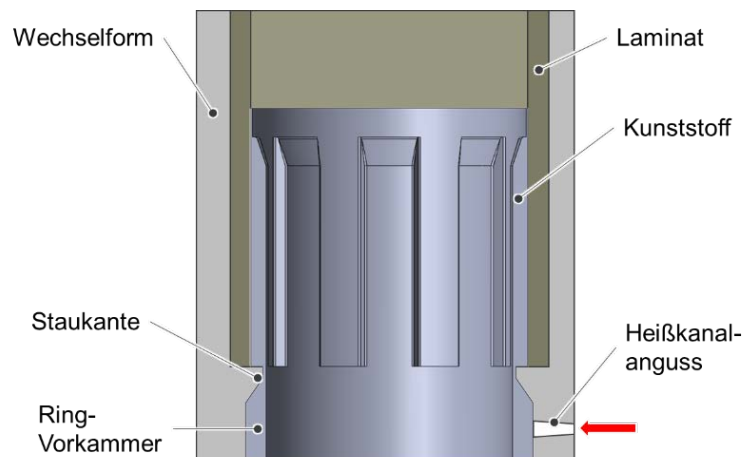


Abbildung 44: Darstellung des Ring-Filmangusses als Teilschnitt

Das erste Konzept sieht dabei ein Durchspritzen der FTV-Struktur vor. Die generelle Funktionalität des Durchspritzens von FTV-Strukturen wurde am TUD-ILK bereits nachgewiesen. Jedoch muss hierfür im Vorhinein ein Lage-definiertes Loch innerhalb der Struktur erzeugt

werden. Dies stellt eine strukturelle Schwächung des FTV dar und sollte am Demonstrator vermieden werden. Der Anguss wurde daher als ein Filmanschnitt mit Ringverteiler stirnseitig des Profils konzipiert, siehe auch Abbildung 44. Dies ist mit mehreren Vorteilen verbunden. Der Filmanschnitt mit Staukante und Richtungsgeber ermöglicht es, den Massestrahl in seiner Richtung zu lenken und den Impuls zum Umformen nach radial nach außen zu richten. Der Ringverteiler zum Filmanschnitt stellt die gleichmäßige Formfüllung sicher. Die Integration der Anschnittgeometrie in die Wechselkavität erlaubt Anpassungen oder Änderungen durch Nachbearbeitung/Nachfertigung der Kavität sowie ein „Mitwachsen“ bzw. Anpassen des Anschnitts an die TL.

Temperierung und Handling Hohlprofil

Die Spritzfunktionalisierung von FTV-Hohlstrukturen sowie der zu entwickelnde Spritzform-Prozess machte ein Aufheizen der FTV-Struktur vor dem Spritzprozess unumgänglich. Da aufgrund der Temperierung der FTV-Struktur über Schmelztemperatur hinaus dem FTV durch seine Erweichung seine strukturelle Integrität genommen wird, wurde bereits früh in der Konzeptionierungsphase die Entscheidung getroffen, dass das HP senkrecht erhitzt, ins Werkzeug transferiert und angespritzt wird. Die senkrechte Positionierung zielt darauf ab, ein Durchbiegen oder eine Querschnittsdeformation infolge des Erweichens der thermoplastischen Matrix zu vermeiden. Die Anordnung der externen Heizstation und des Werkzeugs wurde daher wie in Abbildung 45 gezeigt gewählt.

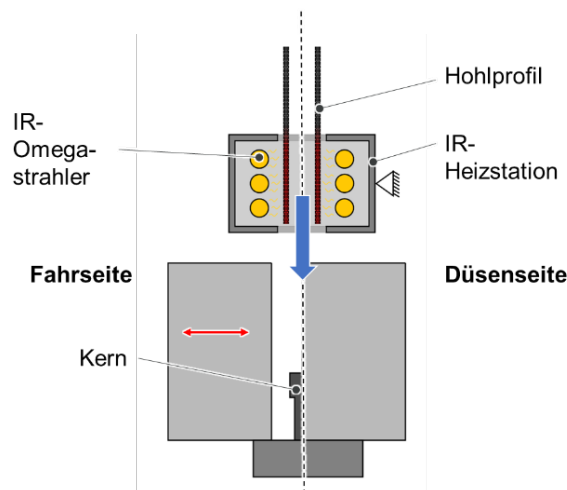


Abbildung 45: Konzept der externen Temperierung und Anordnung innerhalb des Prozesses

6.4.2 Entwicklung & Fertigung Spritzform-Werkzeug

Aufbauend auf der Detailkonzeptionierung wurden anschließend Formfüllsimulationen durchgeführt, um das Spritzwerkzeugkonzept zu validieren und HPF im Entwicklungs- und

Konstruktionsprozess zu unterstützen. Das hergestellte und am TUD-ILK auf Prozesstemperatur gemusterte Spritzformwerkzeug ist in Abbildung 46 dargestellt.

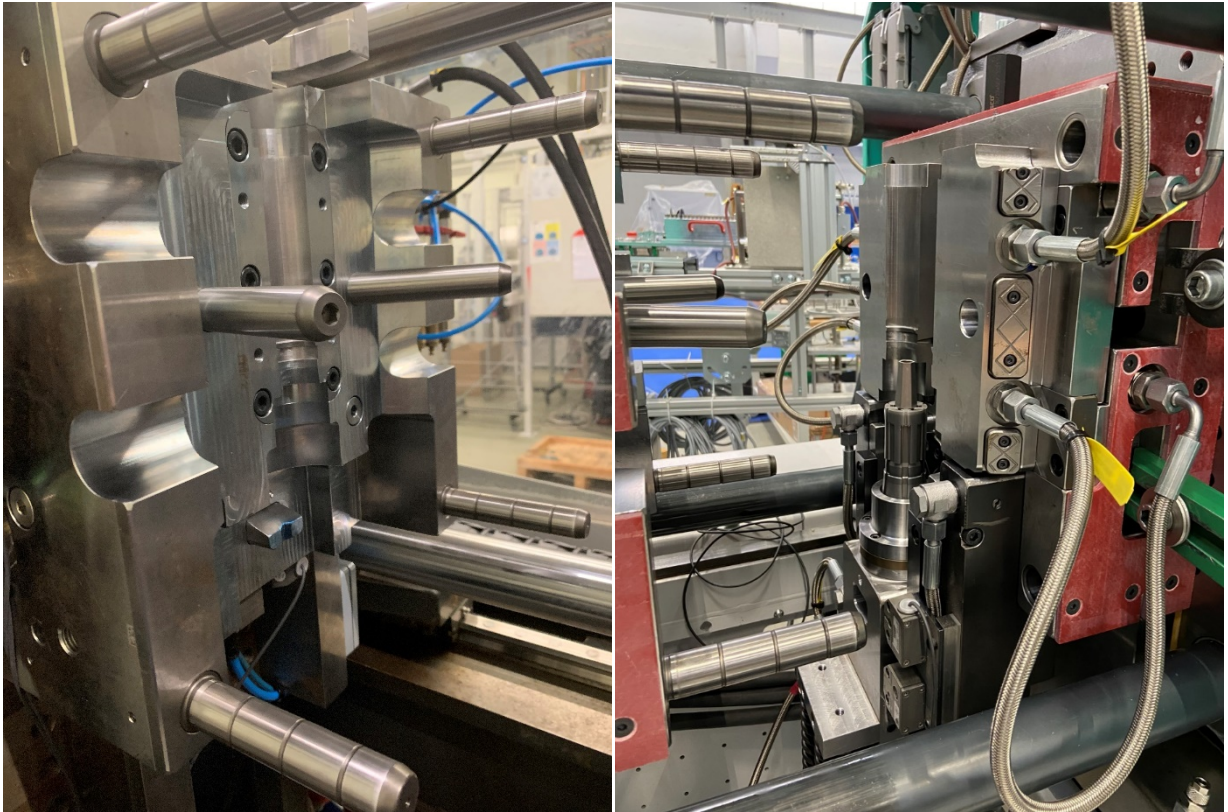


Abbildung 46: Von HPF entwickeltes Spritzformwerkzeug zur Funktionalisierung von thermoplastischen Hohlprofilen

In enger Zusammenarbeit mit dem Partner HPF wurde auch das Temperier- und Handlingkonzept weiter ausgearbeitet sowie am TUD-ILK mit dem Aufbau, Inbetriebnahme sowie ersten Versuchsreihen der entwickelten Heizstation begonnen. Die generelle Eignung der IR-Temperierung (von außen) zum Temperieren von FTV-Hohlprofilen im Spritzform-Verfahren wurde am TUD-ILK experimentell untersucht. In Abbildung 47 ist der Versuchsaufbau des Aufheizversuches eines CF/PEKK-HP mit zwei vorhandenen IR-Strahlern abgebildet. Das Hohlprofil wurde mit vier Thermoelementen innen und außen bestückt, um die Temperaturverteilung entlang der Länge und der Dicke des HP zu messen. Eine Stahl-Blende soll ermöglichen, dass ein hoher Temperaturgradient entlang der Länge eingestellt werden kann.

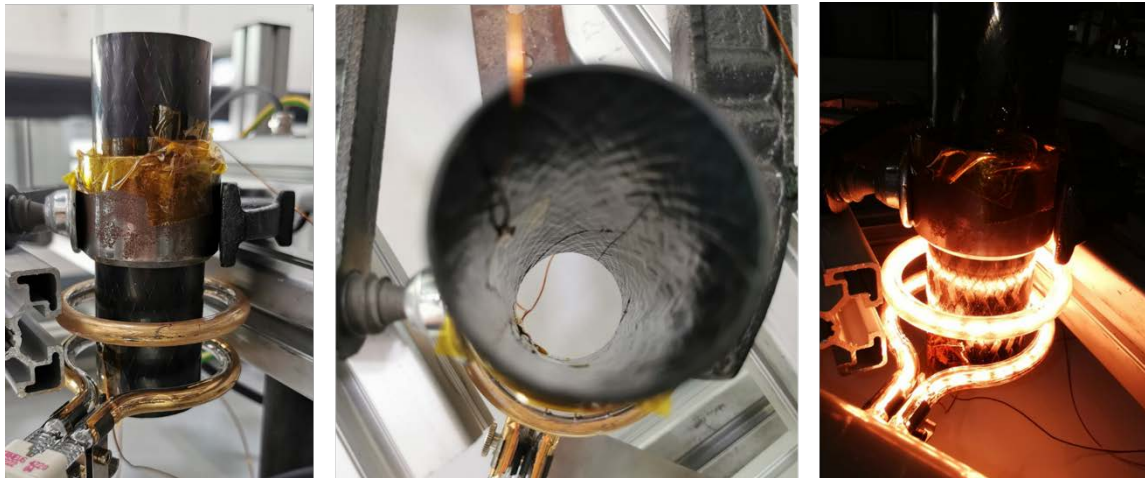


Abbildung 47: Versuchsaufbau der Aufheizvorversuche eines CF/PEKK Laminates

Die Ergebnisse des Aufheizverhaltens sind in Abbildung 51 als Temperatur-Zeit-Verlauf dargestellt. Das 1,3 mm dicke FTV-HP kann innerhalb von zwei Minuten auf Prozesstemperatur von 400 °C erwärmt werden. Durch die Erwärmung von außen wird auch die Außenseite des HP am schnellsten erwärmt.

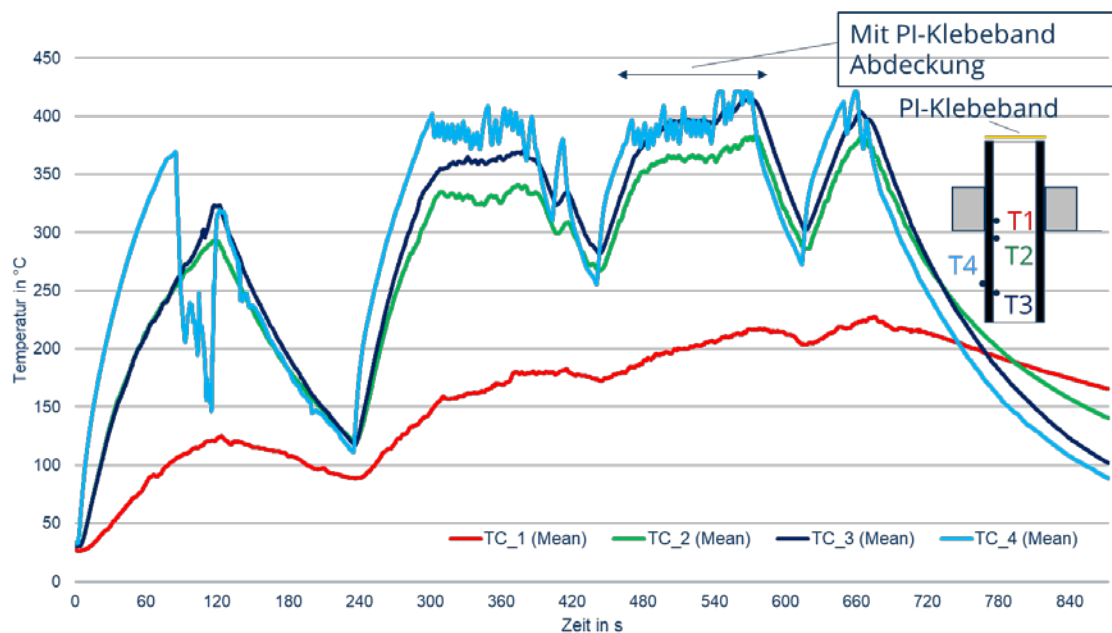


Abbildung 48: Aufheizkurven des CF/PEKK Laminates

Durch den Kamineffekt, welcher eine vertikal gerichtete Luftströmung im inneren des Hohlprofils erzeugt, erreicht die Innenseite des HP nicht die gewünschte Prozesstemperatur.

