



**Duroplast In-Mould Forming zur Herstellung durch Spritzgießen funktionalisierter duroplastischer Faserverbundbauteile  
(Duro-IMF)**

**ABSCHLUSSBERICHT  
Partner: Gubesch Thermoforming GmbH**

**Status: 1.0**

**Zuwendungsempfänger:**

Gubesch Thermoforming GmbH

---

**Förderkennzeichen:**

20W1503F

---

**Vorhabensbezeichnung:**

Duroplast In-Mould Forming zur Herstellung durch Spritzgießen funktionalisierter duroplastischer Faserverbundbauteile (Duro-IMF)

---

**Laufzeit des Gesamtvorhabens:**

01.01.2016 bis 31.12.2019

---

**Berichtszeitraum:**

01.01.2016 bis 31.12.2019

---

**Projektleiter:**

Dr.-Ing. Thomas Müller-Lenhardt

---

**Autor:**

Dipl.-Ing. (FH) Matthias Baier

---

# Inhaltsverzeichnis

|          |   |    |
|----------|---|----|
| I.       | Kurzübersicht.....  | 4  |
| I.1      | Aufgabenstellung .....  | 4  |
| I.2      | Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....   | 4  |
| I.3      | Planung und Ablauf des Vorhabens.....   | 6  |
| I.4      | Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde .....   | 8  |
| I.5      | Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....  | 9  |
| II.      | Eingehende Darstellung.....   | 9  |
| II.1     | Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele..... | 9  |
| II.1.1   | HAP1 Lastenheft.....  | 9  |
| II.1.2   | HAP2 Werkstoff .....  | 10 |
| II.1.2.1 | Lagerkonditionen Prepreg-Materialien .....  | 11 |
| II.1.2.2 | Sicherheit im Umgang mit Prepreg-Materialien.....   | 12 |
| II.1.3   | HAP3 Grundlagenuntersuchungen .....   | 12 |
| II.1.3.1 | AP 3.1 Zuschnitt und Handling: Herstellung von Probekörperplatten .....   | 12 |
| II.1.3.2 | AP 3.2 Haftungsuntersuchungen: Herstellung des Rippenprüfkörpers.....   | 25 |
| II.1.3.3 | AP 3.3 Umformbarkeit und Gesamtprozess .....  | 25 |
| II.1.4   | HAP4 Umsetzung des Gesamtprozesses und der Bauteilkonstruktion .....  | 30 |
| II.1.4.1 | AP4.1 Bauteilkonstruktion Demonstrator .....  | 31 |
| II.1.4.2 | AP4.2 Werkzeugbau.....  | 35 |
| II.1.4.3 | AP4.3 Fertigung.....  | 37 |
| II.2     | Wichtigste Positionen aus dem zahlenmäßigen Nachweis.....   | 39 |
| II.3     | Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....  | 40 |
| II.4     | Verwertbarkeit der Ergebnisse .....   | 40 |
| II.5     | Fortschritt anderer auf dem Gebiet des Vorhabens.....   | 41 |
| II.6     | Veröffentlichungen.....   | 41 |
| II.7     | Verwendete Literatur.....   | 41 |
|          | Abbildungsverzeichnis .....   | 43 |
|          | Tabellenverzeichnis .....   | 44 |

**Dateiname:**

200505\_Abschlussbericht\_DuroIMF\_GTF\_V1.0\_Teil I+II

**Versionsliste:**

| Version | Datum      | Kommentar           |
|---------|------------|---------------------|
| 1.0     | 05.05.2020 | Version zum Versand |
|         |            |                     |
|         |            |                     |
|         |            |                     |
|         |            |                     |

**Autoren:**

| Name                          | Partner                           | Kapitel     |
|-------------------------------|-----------------------------------|-------------|
| <b>Thomas Müller-Lenhardt</b> | <b>Gubesch Thermoforming GmbH</b> | <b>Alle</b> |
| <b>Matthias Baier</b>         | <b>Gubesch Thermoforming GmbH</b> | <b>Alle</b> |
|                               |                                   |             |
|                               |                                   |             |
|                               |                                   |             |

**Projektleiter****Dr.-Ing. Thomas Müller-Lenhardt**

Gubesch Thermoforming GmbH

Industriestraße 1

91489 Wilhelmsdorf

Deutschland

Telefon: +49 9104 8270 492

Email: t.mueller-lenhardt@gubesch.de

## I. Kurzübersicht

### I.1 Aufgabenstellung

Ziel dieses Vorhabens "Duroplast In-Mould Forming zur Herstellung durch Spritzgießen funktionalisierter duroplastischer Faserverbundbauteile" oder kurz Duro-IMF war die Entwicklung einer neuen Technologie zur Herstellung innovativer Strukturen für Luftfahrzeuge. Förderpolitisch verfolgte das Vorhaben eine leistungsfähigere und effizientere Luftfahrt.

In der zu entwickelnden neuen Fertigungstechnologie sollten ähnliche Aushärtezeiten neuartiger Compression Molding Prepregs und derer von Duroplastspritzgießmassen in einem integrierten Prozess genutzt werden. Hauptziel war daher die Erforschung eines leistungsfähigen, automatisierten, integrierten Prozesses zur Herstellung im Idealfall nacharbeitsfreier, hybrider Bauteile aus endlosfaserverstärktem, duroplastischem Kunststoff und kurz- oder langfaserverstärkter Spritzgießkomponente. Ein wesentliches Ziel hierbei war die Verkürzung der Prozesskette gegenüber mehrstufigen Prozessen und somit die Einsparung von Energie von ca. 40% und der Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Produktion.