Der Effekt konnte durch das Verschließen der oben Stirnseite des HP verringert werden. Für den Aufbau des Infrarotofens des Spritzform-Prozesses wurde dieser Effekt berücksichtigt. Die Stahlblende ermöglicht den gewünschten axialen Temperaturgradienten von Thermoelement T1 zu T2. Dadurch kann im Prozess genau eingestellt werden, welcher Bereich des Hohlprofils aufgeschmolzen wird. Diese Maßnahme ist erforderlich, um das Hohlprofil außerhalb des Dichtbereichs vor einer Aufschmelzung zu schützen. Aufgrund der fehlenden Nachverpressung in diesem Bereich ist eine Reduktion der mechanischen Eigenschaften zu erwarten, die durch Dekonsolidierung verursacht wird. In CT Aufnahmen des im Vorversuch erwärmten CF/PEKK-HP konnten Erkenntnisse über das Dekonsolidierverhalten des FTV gewonnen werden. Es waren Poren im Laminat ersichtlich. Mit einer gemittelten Dicke im dekonsolidierten Bereich von 1,67 mm ist ein Dickenzuwachs gegenüber der Dicke des unerwärmten Bereiches von 1,35 mm von 24 % messbar. Dies hat Auswirkungen auf die Gestaltung des Faltkerns sowie des Spritzgießwerkzeuges und deren Toleranzen zum Hohlprofil. Weiterhin müssen diese Defekte im Spritzform-Prozess wieder eliminiert werden.

Die Erkenntnisse aus den Vorversuchen wurden in der Konzeptionierung und dem Aufbau des Infrarotofens berücksichtigt. In Abbildung 49 ist die Konstruktion und der Aufbau des Infrarotofens dargestellt. Um ein gleichmäßiges Aufheizverhalten mit mehreren IR-Strahlern zu erreichen, wurde von der Firma Optron ein Strahlerabstand zum Produkt D zu dem Abstand zwischen den Strahlern A im Verhältnis

$$D = 1,8 * A \quad (1)$$

empfohlen. Um die Anzahl an Omega-IR-Strahlern zu reduzieren, wurde die größte Version mit einem Innendurchmesser von 146 mm gewählt. Damit ergibt sich der Abstand D zum FTV-HP Außendurchmesser von 45 mm zu 50,5 mm und aus (1) folgt damit eine Anzahl von drei Omega-Strahlern mit einem Abstand A von 28,1 mm um eine Länge des FTV-HP von bis zu 70 mm zu erwärmen. Zusätzlich zu den drei Omega-Strahlern wurde ein Zwillingsrohrstrahler für das Erwärmen der Innenoberfläche des HP beschafft. Der Ofen ist mit einem Pyrometer zur Regelung der Temperatur ausgestattet und mit Stahlblechen verschlossen um konvektive Effekte zu reduzieren.

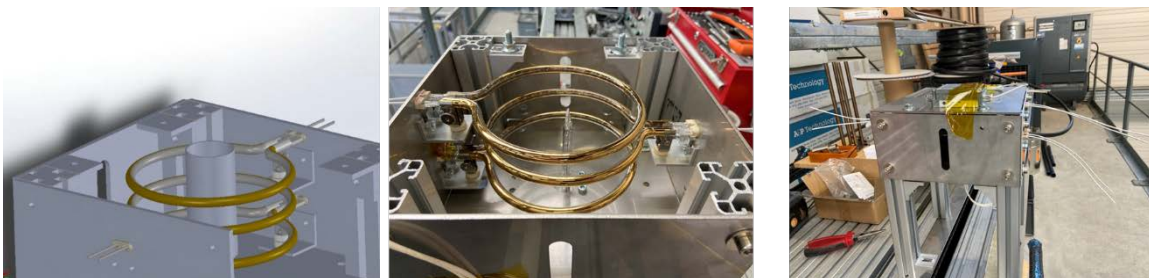


Abbildung 49: Konstruktion und Aufbau des Infrarotofens zur Temperierung des FTV-HP

Im Laufe des Projektes wurde sich gegen die Vergabe zur Entwicklung eines Automatisierungssystems entschieden, da das prototypische Handling des Spritzformprozesses an der Spritzgießmaschine des TUD-ILK mit eigenen Entwicklungen umsetzbar ist. In Abbildung 50 ist der Ablauf des Spritzform-Prozesses dargestellt. Die Bewegung des Hohlprofils kann hierbei von dem an der Spritzgießmaschine vorhandenen Handlingsystem MULTILIFT umgesetzt werden.

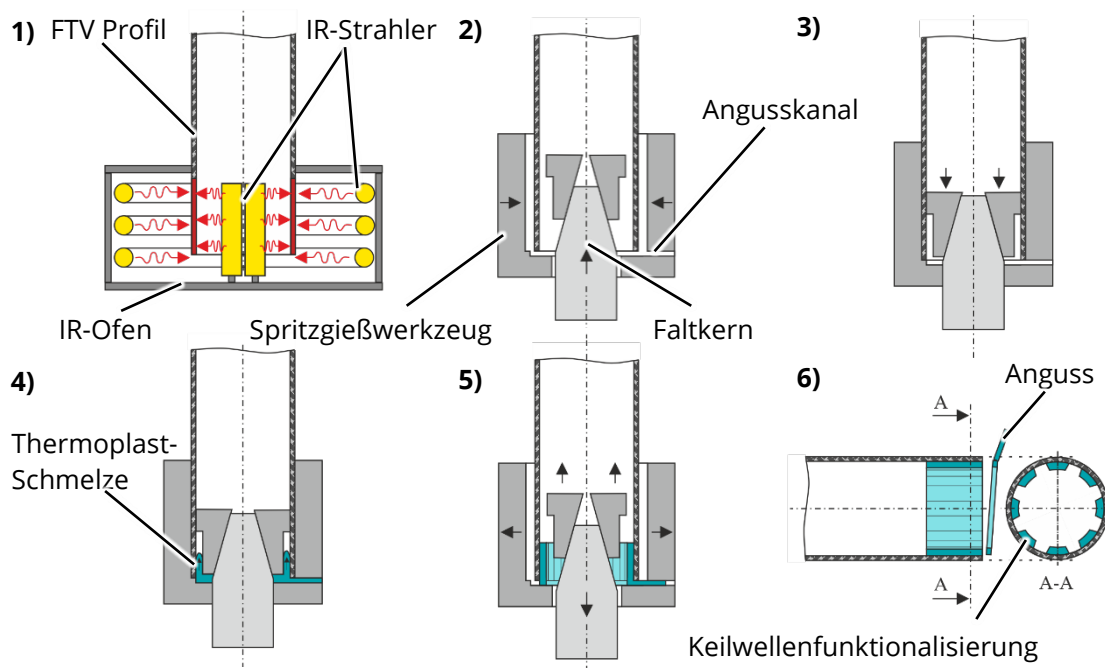


Abbildung 50: Ablauf des Spritzformprozesses

Um den Fertigungsaufwand für die Prozessentwicklung zu reduzieren, wurde sich in Absprache mit HERONE für eine Probekörperlänge des FTV-HP von 150 mm entschieden. Dieser Probekörper wird durch einen Stahladapter und ein Aluminiumrohr für das Handlingsystem verlängert. Mit Unterstützung der Firma SCHUNK wurde ein Greifersystem JG-P-100-1-AS als geeignet für die Werkstückmasse und die Beschleunigungen des MULTILIFTS identifiziert. Eigens gefertigte Greiferfinger greifen das FTV-HP und heben es aus der Ausgangsposition. Der MULTILIFT transferiert das HP zum Infrarotofen, in welchem der FTV über den Schmelzbereich des Polymers erwärmt wird. Anschließend wird das FTV-HP in das Spritzgießwerkzeug positioniert. Nachdem die Kavität geschlossen ist, wird das Rohr im Spritzgießwerkzeug gehalten und nach dem Spritzprozess entnommen.

Bei der Inbetriebnahme des IR-Ofens wurde die Temperaturverteilung im thermoplastischen HP gemessen und die Einstellungen der Regelung angepasst, um geringe Abweichungen der Temperaturen im Hohlprofil zu erreichen (siehe Abbildung 51).

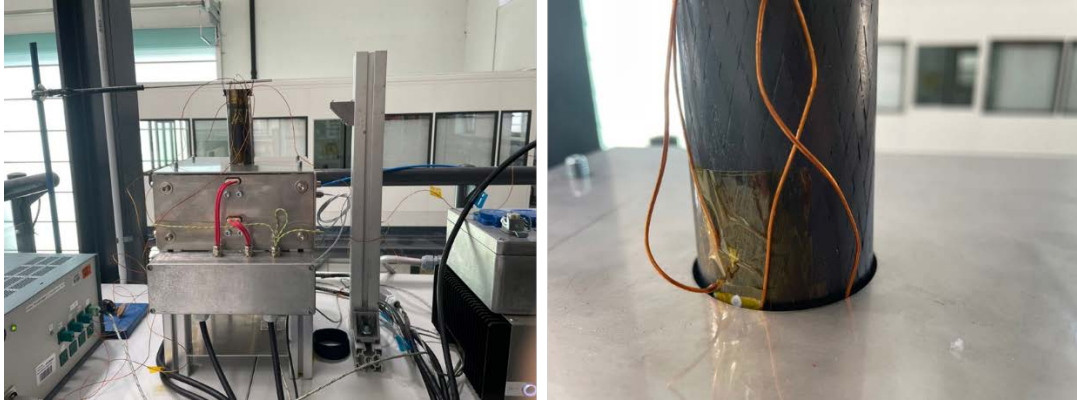


Abbildung 51: Versuchsaufbau der Aufwärmversuche im IR-Ofen (links) und Nahaufnahme der Blende und des Hohlprofils (rechts)

Die Leistung der Infrarotstrahler wurde im THERMONOM Steuergerät über zwei Pyrometer temperaturgeregelt eingestellt. Hierbei wurde die maximale Nennleistung der einzelnen Strahler iterativ angepasst, damit der Wärmestau am Deckel des IR-Ofens kompensiert werden kann. Die Ergebnisse des Aufheizversuchs sind in Abbildung 52 als Temperatur-Zeit-Verlauf dargestellt. Das 2 mm dicke FTV-HP kann innerhalb von 30 s auf Prozesstemperatur von 390 °C erwärmt werden. Durch die drei äußeren Omega-Strahler und den Zwillingssstrahler im FTV-HP wurde eine homogene Temperaturverteilung von ± 10 °C erreicht. Der Deckel ist in der Lage die Infrarotstrahlung und damit die Erwärmung des Hohlprofils außerhalb des IR-Ofens deutlich zu reduzieren. Dadurch kann eine hohe Temperaturdifferenz entlang einer Länge von 20 mm des Rohres eingestellt werden. TC1 erreichte nach 210 s lediglich ca. 220 °C. Damit konnte gewährleistet werden, dass ausschließlich der zu überspritzende Bereich des Hohlprofils im Spritzformprozess aufgeschmolzen und durch den Einfallkern und die Spritzgießmasse wieder verpresst wird. Eine Dekonsolidierung des freien Rohrbereiches wurde vermieden.

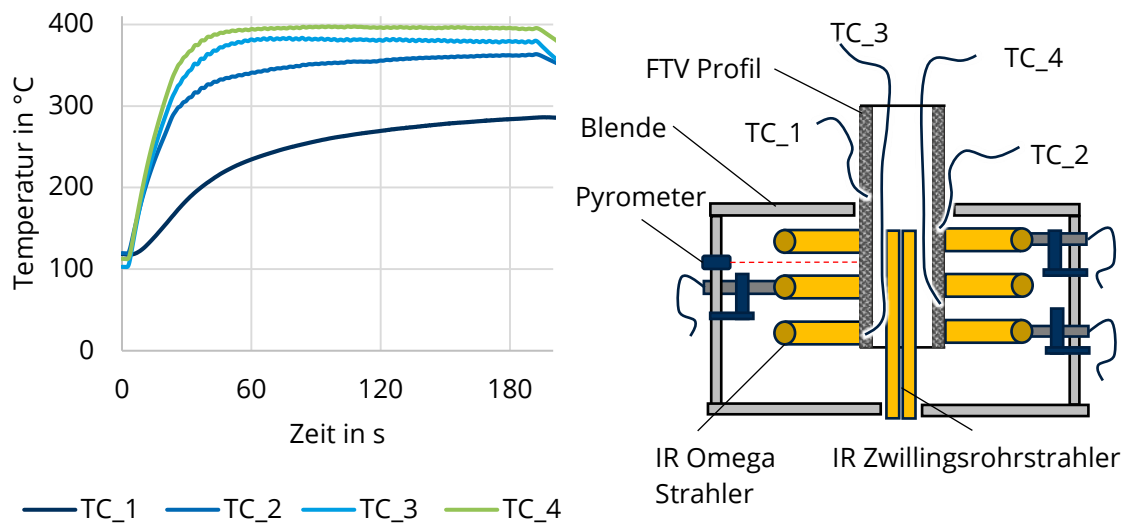


Abbildung 52: Temperaturverteilung im CF/PAEK Hohlprofil während des Erwärmens im IR-Ofen

Den Einfluss der Vortrocknung auf das Dekonsolidierungsverhalten zeigt Abbildung 53. Ohne Vortrocknung weitet sich das CF/PAEK-Laminat vor allem zum freien Ende hin auf. Dies ist durch das Lösen von Eigenspannungen und das Entweichen von Restfeuchtigkeit im Laminat zu erklären. Eine Hochtemperaturtrocknung bei 250°C für drei Stunden konnte diese Effekte deutlich reduzieren.

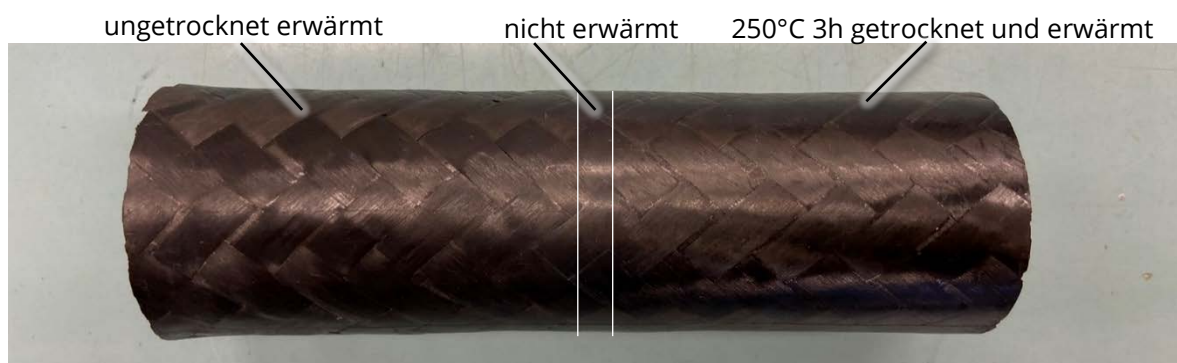


Abbildung 53: Einfluss der Vortrocknung auf das Dekonsolidierungsverhalten des CF/PAEK Laminates nach der Erwärmung im IR-Ofen

6.4.3 Spritzform Konzeptvalidierung

Das Ziel der Spritzform Konzeptvalidierung lag im Aufbau und Inbetriebnahme des Spritzform-Prozesses am TUD-ILK gemeinsam mit HPF zur Befähigung von HPF zur eigenständigen

Umsetzung des finalen Demonstrators sowie der Validierung des Spritzformverfahrens für PEEK. In Abbildung 54 ist der experimentelle Aufbau des Spritzformprozesses an der Spritzgießanlage ARBURG Allrounder 370H dargestellt. Die Maschine verfügt über ein modulares lineares Robot-System (MULTILIFT) für Entnahme-Aufgaben und kann in drei Achsen bewegt werden.

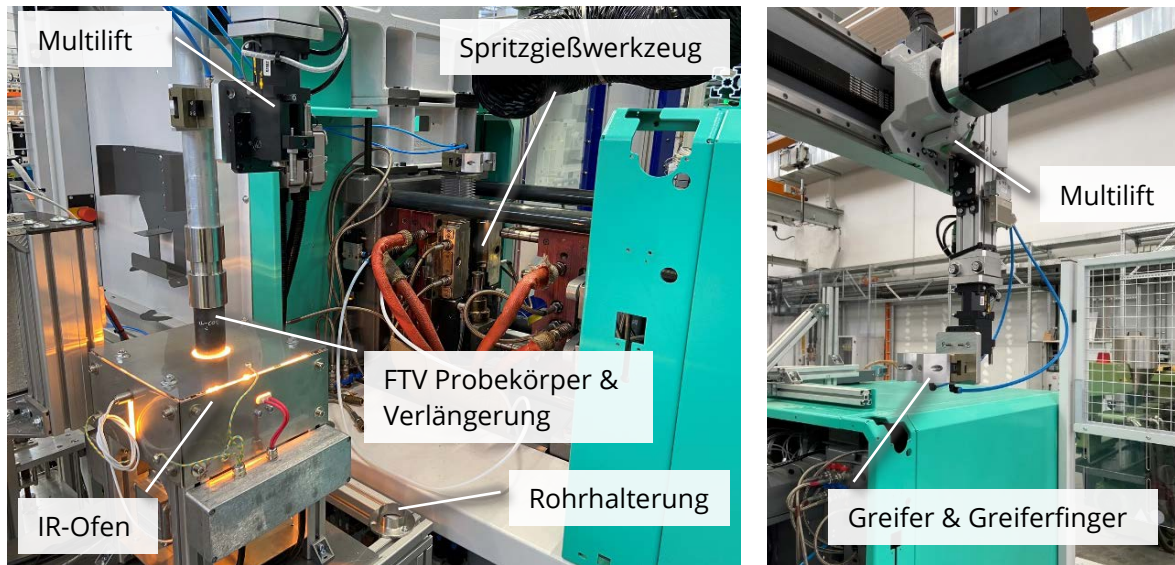


Abbildung 54: Experimenteller Aufbau des Spritzformprozesses an der ARBURG Allrounder 370H

Das Spritzgießwerkzeug und das Handlingsystem wurden am TUD-ILK in Betrieb genommen. Die Inbetriebnahme erfolgte gemäß Konzeption zunächst mit der TL 1 Kavität, da diese durch die verminderte technische Komplexität gezieltere erste Untersuchungen ermöglicht. Dies ist insbesondere auf die noch nicht stattfindende Aufweitung des Hohlprofils zurückzuführen. Zudem können dadurch die erforderlichen Dichtungen zwischen Einfallkern und Hohlprofil sowie die lokale Temperierung untersucht werden. Zum Anfahren des Prozesses und Betriebspunktfindung wurden darüber hinaus Aluminiumrohre statt FTV-HP angespritzt, um den Bedarf an FTV-Probekörpern zu reduzieren. Erste Studien zur Formfüllung und Einstellung der maschinenseitigen Parameter wie Spritzgeschwindigkeit, Umschaltpunkt, Nachdrucksteuerung und Parameter der Aufdosierung konnten so bereits vorangepasst werden.

HPF hat zur Ausrichtung des anzuspritzenden Rohres und zur Aufnahme von axialen Kräften im Spritzprozess eine Gabel vorgesehen, welche in eine Nut des Adapterrohres bei der Schließbewegung greift. Hierbei kam es teilweise zu Kollisionen und Verklemmen im Schließvorgang des Werkzeuges aufgrund von engen Toleranzen und unzureichend genauer Positionierung über den Multilift. Das Handlingsystem wurde daraufhin um einen zweiten Greifer erweitert, welche auf der Angussseite des Werkzeuges montiert ist (siehe Abbildung 55).

Der zweite Greifer ist mit den Greiferfingern so ausgerichtet, dass das Rohr bei der Übergabe von Greifer zu Greifer direkt konzentrisch über der Kavität des Spritzwerkzeuges ausgerichtet wird. Das Handling wurde durch diese Anpassung vereinfacht, die Ausrichtung des HP verbessert und die Transferzeiten konnten dadurch weiter reduziert werden.

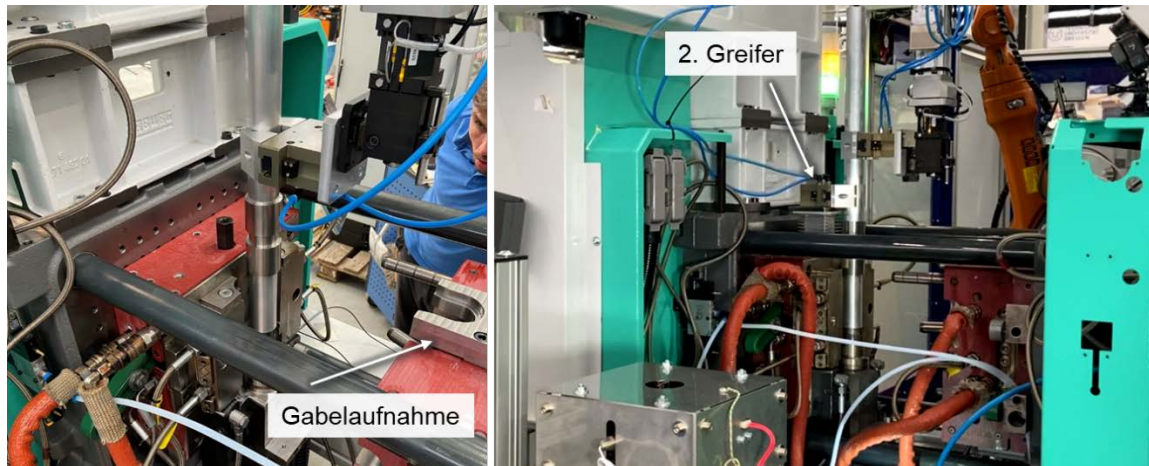


Abbildung 55: Erste Umsetzung des Handlingsystems aus Greifer und Gabelaufnahme am Spritzgießwerkzeug (links) und die Überarbeitung mit zwei Greifern (rechts)

Spritzgießversuche TL1

Nach der Voreinstellung der Prozessparameter mithilfe der Aluminiumrohre sowie der Anpassung des Handlingsystems konnten erste Spritzgießversuchsserien zum TL 1 an FTV-HP durchgeführt werden (Tabelle 6). Innerhalb des Berichtszeitraums wurden mehrere Versuchsserien durchgeführt. Hierfür wurde seitens der Prozessführung mit kalten FTV-HP begonnen (entspricht einer Vorheiztemperatur der FTV Hohlprofile unterhalb der Schmelztemperatur). Hierbei besitzt das HP im Gegenzug zur heißen Prozessführung (Vorheiztemperatur oberhalb Schmelztemperatur) noch eine strukturelle Integrität. Die Vorheiztemperaturen wurden dabei variiert und in Serie 02 gegenüber der Serie 01 deutlich angehoben, nachdem hier teils keine stoffschlüssige Interfaceverbindung erreicht werden konnte. Ab Serie 02 wurde auch die heiße Prozessführung umgesetzt und erstmalig aufgeschmolzene FTV-HP angespritzt. Bezüglich der Prozessstabilität besteht hierbei in der Herausforderung, dass es durch die fehlende Strukturintegrität des HP beim Schließen des Werkzeugs sowie beim folgenden Aufspreizen des Einfallkerns zum Einklemmen des HP kommen kann. Durch die Anpassung des Handlings konnten derartige Probleme jedoch in den Versuchsserien vermieden werden und der Prozess im teilautomatisierten Betrieb erfolgen. Damit konnte das TL 1 zum Innen-Anspritzen von FTV-HP erfolgreich hinsichtlich der grundsätzlichen Funktionalität und Prozessstabilität validiert werden.

Tabelle 6: Übersicht der durchgeführten Versuchsserien zur Spritzform-Konzeptvalidierung sowie variierte Parameter

Serie	Parameter-konfiguration	Prozess-führung	Vorwärm-temperatur [°C]	Aufheiz-länge [mm]	Technologie-Level
01	Config 1	kalt	230	70	TL1
02	Config 2	kalt	270	70	TL1
	Config 3	kalt	300	70	TL1
	Config 4	heiß	390	70	TL1
03	Config 5	heiß	390	45	TL1
	Config 6	heiß	390	45	TL2
	Config 7	heiß	390	45	TL1

Für die Versuchsserien 01 – 03 wurde mit den vorangepassten Prozess- und Maschinenparametern aus der TL 1 Inbetriebnahme mit Aluminiumprofilen begonnen. Abbildung 56 zeigt erste Demonstratoren der Versuchsserie 02 und 03.



Abbildung 56: Funktionalisierte TL1-Demonstrator CF/PAEK Hohlprofile

Aufbauend auf diesen Ergebnissen erfolgte die Umsetzung des Spitzformverfahrens am TL 2. Abbildung 57 zeigt ein im Spritzformverfahren hergestelltes CF/PAEK Hohlprofil. Es konnte erstmals erfolgreich eine Aufweitung des thermoplastischen Hohlprofils durch den Innendruck der eingespritzten Formmasse umgesetzt werden. In der Sichtprüfung zeigte sich, dass eine Scherdeformation des Tape-Geflechts die Aufweitung des Hohlprofils ermöglicht. Die Konturen der Werkzeugkavität konnte vollständig abgeformt werden.



Abbildung 57: Im Spritzform-Verfahren aufgeweitetes und funktionalisiertes CF/PAEK Hohlprofil

6.4.4 Aufbau & Inbetriebnahme Spritzform-Prozess

Im Rahmen des Vorhabens sollte der Aufbau und Teil-Automatisierung des Spritzformprozesses in seriennaher Umgebung bei HPF zum Nachweis der Zielproduktionsparameter erfolgen. Abbildung 58 zeigt den experimentellen Aufbau des Spritzform-Prozesses an einer DEMAG Extra 130-430 Spritzgießmaschine bei HPF.

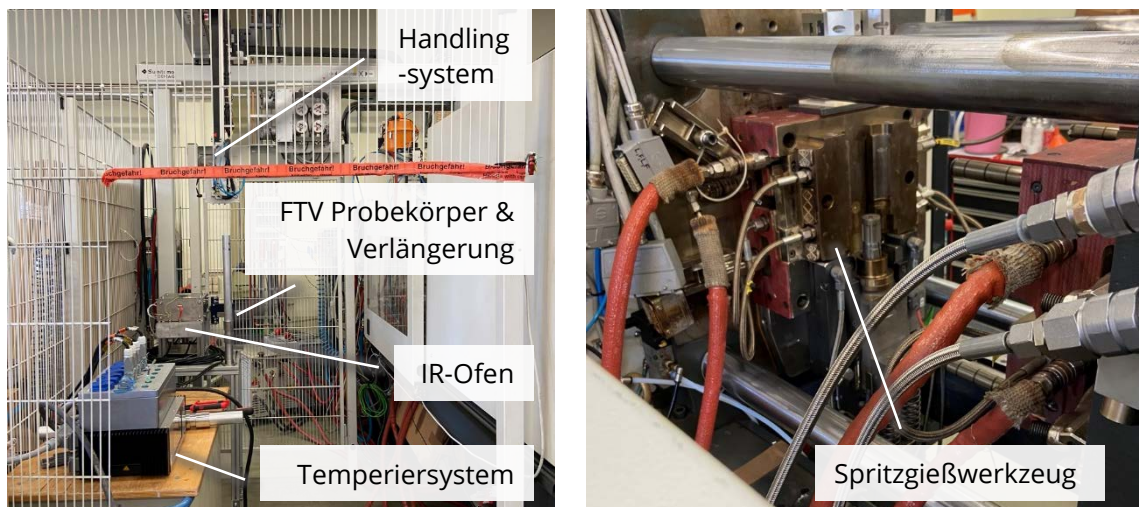


Abbildung 58: Experimenteller Aufbau des Spritzformprozesses an der DEMAG Extra 130-140 Spritzgießmaschine bei HPF

Hierbei unterstützte das TUD-ILK HPF vor Ort beim Aufbau des Fertigungsprozesses und bei der eigenständigen Umsetzung des Spritzformverfahrens. Zur Umsetzung stellte das TUD-ILK die entwickelte Temperiereinheit der Rohre inkl. der Steuergeräte und Öltemperierungen der Formwerkzeuge HPF zur Verfügung. Tabelle 7 gibt einen Überblick zu den hergestellten Probekörpern. Das TUD-ILK führte im Nachgang die zerstörende und zerstörungsfreie Prüfung durch. Es wurden weitere Versuche am TL 1 durchgeführt und der Einfluss der Laminatdicke

sowie zusätzlicher PAEK-Polymerfolien im Interfacebereich untersucht. Alle Proben wurden mittels *heißer Prozessführung* (Vorheiztemperatur oberhalb Schmelztemperatur) und mit einer Aufheizlänge von 45 mm hergestellt.

Tabelle 7: Übersicht der durchgeführten Versuchsserien zur Spritzform-Konzeptvalidierung sowie variierte Parameter bei HPF

Serie	Parameter-konfiguration	Prozess-führung	Vorwärm-temperatur [°C]	Aufheiz-länge [mm]	Techno-logie-Level	Notizen
04	Config 8	heiß	390	45	TL1	Torsionsproben
	Config 9	heiß	390	45	TL2	Torsionsproben
	Config 10	heiß	390	45	TL1	Aufdickung Laminat
	Config 11	heiß	390	45	TL1	PAEK-Interface-Folie

6.5 Charakterisierung & Validierung

6.5.1 Experimentelle Charakterisierung CBM-Profile

Um die Leistungsfähigkeit der im CBM-Verfahren hergestellten Hohlprofile zu quantifizieren erfolgte im InPro Vorhaben die strukturmechanische Charakterisierung nach definierten anwendungsnahen Belastungen. Die Belastungen, welche die Demonstratorwelle wirken wurden im Lastenheft definiert. Maßgeblich für die Eignung der im CBM-Verfahren hergestellten Hohlprofile sind Torsionsfestigkeit und Torsionssteifigkeit der Rohre, da diese die Auslegung des Laminats für den Einsatz als Welle dominieren. Zur Ermittlung dieser mechanischen Kennwerte wurden am TUD-ILK quasistatische Torsionsprüfungen an den von HERONE geflochtenen und im CBM-Verfahren konsolidierten Rohren durchgeführt. Hierbei wurden die 250 mm langen Rohrprobekörper mit dem im HAP 1 definierten Laminataufbau $[\pm 45^\circ_4 | 0^\circ | \pm 45^\circ_4]$ an einer Instron TT 8800 Prüfmaschine in speziell dafür gefertigte Keilspannbacken eingespannt (Abbildung 59). Ein Spannkern stützt das Rohr gegen den Klemmdruck von außen ab. Im Klemmbereich ist das Laminat um zusätzlich drei Geflechtlagen $\pm 45^\circ_3$ aufgedickt um einen frühzeitigen Bruch aufgrund von Spannungsspitzen durch die

Einspannung zu vermeiden. Die Dehnung der Rohre wurde mit dem optischen Messsystem ARAMIS SRX aufgenommen.

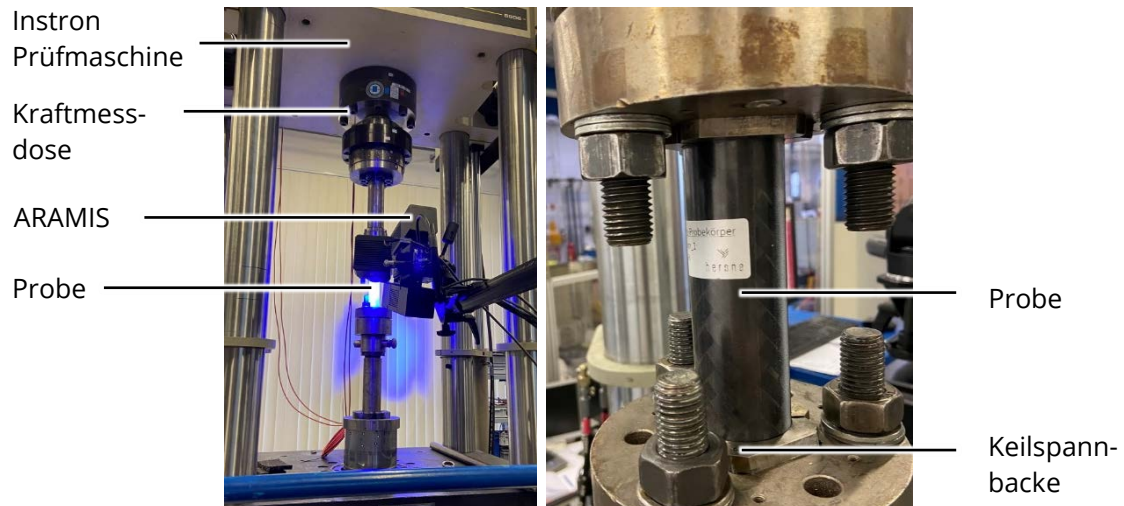


Abbildung 59: Quasistatische Torsionsprüfung zur Ermittlung der Torsionsfestigkeit und Torsionssteifigkeit

Die Berechnung der Dehnung ist in Abbildung 60 exemplarisch für einen Probekörper dargestellt. An der Probe wird in einem Abstand von 80 mm ein Bereich unten und ein Bereich oben an der Probe definiert, in welchen die Verdrehung ermittelt wird.

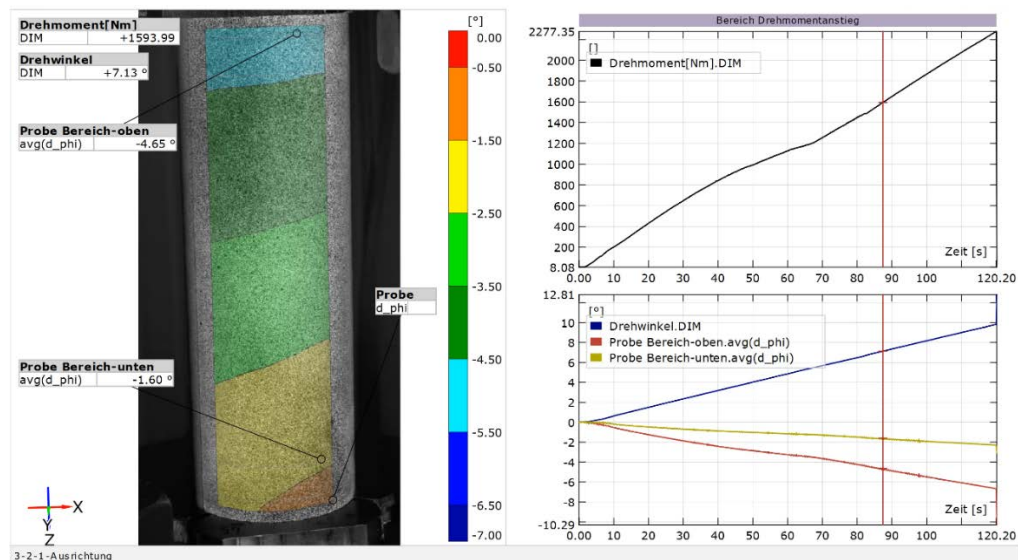


Abbildung 60: Auswertung der Dehnungsmessung in der GOM Software des ARAMIS Messsystems

Da die Lasteinleitung unten an der Probe erfolgt und der obere Bereich fixiert ist, ergibt sich ein Unterschied in der Verdrehung dieser Bereiche. Diese Differenz wird als Drehwinkel ausgewertet um die Steifigkeit des Rohrs zu bestimmen. Die Bruchbilder der Rohrprobekörper geben Aufschluss über den Ort des initialen Versagens und dienen zur Bewertung der Validität der Messung (Abbildung 61). Die Bruchbilder aller Rohrproben ähneln sich und sind charakterisiert durch einen Ort mit hoher Verformung und hoher Bruchdichte, in welchem das initiale Versagen des Laminates vermutet wird. Der initiale Bruch kann durch eine lokale Spannungsüberhöhung, durch einen lokalen Defekt oder eine lokale Unstetigkeit im Faserverlauf verursacht werden. Nach dem initialen Bruch erfolgt ein Risswachstum aufgrund von Schubversagen im Laminat entlang der Faserrichtung meist bis zum Klemmbereich der Probe.



Abbildung 61: Bruchbilder der quasistatisch auf Torsion bis zum Bruch geprüften Rohrprobekörper

Die Probekörper InPro_Torsion_2 und InPro_Torsion_4 zeigen einen vermutlich initialen Bruch nach der Einspannung. Die restlichen Proben zeigen die höchste Bruchverformung im freien Rohrbereich. Die Ergebnisse der Torsionsprüfung sind in Abbildung 62 dargestellt. Die Drehmoment-Drehwinkel-Verläufe der Rohrproben verlaufen linear bis zum Bruch. Bei allen Proben ist jedoch eine Unstetigkeit im Verlauf im Bereich von 1000 Nm zu erkennen. Zwei der fünf Probekörper (InPro_Torsion_1 und InPro_Torsion_5) versagten im Bereich von 2200 Nm im Vergleich zu den anderen, welche über 2500 Nm Drehmoment übertragen konnten. Die Bruchbilder der Proben zeigen keine Auffälligkeiten und geben keinen Aufschluss darüber, warum die Proben eher versagten.

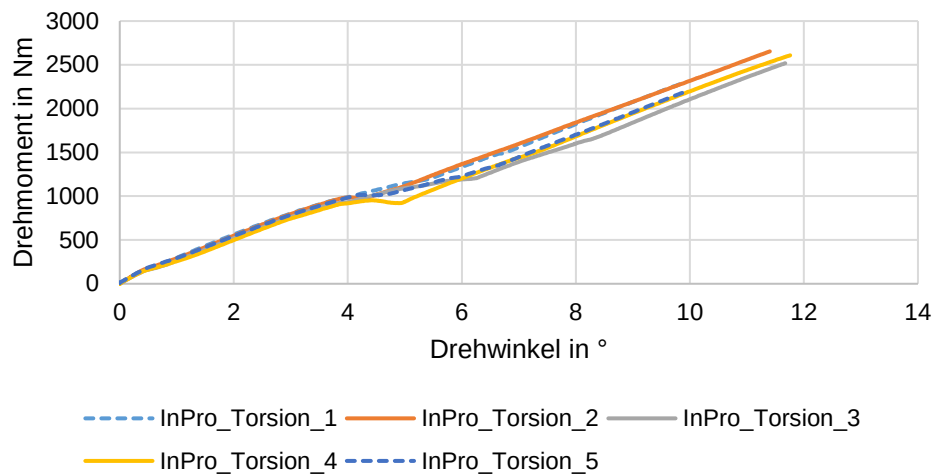


Abbildung 62: Ergebnis der Torsionsprüfung aufgetragen im Drehmoment über dem Drehwinkel der getesteten Rohrporben

Das maximale Drehmoment und die Torsionssteifigkeit liegen über den im HAP 1 definierten Werten. Die Untersuchung der Laminatqualität mittels Computertomographie und Schliffbildern wurde zusammen mit der Analyse der Spritzform-Funktionalisierung durchgeführt und ist im Abschnitt 6.5.2 dargestellt.

6.5.2 Experimentelle Validierung Spritzform-Prozesssimulation

Zum Ableiten von Prozessgestaltungshinweisen und zur Validierung der im Abschnitt 6.2.3 vorgestellten Spritzform-Prozesssimulation wurden von Fertigungsstudien zum Hohlprofil-Spritzformen in Zusammenarbeit mit HPF durchgeführt. Die Untersuchung der resultierenden Materialstruktur des konsolidierten FTV-HP und der überspritzten Funktionalisierung ist für die Bewertung der Prozessqualität unerlässlich. Zu diesem Zweck wurde CT eingesetzt, um die resultierenden Bauteilabmessungen und dreidimensionale Umformphänomene, wie die Scherdeformation der Geflechtlagen, Delaminationen und Poren zu untersuchen. Die Proben wurden mit einem CT-System V|TOME|X L450CT (300 kV Mikrofokus-Röntgenröhre) untersucht. Als Scanparameter wurden eine Röntgenspannung von 60 kV, ein Röhrenstrom von 120 μ A, eine Belichtungszeit von 1000 ms und eine Voxelgröße von 35 μ m verwendet. Die rekonstruierten CT-Volumina wurden in VG STUDIO MAX digital bearbeitet. Zur Beurteilung kleinerer Phänomene, wie z.B. Faserreorientierungen und Matrixmigration, werden fotomikroskopische Schnitte des überspritzten Bereichs angefertigt. Die Schnitte werden entlang und senkrecht zur Fließrichtung des Spritzgussmaterials angefertigt.

Spritzgießversuche TL1

Die hergestellten und umspritzten FTV-Profile sind in Abbildung 63 dargestellt. Mittels der entwickelten Werkzeugtechnik des Spritzform-Verfahrens und der gewählten Spritzgießparameter wird eine gute Abformung der Keilwellenkontur erreicht. Aufgrund der unebenen Innenfläche der FTV-HP sind einige kleinere Überspritzungen zwischen den Zähnen der Keilwellenkontur sichtbar. Diese sind auf den hohen Einspritzdruck und die Tatsache zurückzuführen, dass die Laminatdicke der FTV-HP zu gering gewählt wurde. Bei den oberhalb der Schmelztemperatur vorgewärmten Proben (Config 5) sind die Überspritzungen mit dem FTV-Laminat verschmolzen (Abbildung 63 b), während bei den unterhalb der Schmelztemperatur des FTV vorgewärmten Proben (Config 3) kein vollständiger Stoffschluss erreicht wurde (Abbildung 63 a). Die Überspritzungen konnten in einem dickeren Laminat, welches innen ausgedreht wurde (Config 10) aufgrund der glatteren Oberfläche deutlich reduziert werden (Abbildung 63 c).

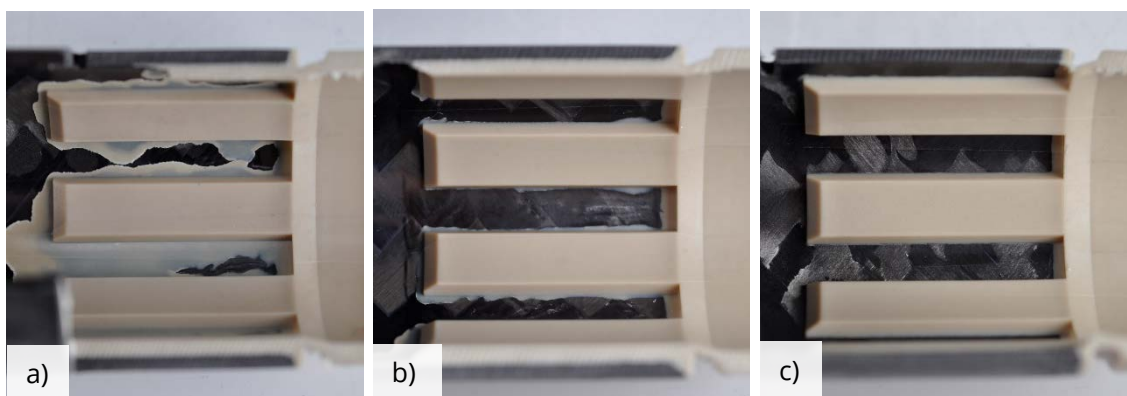


Abbildung 63: Innenoberfläche der funktionalisierten Hohlprofile: Config 3 a), Config 5 b) und Config 10 c)

Um die Eignung des entwickelten Spritz-Funktionalisierungsprozesses zu bestätigen, wurden zunächst ausgewählte Probekörper mittels CT-Scan untersucht. Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse der Untersuchungen anhand von repräsentativen Beispielen näher beschrieben. In Abbildung 64 sind zwei CT-Querschnitte für die Config 2 dargestellt. Für die gewählte Vorwärmtemperatur von 270 °C sind großflächige Delaminationen bzw. mangelnde Haftung zwischen dem FTV-HP und der Spritzgießstruktur zu beobachten. Nach den VICTREX-Gestaltungshinweisen [Fer20] ist eine Vorwärmtemperatur von 200 - 250 °C für einen guten Verbund im so genannten Two-Shot-Verfahren (Hybridspritzgießen ohne Ausformung der FTV-Struktur) ausreichend.

Dies steht im Widerspruch zu den Ergebnissen der Analyse von Config 2. Schwindungseffekte wurden als Hauptursache identifiziert. Während der Erstarrung der Spritzgussmasse schrumpft

diese volumetrisch, während der Durchmesser des FTV-HP beim Abkühlen aufgrund des Schichtaufbaus und des negativen Wärmeausdehnungskoeffizienten der Kohlenstofffasern nur geringfügig abnimmt. Gleichzeitig sind Überspritzungen zwischen den Zähnen zu beobachten. Diese Überspritzungen führen im Querschnitt zu einer zusammenhängenden kreisförmigen Spritzgussstruktur. Deren Volumenschrumpfung kann zu einer Verringerung des Durchmessers der Spritzgussstruktur führen, die durch das FTV-HP nicht kompensiert werden kann. Der Effekt wird vor allem bei Probekörpern oder einzelnen Bereichen beobachtet, bei denen großflächige, zusammenhängende Überspritzungen aufgetreten sind. Porosität im Zahnbereich und homogen verteilte Poren im Ringverteiler des Angusses sind ebenfalls sichtbar.

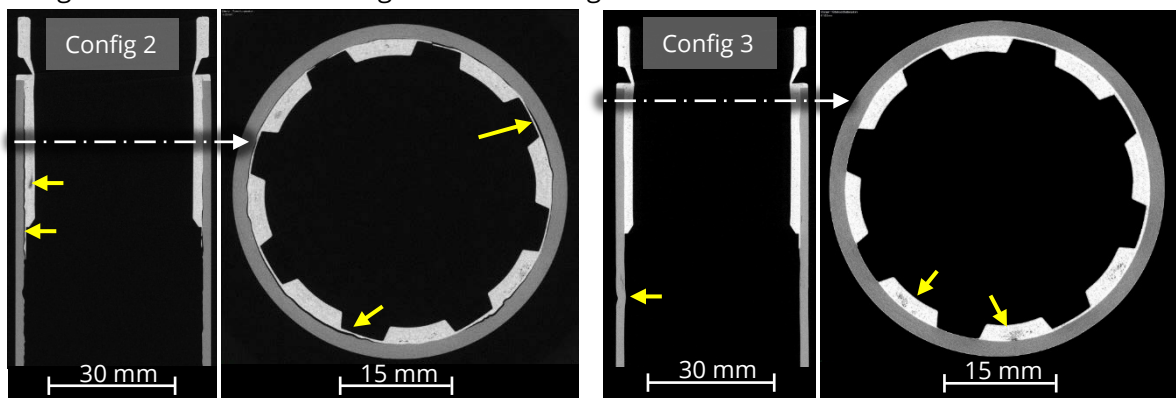


Abbildung 64: Computertomografieschnitte Config 2 (links) und Config 3 (rechts)

Im Vergleich zu Config 2 wurde die Vorwärmtemperatur für Config 3 auf 300 °C erhöht, um die Haftung zwischen der Spritzgussstruktur und dem FTV-HP zu verbessern. Bei diesem Probekörper ist keine Delamination sichtbar, aber es ist eine Faltenbildung unterhalb des Dichtungsbereichs des Einfallkerns aufgetreten. Dies ist auf die erhöhte Temperatur und die damit verbundene Abnahme der strukturellen Integrität des FTV-HP sowie auf die Auswirkung einer axialen Kraft auf das FTV-HP aufgrund des Spritzgießprozesses zurückzuführen. Darüber hinaus sind auch bei dieser Probe homogen verteilt Lunker zu erkennen. Im Gegensatz zu den bereits gezeigten Proben wurde Config 4 auf 380 °C vorgewärmt. Wie in Abbildung 65 zu sehen ist, führt die erhöhte Temperatur und der damit verbundene Verlust der strukturellen Integrität des FTV-HP zu interlaminarer Faltenbildung im Dichtungsbereich des Einfallkerns und innerhalb des Laminats. Auch im Inneren der umspritzten Struktur ist Porosität sichtbar. Signifikante Unterschiede zu den Prüfkörpern, die unterhalb der Schmelztemperatur des Polymers erwärmt wurden, bestehen in der Verbindungszone zwischen den Zähnen der spritzgegossenen Struktur und dem FTV-HP. Hier wird die Spritzgussmasse in das Laminat gedrückt und mit diesem verschmolzen. Im Zahnbereich sind diese Effekte unkritisch, da der daraus resultierende Formschluss der beiden Komponenten zur Erhöhung der Verbindungsfestigkeit beitragen kann. Aufgrund des schmelzflüssigen Zustands des FTV-HP ist jedoch auch zu beobachten, dass die Spritzgussmasse im Laminat durch den Dichtbereich des Einfallkerns fließt. Es wird vermutet,

dass der Spritzdruck mit Axialkraftwirkung in Kombination mit einer zu geringen Schichtdicke der Laminatarchitektur im Abdichtungsbereich diesen Fehler verursacht.

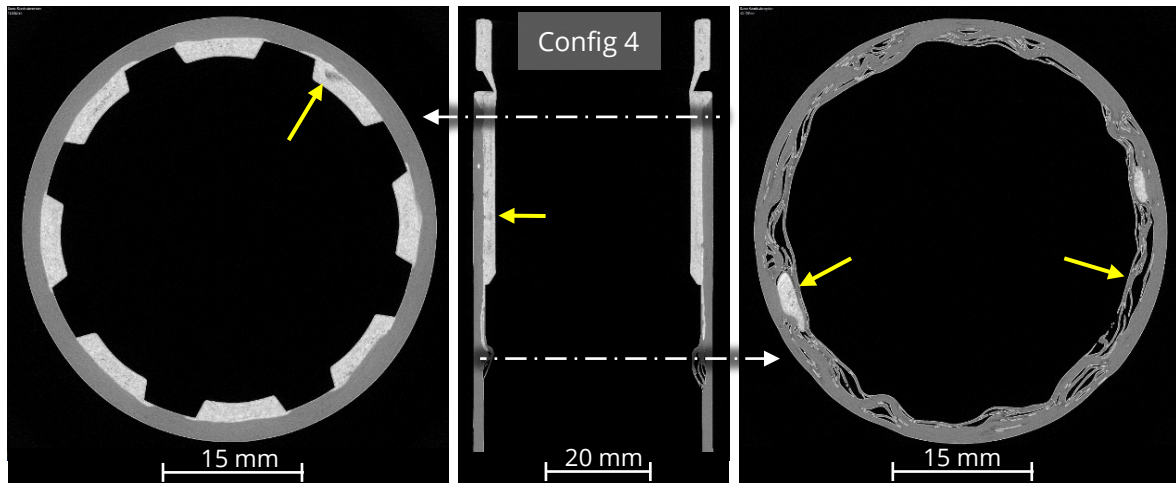


Abbildung 65: Computertomografieschnitte von Config 4 mit Faltenbildung außerhalb der Ebene (rechts) im Bereich der Dichtung des Faltkerns

Abbildung 66 zeigt die Config 5, bei der die Vorwärm länge auf 45 mm reduziert wurde, um die Faltenbildung zu verringern. Diese Maßnahme zeigt Verbesserungen, obwohl immer noch eine leichte Faltenbildung im Laminat vorhanden ist. Auch hier sind Porosität, Fasermigration und Eindringen der Schmelze in das Laminat zu beobachten. Bei Config 7 werden Faltenbildung und Überspritzungen aufgrund des dickeren Laminats sowie der bearbeiteten glatten Innenfläche weiter reduziert. Die Höhe des Anschnitts wurde in Config 7 erhöht, um die effektive Nachdruckzeit zu erhöhen und damit die Schrumpfungslunker zu reduzieren. Trotz des vergrößerten Anschnitts sind in Config 7 immer noch Lunker vorhanden.

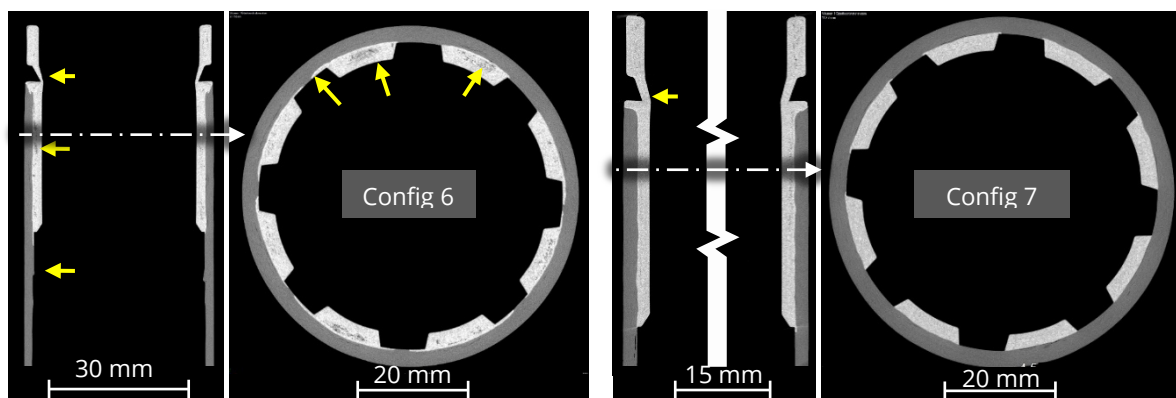


Abbildung 66: Computertomografieschnitte von Config 5 (links) und Config 7 mit vergrößertem Anschnitt (rechts)

In Abbildung 67 ist exemplarisch für Config 7 die Ist-Geometrie gemessen mittels CT und der Soll-Geometrie aus dem CAD verglichen. Im Vergleich zur Soll-Geometrie gibt es am hergestellten Probekörper eine geometrische Abweichung von -0,1 mm an den Zahnflanken und -0,2 mm an dem Zahninnendurchmesser.

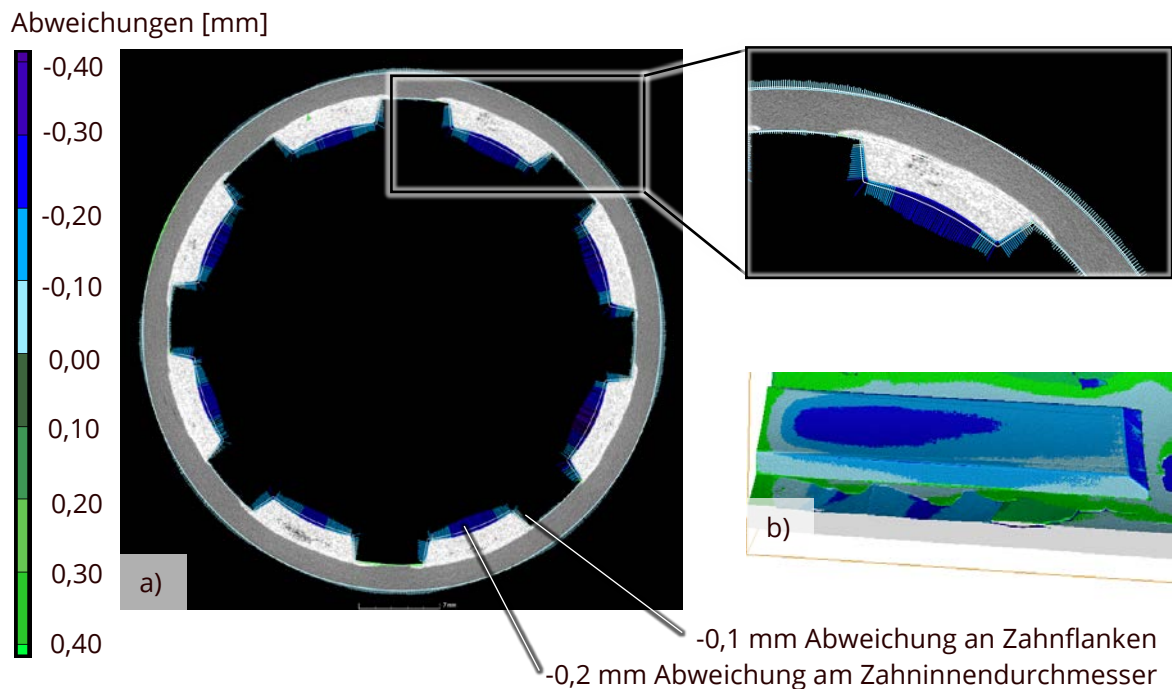


Abbildung 67: a) Vergleich der Soll-Geometrie aus dem CAD und der Ist-Geometrie mittels einer CT-Aufnahme der Config 7 im Schnittbild und b) 3D Darstellung der geometrischen Abweichung eines Zahns

Der Grund für die Abweichung der Geometrien sind Schwindungseffekte während der Kristallisation der überspritzten Spritzgießmasse in Kombination mit einem unzureichenden Nachdruck. Die Schwindung wurde in AUTODESK MOLDFLOW berechnet und mit der Ist-Geometrie verglichen (Abbildung 68). Es konnte eine gute qualitative Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen erzielt werden. Die berechnete Abweichung von der Sollgeometrie ist jedoch um 0,1 mm kleiner als bei der CT-Messung. Als Hauptgrund für die hohe Schwindung und der Abweichung der Berechnung von der CT-Messung wurde ein unzureichend hoher Nachdruck in Folge einer frühen Verfestigung des Spritzgussmaterials im Anschnitt identifiziert. Für weiterführende Arbeiten ist dies in der Gestaltung des Werkzeuges zu berücksichtigen, um die Qualität der hergestellten Bauteile weiter zu verbessern.

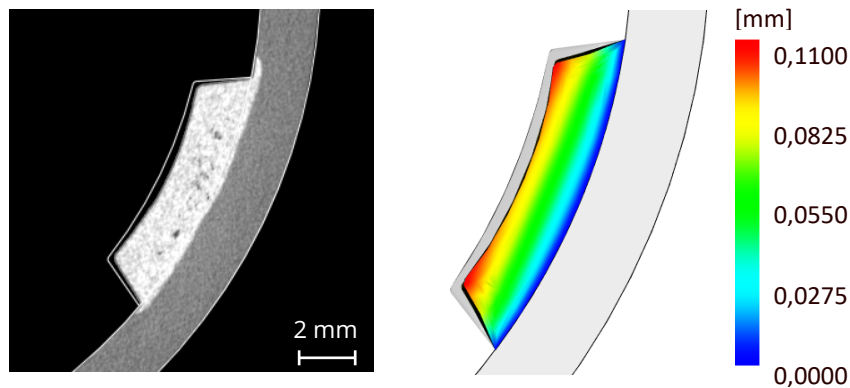


Abbildung 68: Vergleich der Soll-Geometrie aus dem CAD und der Ist-Geometrie mittels einer CT-Aufnahme der Config 7 im Schnittbild (links) und Verzug berechnet in AUTODESK MOLDFLOW (rechts)

Abbildung 69 zeigt beispielhafte Mikroskopieaufnahmen der Config 3 auf der linken Seite. Die beiden Mikroskopieaufnahmen entlang der funktionalisierten Struktur zeigen Lunker und Schrumpfungshohlräume in der umspritzten Masse. Die unteren Mikroskopieaufnahmen zeigen auch den Dichtungsbereich zwischen dem Einfallkern und dem FTV-HP. Die Spritzgießmasse verfestigt im Dichtungsbereich in dem kleinen verbleibenden Spalt zwischen dem Einfallkern und dem FTV-HP. Auf der rechten Seite von Abbildung 69 ist ein Beispiel für einen qualitativ hochwertigen Verbund von FTV-HP und Spritzgussmasse mit leichter Faserumorientierung und Oberflächenpenetration der Spritzgießmasse in das Laminat von Config 7 zu sehen. In beiden Proben sind Porosität und Lunker vorhanden. Außerdem ist im unteren rechten Bild die Auswirkung der interlaminaren Faltenbildung aufgrund der Klemmwirkung und der axialen Kompression des erweichten FTV-HP durch den Einspritzdruck im Dichtungsbereich des Einfallkerns zu sehen.

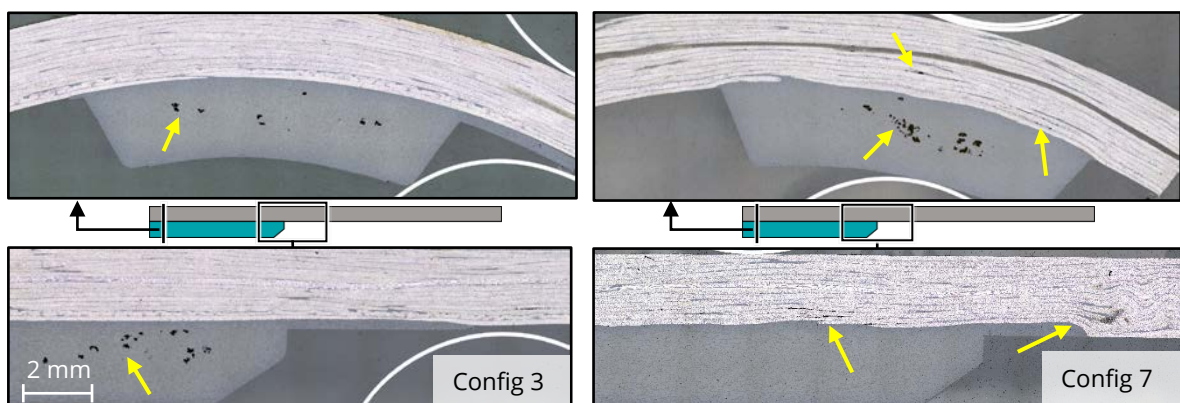


Abbildung 69: Mikroskopische Aufnahmen von Längs- und Querschnitten entlang einer Probe von Config 3 und Config 7

Abbildung 70 zeigt Mikroskopieaufnahmen von Config 10. Aufgrund der Vorwärmtemperatur von 380 °C weist der Probekörper eine gute Verbindung der umspritzten Elemente mit dem FTV-HP auf. Im umspritzten Material sind Lunker vorhanden. Außerdem sind Delaminationen in den Lagen des FTV-HP in der Nähe der umspritzten Elemente sichtbar, die durch die Schwindung der Spritzgussmasse verursacht werden können. Aufgrund der höheren Laminatdicke von Config 10 ist die Faltenbildung außerhalb der Ebene im Dichtungsbereich im Vergleich zu Config 7 reduziert.

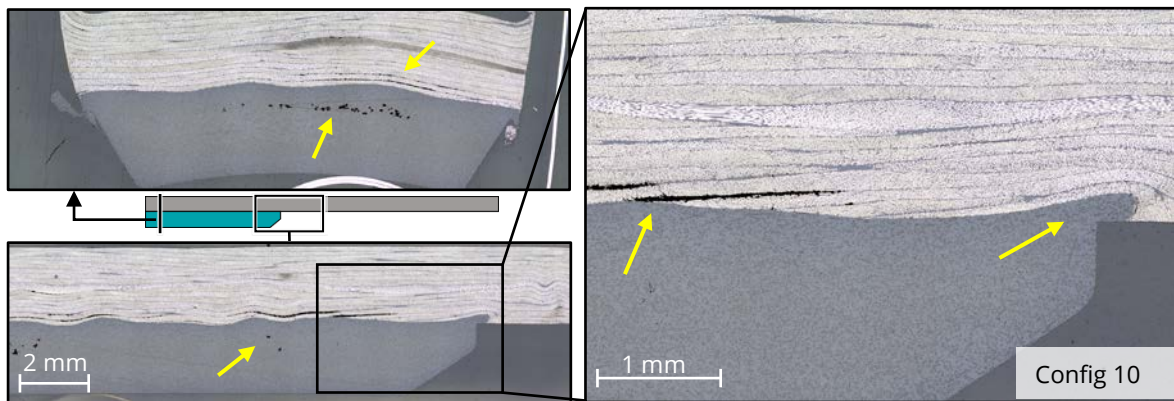


Abbildung 70: Mikroskopische Aufnahmen von Längs- und Querschnitten entlang einer Probe von Config 10

Spritzgießversuche TL2

Die Prozesssimulation des Spritzformverfahrens wurde im Abschnitt 6.2.3 vorgestellt. Durch die Kombination von MOLDFLOW und ABAQUS konnte der Spritzformprozess mit vereinfachten Materialmodell abgebildet werden. Um eine Aussagefähigkeit zur Genauigkeit der Simulation geben zu können, wurden die Ergebnisse der Simulation mit den experimentellen Spritzformversuchen des TL 2 verglichen (Abbildung 71).

Die Kavität konnte im Experiment vollständig abgeformt und das FTV-HP aufgeweitet werden. Die Aufweitung des Rohres wurde in der Simulation abgebildet. Im CT-Längsschnitt des spritzgeformten Bereiches des Rohres ist eine Faltenbildung zu sehen. Aufgrund der komplexen Fluid-Struktur-Interaktion im Spritzformprozess wird das Hohlprofil aufgrund Reibung und Druck gestaucht. Dies kann in dem aktuellen Stand der Prozesssimulation nicht abgebildet werden und ist Gegenstand künftiger wissenschaftlicher Tätigkeiten.

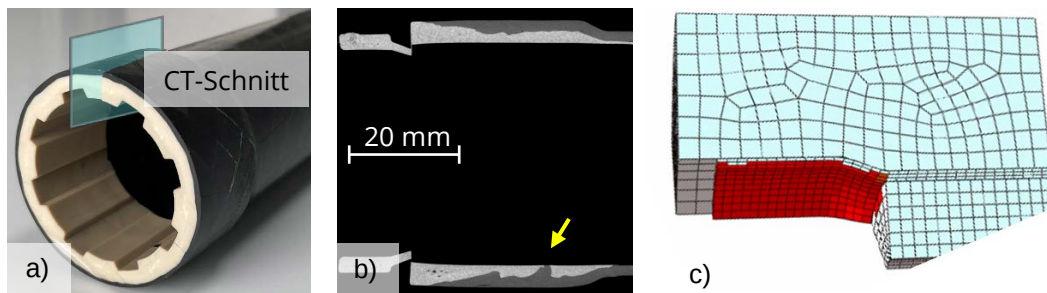


Abbildung 71: TL 2 Demonstrator aus Config 9 a), CT-Längsschnittbild b) und Achtelmodell des verformten FTV-HP aus der Spritzform-Simulation c)

6.5.3 Experimentelle Charakterisierung Spritzform-Funktionalisierung

Die mechanische Leistungsfähigkeit der funktionalisierten Teile wird in quasi-statischen Torsionstests geprüft. Für den Test wurde eine Prüfvorrichtung mit einer Keilwelle aus Stahl hergestellt und an die Nabengeometrie des umspritzten FTV-HP angepasst. Die Zentrierung erfolgt mittels einer Passung am Außendurchmesser der Keilwelle. Die Prüfungen wurden auf einer quasi-statischen Prüfmaschine von ZWICK ROELL (Z250) durchgeführt. Die Rotation der Rohre wurde mit dem optischen Messsystem ARAMIS SRX gemessen. Der Prüfaufbau ist in Abbildung 72 dargestellt.

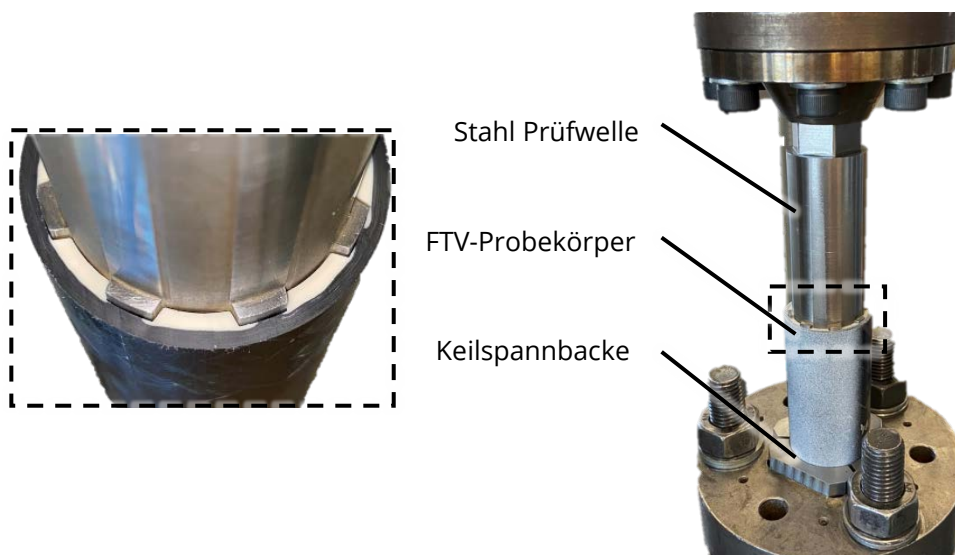


Abbildung 72: Prüfaufbau zur experimentellen Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften der Spritzfunktionalisierung

Es wurde eine Drehgeschwindigkeit von 5°/min gewählt und eine axiale Verformung während der Prüfung zugelassen. Config 3, 8, 9 und 11 wurden für die mechanische Prüfung ausgewählt, um die Qualität der Teile in Abhängigkeit der Vorwärmtemperatur, des Technologie-Levels und einer zusätzlichen matrixreichen Zwischenschicht zu bewerten. Es wurden fünf Proben pro Konfiguration geprüft. Die optische Messung der Rotation ist in Abbildung 73 exemplarisch für einen Probekörper der Config 8 dargestellt. An der Probe wird in einem Abstand von 50 mm ein Bereich in der Mitte und ein Bereich oben an der Probe definiert, in welchen die Verdrehung ermittelt wird. In dem Drehmoment-Drehwinkel-Verlauf sind charakteristische Abweichungen von dem geraden Kurvenverlauf zu sehen.

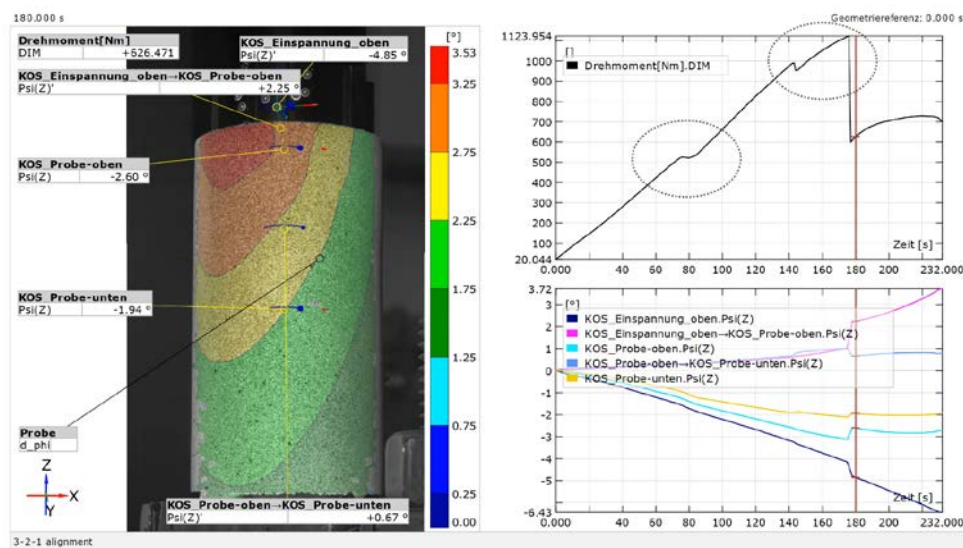


Abbildung 73: Auswertung der Verdrehung der mechanischen Prüfzelle und dem funktionalisierten Hohlprofil einer Probe der Config 8 in der GOM Software des ARAMIS Messsystems

Dies könnte auf ein Setzverhalten der Keilwelle und der zu prüfenden FTV-HP-Nabe aufgrund von unzureichend genauen Toleranzen zurückzuführen sein. Zusätzlich wurden Brüche einzelner Zähne vor der Maximalkraft beobachtet, was auf eine ungleiche Lastverteilung zurückzuführen ist. In Abbildung 74 sind die charakteristischen Bruchbilder der spritzfunktionalisierten Proben dargestellt. Alle Brüche der Config 3-Proben traten am Interface zwischen dem FTV-HP und den umspritzten Zähnen der Nabe auf. In allen Fällen wurden die Zähne vom Hohlprofil abgesichert. Adhäsives Versagen im Interface dominiert die Bruchfläche der Config 8-Proben mit geringen FTV-Rückständen auf der Zahnstruktur und teilweise freigelegten Fasern auf der Innenseite des FTV-HP. Alle Probekörper der Config 9 im TL 2 versagten außerhalb der Fügezone. Der Versagensmechanismus ist die Aufspaltung parallel zur Faserrichtung des Laminats unter Torsionslast, vermutlich aufgrund von Spannungsspitzen am Beginn des aufgeweiteten Bereichs. Es konnten daher keine resultierenden Festigkeitswerte für

spritzgeformten Funktionselemente des TL 2 bestimmt werden. Bei den Proben der Config 11 kam es teils zu Rohrversagen aufgrund der hohen übertragenen Lasten der angespritzten Zähne.



Abbildung 74: Charakteristische Bruchbilder von exemplarisch gewählten Proben: a) Adhäsives Versagen in Config 3, Rohrversagen in b) Config 11 und c) Config 9, Mischbruch und abgebrochener Zahn aus Config 8 d)

Abbildung 75 zeigt den Vergleich der maximalen Schubspannungen in der Grundfläche der Zahngeometrie in Abhängigkeit der geprüften Konfigurationen. Trotz einer Vorwärmtemperatur von 300 °C konnte lediglich eine maximale mittlere Schubspannung von 13,4 N/mm² in Config 3 erreicht werden. Die Schubfestigkeit konnte in Config 8 durch das Aufschmelzen des FTV-HP auf 38,3 N/mm² gesteigert werden. Das Einbringen einer zusätzlichen PAEK-Folie zwischen FTV-HP und den angespritzten Zähnen in Config 11 erhöhte die maximale Schubspannung auf 48,5 N/mm². Das TL 2 konnte in Config 9 nicht bis zum Bruch am Interface getestet werden. Jedoch übersteigt die erreicht Schubspannung 25,3 N/mm².

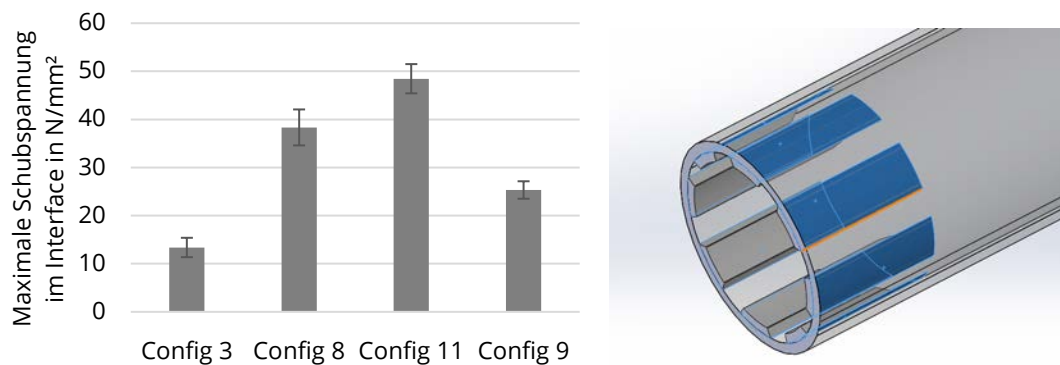


Abbildung 75: Vergleich der maximalen Schubspannung im Interface in der Zahngrundfläche in Abhängigkeit der getesteten Konfigurationen (links) und in blau markierte Interfacefläche der Probekörper (rechts)

6.5.4 Experimentelle Validierung Demonstrator

Mit den in den Abschnitten 6.5.1 vorgestellten experimentellen Untersuchungen konnte die Eignung der im kombinierten CBM-Spritzformverfahren hergestellten Hohlprofile und der Nachweis der Funktionsfähigkeit durch Erfüllen der in HAP 1 definierten Anforderungen sichergestellt werden. Die Leistungsfähigkeit der spritzfunktionalisierten Lasteinleitung wurde im Abschnitt 6.5.3 demonstriert und an den von HPF im seriennahen Umfeld hergestellten Proben getestet. Eine experimentelle Prüfung der finalen Demonstratoren mit beidseitig im Spritzformverfahren funktionalisierten Lasteinleitungsbereichen erfolgte im Rahmen des Projektes nicht, da aufgrund der Symmetrie keine Abweichung zu den durchgeführten einseitigen Prüfungen zu erwarten sind. Abbildung 76 zeigt die Demonstratorwellen des Projektes InPro aus Tape-geflochtenen CF/PAEK Hohlprofilen funktionalisiert im Spritzformverfahren und metallischen Lasteinleitungselementen. Das TUD-ILK unterstützte HERONE und BOEING in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und beim TRL-Review



Abbildung 76: Demonstratorwellen aus Tape-geflochtenen CF/PAEK Hohlprofilen funktionalisiert im Spritzformverfahren und metallischen Lasteinleitungselementen des Projektes InPro

7 Verwertung der Forschungsergebnisse

7.1 Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten

Mit dem im Rahmen des Projektes erworbenen Fachwissen bei der Entwicklung und Umsetzung von Fertigungsverfahren zur Herstellung von integralen und leichten Luftfahrt-Profilstrukturen auf Basis von geflochtenen thermoplastischen Tapes ist die Grundlage für weitere Entwicklung in diesem Themenbereich gelegt worden. Die Out-of-Autoclave Konsolidierung der FTV-Hohlprofile im CBM-Verfahren ermöglicht kurze Zykluszeiten und kosteneffiziente Prozesse. Das CBM-Verfahren kann einen weiteren Einsatz in Entwicklungsprojekten zur Verkürzung des Entwicklungsaufwands und der Entwicklungsdauer finden sowie für Pilotserien genutzt werden. Durch das entwickelte Spritzform-Verfahren wird die Gestaltungsfreiheit der FTV-Rohre insbesondere für lokale Funktionalisierungen an den Stirnseiten und auf der Innenseite erweitert. Damit können FTV-Rohre zukünftig in integrale Composite-Lösungen wie Hydraulikleitungen, Antriebswellen oder Streben in einem effizienten Prozess überführt werden.

Gleichzeitig fließen die Ergebnisse in die aktuellen Lehrveranstaltungen des TUD-ILK mit der eigenen Studienrichtung Leichtbau ein und tragen so zur Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses bei. Die Erkenntnisse der Werkzeugkonstruktion und Temperierung werden in die Vorlesung „Werkzeugkonstruktion“ im Modul „Kunststofftechnologien“ integriert und sollen in die Lehrmodule „Faserverbundwerkstoffe und Technologien“ sowie „Fertigung von Faserverbundstrukturen“ eingearbeitet werden. Des Weiteren werden die gewonnenen Erkenntnisse zu den mechanischen Eigenschaften der CBM-Hohlprofile sowie der funktionalisierten Keilwellenstruktur in die Vorlesung „Konstruieren mit Faserverbundwerkstoffen“ integriert.

7.2 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Die Erkenntnisse aus der im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Fertigungsversuche und Materialuntersuchungen eröffnen dem TUD-ILK neue Felder für Forschung und Entwicklung. Die Ergebnisse fließen am TUD-ILK synergetisch in neue grundlagen- und anwendungsorientierte FuE-Projekte ein. Sie sichern bzw. schaffen somit auf Basis des Wissenszuwachses Arbeitsplätze und Promotionsmöglichkeiten für junge Akademiker am TUD-ILK und tragen gleichzeitig zu einer Stärkung des Wissenschaftsstandortes Deutschland bei.

Es konnten durch die Aktivitäten bereits intensive Kontakte zu Zulieferern der deutschen Luftfahrtindustrie geknüpft werden, die perspektivisch diese oder eine ähnliche Technologie einsetzen wollen. Aufgrund der branchenübergreifenden Ausrichtung des TUD-ILK kommen die

entwickelten Technologien nicht nur der Luftfahrtindustrie zugute, sondern finden in weiteren Anwendungsbereichen wie etwa der Fahrzeugindustrie, der Medizintechnik oder dem Maschinenbau Anwendung. Sie führen somit über den Bereich der Luftfahrtindustrie hinaus direkt zu einer Stärkung des Industriestandortes.

Das im Projekt gewonnene spezifische Fachwissen trägt zu einem besseren Verständnis von grundlegenden Fragestellungen der Out-of-Autoclave Prozessführung in der Herstellung thermoplastischer Hohlprofilstrukturen bei und kann somit auch unmittelbar für die Ingenieurweiterbildung auf dem Gebiet der modernen Werkstoffe genutzt werden. Darüber hinaus bietet die Einbindung des TUD-ILK in zahlreiche Ausschüsse, Fachtagungen und Kongresse eine einzigartige Transferplattform für die Verbreitung der im Rahmen des Vorhabens gewonnenen Erkenntnisse.

Für die weitere Verwertung der Projekteinhalte kann exemplarisch die Nutzung und Weiterentwicklung des Spritzform-Verfahrens von FTV-Profilstrukturen im LuFo VI-3 Vorhaben „ThyGr“ erwähnt werden. Zusätzlich wird die erarbeitete Kompetenz und die Anlagentechnik der CBM-Technologie bereits in weitere Anträge für Forschungs- und Entwicklungsvorhaben integriert. Hierbei kann der Transfer der Technologie vor allem in Leitungssysteme von Luftfahrzeugen geschaffen werden.

8 Forschungsergebnisse Dritter

Von dritter Seite sind keine verwertbaren Ergebnisse bekannt geworden, die eine Relevanz zu den im Rahmen des Verbundteilprojektes bearbeiteten. Die Verarbeitung von thermoplastischen Tapes im Flechtverfahren, deren Konsolidierung im CBM-Prozess sowie der Umformung und Funktionalisierung von innen im Spritzform-Verfahren zu Luftfahrtprofilen stellt weiterhin ein Alleinstellungsmerkmal der untersuchten Thematik gegenüber Wettbewerbern dar.

9 Veröffentlichungen

Die Forschungsergebnisse wurden mit dem Fokus auf der Prozessroute und dem CBM-Verfahren im Rahmen eines Fachvortrages präsentiert und im begleitenden Konferenzbericht veröffentlicht:

Garthaus, C., Assmann, F., Würfel, V., Barfuss, S., Resick, F., Jüptner, Y. Gude, M. (2022). Continuous Blow Molding (CBM) for Consolidation of CF-PAEK Hollow Profiles. *ITHEC 2022, 6th International Conference Exhibition on Thermoplastic Composites*

Die Erkenntnisse zur Funktionalisierung der Hohlprofile im Spritzform-Verfahren wurden als Fachvortrag präsentiert und im begleitenden Konferenzbericht veröffentlicht:

Würfel, V., Becke, J., Dutzke, L., Mischorr, E., Heinze, P., Keil, J., Liebsch, A., Gude, M., Garthaus, C., Assmann, F. (2023). Inside Hybridization of CF/PAEK Hollow Profiles by means of Injection Molding. *SAMPE Europe Conference 2023 Madrid*

Zudem wird das Projekt im Jahresforschungsbericht 2024 des TUD-ILK vorgestellt. Die ersten im InPro Projekt hergestellten funktionalisierten Demonstrator-Hohlprofile wurden auf dem Stand von HERONE auf der Composites and Advanced Materials Expo 2023 und auf dem Stand von VICTREX auf der JEC World 2024 ausgestellt.



Abbildung 77: Ausstellung der im InPro Projekt hergestellten funktionalisierten Hohlprofile auf dem Stand von HERONE auf der Composites and Advanced Materials Expo 2023 (links) und auf dem Stand von VICTREX auf der JEC World 2024 (rechts)

Literaturverzeichnis

- [Alb15] Albert, A. et al.: Process combination of hydroforming and injection moulding for the in-situ manufacturing of metal and plastic composite structures. Materials Science Forum, Vols. 825-826, 522-529, 2015
- [Bar15] Barfuss, D.; Garthaus, C.; Gude, M.: Advanced Waviness modelling of thermoplastic tape braids, Proceedings ICCM20th, 19-24th July 2015
- [Bar16] Barfuss, D.; Grützner, R.; Garthaus, et al.: Intrinsic manufacture of hollow thermoplastic composite/metal structures. In: ESAFORM 2016. Proceedings of the 19th International ESAFORM Conference on Material Forming. AIP Publishing, 2016, pp. 170024-1-170024-6.
- [Bar18] Barfuss, D. et al.: Injection forming of gears on high-performance CF-PAEK drive shafts. ITHEC 2018 proceedings, Bremen, 30.-31. Okt. 2018
- [Bar19] Barfuss, D.; Rohkamm, A.; Schwanemann, P.; Würfel, V.: Vorrichtung und Verfahren zum kontinuierlichen Blasformen faserverstärkter thermoplastischer Hohlprofile mit einem konstanten oder sich änderndem Querschnitt. Patent DE 10 2018 111 283 A1. 25 Apr. 2019 |
- [Bec00] Bechtold, G.: Pultrusion von geflochtenen und axial verstärkten Thermoplast-Halbzeugen und deren zerstörungsfreie Porengehaltsbestimmung. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 2000
- [BMB12] BMBF-Projekt e-generation (2012-2014): Schlüsseltechnologien für die nächste Generation der Elektro-Fahrzeuge „e-generation“
- [Bre13] Brecher C., Emonts M., Stimpfl J., Kermer-Meyer A.: Production of Customized Hybrid Fiber-Reinforced Thermoplastic Composite Components Using Laser-Assisted Tape Placement. In: Denkena B. (eds) New Production Technologies in Aerospace Industry. Lecture Notes in Production Engineering. Springer, Cham, 2014
- [Che99] Chen, L.; Tao, X.M.; Choy, C.L.: On the microstructure of three-dimensional braided preforms, Composites Science and Technology, Volume 59, Issue 3, Pages 391-404. Feb. 1999
- [Com15] A.J. Comer, D. Ray, W.O. Obande, D. Jones, J. Lyons, I. Rosca, R.M. O' Higgins, M.A. McCarthy, Mechanical characterisation of carbon fibre-PEEK manufactured by laser-assisted automated-tape-placement and autoclave, In Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 69, 10-20, 2015
- [Com16] ComPipe – composite pipes and fittings for aero-engines dressing, cleans sky project report summary (ID: 323514), 2016

- [Cun98] Cuntze, R.: The failure mode concept - a new comprehensive 3D-strenght analysis concept for any brittle and ductile behaving material; Proceedings of European conferences of spacecraft structures, materials and mechanical testing, Braunschweig, Nov 1998, S. 269-287
- [Ehl06] Ehleben, M., Schürmann H.: Manufacturing of centrifuged continuous fibre-reinforced precision pipes with thermoplastic matrix. Composites science and technology 66.15 (2006): 2601-2609.
- [Elr15] ElringKlinger AG.: annual report 2014 – pure process, Dettingen/Erms 2015
- [Eng17] Engelmann, U.; Layer, M.; Albert, A.; Reese, E.; Landgrebe, D.; Kroll, L.; Nendel, W.: Der Weg zum funktionalisierten FKV-Rohr – Technologiefusion aus Innenhochdruck-Umformung und Spritzgießen forciert Leichtbau. Kunststoffe (2017), Nr. 12, S. 23–26
- [Fer20] F. Ferrecki, S. Green, S. Ivan, U. Marburger, and J. Myers: ‘Hybrid Moulding Design Considerations’, Victrex plc, Lancashire, 2020.
- [Fle15] Fleischer, J.; Koch, S.-F.; Coutandin, S.: Manufacturing of polygon fiber reinforced plastic profiles by rotational molding an intrinsic hybridization, Prod. Eng. Res. Devel., (2015) DOI 10.1007/s11740-015-0620-0
- [Gar17] Garthaus, C.; Zur Herstellung funktionalisierter Hohlprofilstrukturen aus endlosfaserverstärkten Thermoplasten, Dissertation, TU Dresden (2017)
- [Gar22] Garthaus, C.; Assmann, F.; Jüptner, Y.; Würfel, V.; Barfuss, D.; Resick, F.; Gude, M.; Continuous Blow Molding (CBM) for consolidation of CF-PAEK hollow profiles, presented at the ITHEC 2022, 6th International Conference & Exhibition on Thermoplastic Composites, Bremen, Germany, Oct. 2022.
- [Gee10] Geers M.G.D., Kouznetsova V.G., Brekelmans W.A.M. Multi-scale computational homogenization: Trends and challenges. J. Comput. Appl. Math. 234, S. 2175–2182 (2010).
- [Guy13] Guyader, G.; Gabor, A.; Hamelin, P.: Analysis of 2D and 3D circular braiding processes: Modeling the interaction between the process parameters and the preform architecture Mechanism and Machine Theory (2013), 69, 90 – 104. 2013
- [Goo17] Johnathan Goodsell, Justin Miller, Rebecca Cutting, Q Mansson, BR Pipes, Jan-Anders Mansson. Simulation of injection over-molding for high-rate composites processing. Association of Chamber of Commerce Executives, 2017
- [Gud14] Gude, M., Lenz, F., Gruhl, A., et al. 2014. Design and automated manufacturing of profiled composite driveshafts. Science and Engineering of Composite Materials, 22(2), pp. 187-197. Abgerufen 2 Sep. 2018. doi:10.1515/secm-2014-0048

- [Hel06] Helms, O., 2006. Konstruktion und technologische Umsetzung von hochbeanspruchten Lasteinleitungssystemen für neuartige Leichtbaustrukturen in Faserverbundbauweise. [Dissertation]. Technische Universität Dresden.
- [Huf07] Hufenbach, W.; Helms, O.; Werner, J.: Welle-Nabe-Verbindungen für hochbeanspruchte Antriebskomponenten in Faserverbund-Leichtbauweise, VDI-Tagung in Wiesloch bei Heidelberg, Oktober 2007, VDI-Berichte Nr. 2004 (2007)
- [Jan19] Janson, M.: Airbus und Boeing bei Auslieferung fast gleichauf. Statista GmbH Internetpräsenz, <https://de.statista.com/infografik/17007/ausgelieferte-flugzeuge-von-airbus-und-boeing/>. Feb. 2019
- [Kan09] Kanouté P., Boso D., Chaboche J., Schrefler B. Multiscale Methods for Composites: A Review. Arch. Comput. Method. E. 16, S. 31–75 (2009).
- [Kle05] Kleschinski, M., 2005. Versagensmechanismen und faserverbundgerechte Gestaltung von Antriebswellen in Faserverbundbauweise. Faser-Kunststoff-Verbunde: Neue Freiheitsgrade in der Konstruktion, Darmstadt, 3. - 4. März 2005; 11. Nationales Symposium SAMPE Deutschland e.V. / Society for the Advancement of Material and Process Engineering; Technische Universität Darmstadt
- [Kyo16] Kyosev, Y., Advances in braiding technology: Specialized techniques and applications, Woodhead Publishing, 2016, ISBN 978-0-08-100926-0
- [Lee07] Lee, S. W.; Lee, D. G., 2007. Torque transmission capability of composite-metal interference fit joints. Composite Structures 78, Nr. 4, 584 - 595. – DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2005.11.021>. – ISSN 0263-8223
- [Leh97] Lehmann, U.; Michaeli, W.: Herstellung von endlosfaserverstärkten thermoplastischen Hohlkörpern im Schaubblasverfahren. In: Composites Heute und Morgen. Baden-Baden, 1997
- [Len14] Lenz, F.; Spitzer, S.; Liebsch, A.; Langkamp, A.; Gude, M., 2014. Gestaltung und Dimensionierung von Faserverbund-Antriebswellen in ultraleichter Mischbauweise - Untersuchung formschlussdominierter Verbindungsarten und Erarbeitung praxisnaher Gestaltungshinweise. Tagungsband 6. VDI-Fachtagung Welle-Nabe-Verbindungen 2014, VDI-Bericht Nr. 2238 2238, S. 187–199. – ISBN 978-3-18-092238-6
- [Len17] Lenz, F.: Die Innenprofilierung als Lasteinleitungsprinzip für modulare Antriebswellensysteme aus Hochleistungs-Faser-Kunststoff-Verbunden. Dresden, Technische Universität, Dissertation, 2017

- [Lin04] Lin, S.; Poster, S.: Development of a braided composite drive shaft with captured end fittings. American Helicopter Society 60th Annual Forum. 2004
- [Lom00] Lomov, S. et al.: Textile geometry preprocessor for meso-mechanical models of woven composites Composites Science and Technology (2000), 60, 2083 – 2095. 2000
- [Lom01] Lomov, S. et al.: Textile composites: modelling strategies Composites Part A: Applied Science and Manufacturing (2001), 32, 1379 – 1394. 2001
- [Man96] Manabe, K-I.: Bulge forming of braided thermoplastic composite tubes under axial compression and internal pressure, Polymere Composite, Vol.17, No.1, 1996
- [Pet10] Peter: Verfahren zur Herstellung eines Verbundbauteils und Verbundbauteil, Deutsches Patentamt, DE 102010055824A1, Anmeldedatum: 23.12.2010.
- [Puc96] Puck, A.: Festigkeitsanalyse von Faser-Matrix Laminaten - Modelle für die Praxis. München, Wien: Carl Hanser Verlag (1996)
- [Que14] Z. Qureshi, T. Swait, R. Scaife, H.M. El-Dessouky, In situ consolidation of thermoplastic prepreg tape using automated tape placement technology: Potential and possibilities, In Composites Part B: Engineering, Volume 66, 255-267, 2014
- [Raw13] Rawal, A.; Saraswat, H. & Kumar, R.: Tensile response of tubular braids with an elastic core Composites Part A: Applied Science and Manufacturing (2013), 47, 150 – 155. 2013
- [Ree08] Reese: Verfahren zum Herstellung eines Bauteils mit einem Hohlprofil, Deutsches Patentamt, DE 102008046602A1, Anmeldedatum: 10.09.2008.
- [Sch07] Schürmann, H., 2007. Konstruieren Mit Faser-Kunststoff-Verbunden. Springer Berlin Heidelberg, VDI-Buch
- [Sch90] Schreiber, W., 1990. Zur Gestaltung und Dimensionierung von Antriebswellen aus Faser-Kunststoff-Verbunden. VDI-Verlag
- [Spi14] Spitzer, S., Lenz, F. Liebsch, A.; Langkamp, A.; Gude, M., 2014. Zur Gestaltung und Dimensionierung von Pinverbindungen als Lasteinleitungssystem für Faserverbund-Antriebswellen. Tagungsband 6. VDI-Fachtagung Welle-Nabe-Verbindungen 2014, VDI-Bericht Nr. 2238, S. 253-260, ISBN 978-3-18-092238-6
- [Spi19] Spitzer, S.: Zur werkstoffgerechten Gestaltung und Auslegung hybrider Antriebswellen in Metall/Faser-Kunststoff-Verbund-Bauweise. Dresden, Technische Universität, Dissertation, 2019

- [Ulbr12] Ulbricht, A.: Zur Gestaltung und Dimensionierung von zylindrischen Leichtbaustrukturen in Faser-kunststoffverbund-Metall-Mischbauweise, Dissertation, TU Dresden (2012)