Durch die Kombination von umgeformten endlosfaserverstärkten, duroplastischen Halbschalen mit spritzgegossenen kurz- oder langfaserverstärkten Duroplasten oder hochtemperaturbeständigen Thermoplasten (HT-Thermoplasten) als Versteifung z. B. durch Rippenstrukturen sollten die werkstofflichen und konstruktiven Leichtbaupotentiale maximiert werden. Auf diese Weise sollten ca. 30% – 40% Gewichteinsparung gegenüber aktuellen metallischen Bauteilen erreicht werden, wodurch Emissionen im Flugbetrieb reduziert werden. Es wurde hierbei erwartet, dass sich die Bauteilqualität, hinsichtlich ihrer mechanischen Performance, durch die Verkürzung der Prozesskette und der damit einhergehenden Erhöhung der Prozessrobustheit sowie der besseren stoffschlüssigen Anbindung beider Komponenten verbessert.

Gegenüber aktuellen Hybridbauteilen aus endlos- und kurzfaserverstärkten HT Thermoplasten können durch den Duroplasten Produktionskosten gespart und so die Wettbewerbsfähigkeit gesteigert werden. Weiterhin können die Eigenschaften der spritzgießfähigen Formmasse durch Zugabe von Füllstoffen in einem weiteren Bereich eingestellt werden.

### I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Ziel des Kooperationsprojektes war die Erforschung und Entwicklung eines völlig neuartige Formgebungsverfahrens mit faserverstärkten Materialien und duroplastischen Matrixsystemen. Zwar existiert dieses Verfahren bereits für eine andere Werkstoffklasse, jedoch stand das Konsortium bei den hier zu untersuchenden duroplastisch basierten Werkstoffsystemen aufgrund der Andersartigkeit in Hinblick auf Viskosität und chemisch/physikalischem Verhalten vor einer großen Herausforderung, welche ausschließlich in Kooperation des interdisziplinären Konsortiums angegangen werden konnte.

Das Konsortium setzte sich aus Folgenden Partnern aus Industrie und Wissenschaft zusammen:

#### **Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)**

- Definition von BT-Anforderungen
- Bauteilprüfung

#### **Lehrstuhl für Kunststofftechnik (LKT)**

- Werkstoffauswahl und Charakterisierung
- Fertigung
- Bauteilprüfung
- Versch. Untersuchungen
- Prozess

#### **Schmidt WFT**

- Werkstoffauswahl und Charakterisierung
- Entwicklung Demonstrator
- Werkzeugtechnik

#### **Siebenwurst Werkzeugbau**

- PM
- Werkzeugtechnik
- Werkzeugbau
- Prozess

#### **Gubesch Thermoforming**

- Entwicklung Demonstrator
- Werkzeugtechnik
- Werkzeugbau
- Prozess
- Fertigung

#### **Schwerpunkte Gubesch:**

Der Schwerpunkt der Arbeitsinhalte der Firma Gubesch leitete sich aus den vorhandenen Vorkenntnissen und der angestrebten Verwertungsabsicht ab. Als einer der Väter des Spri-Form Verfahrens (In-Mould Forming mit endlosfaserverstärkten Thermoplasten), welches ebenfalls im Rahmen eines Forschungsvorhabens erforscht und entwickelt wurde, hat die Firma Gubesch schon einige Erfahrung mit der Verwertung von völlig neuartigen, integrativen Verfahren gesammelt. Gubesch möchte mit den Ergebnissen aus dem Vorhaben (bestehend vor allem aus Wissen und einem vorzeigbaren Demonstrator) die werkstoffliche Lücke der Duroplaste im Bereich des In-Mould Formings schließen. Neben der Unterstützung zur Erstellung des Lastenhefts brachte sich Gubesch vor dem Hintergrund der Verarbeitbarkeit sowie der Auslegung und Konstruktion des Demonstrators in die Werkstoffauswahl und den entsprechenden Grundlagenuntersuchungen ein. Hier wurden zwei- und dreidimensionale Einlegeteile

aus endlosfaserverstärkten Duroplasten von Gubesch zur Verfügung gestellt. Die gesammelten Erkenntnisse aus Handling, Haftung, Umformbarkeit und Werkzeugtechnik wurden schließlich transferiert und in die Bauteilkonstruktion des Demonstrators umgesetzt. Mit dem aus den Vorversuchen erarbeiteten Wissen brachte sich Gubesch maßgeblich in den Werkzeugbau mit ein und nahm aktiv an Abstimmungen und Verarbeitungsversuchen teil.

### I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Für die Durchführung wurde vom Projektkonsortium ursprünglich eine Projektdauer von drei Jahren von Januar 2016 bis Ende Dezember 2018 für erforderlich erachtet. Während der Projektlaufzeit musste diese Dauer aufgrund unvorhersehbarer Umstände um 12 Monate kostenneutral verlängert werden, so dass das Projekt Ende Dezember 2019 endete. Zum 15.07.2016 übernahm die Firma HBW-Gubesch Thermoforming GmbH das Projekt von Fa. Crosslink die aufgrund von Insolvenz aus dem Forschungsvorhaben ausgeschieden ist. Zum 24.10.2017 firmierte die HBW-Gubesch Thermoforming GmbH fortan zur Gubesch Thermoforming GmbH um.

Das Projekt wurde in fünf Hauptarbeitspunkte (HAP) mit Unterarbeitspaketen (AP) eingeteilt, für die Zeit- und Meilensteine geplant wurden. Der Zeitplan mit Meilensteinplanung zu Beginn des Projektes geht aus Abbildung 1 hervor.

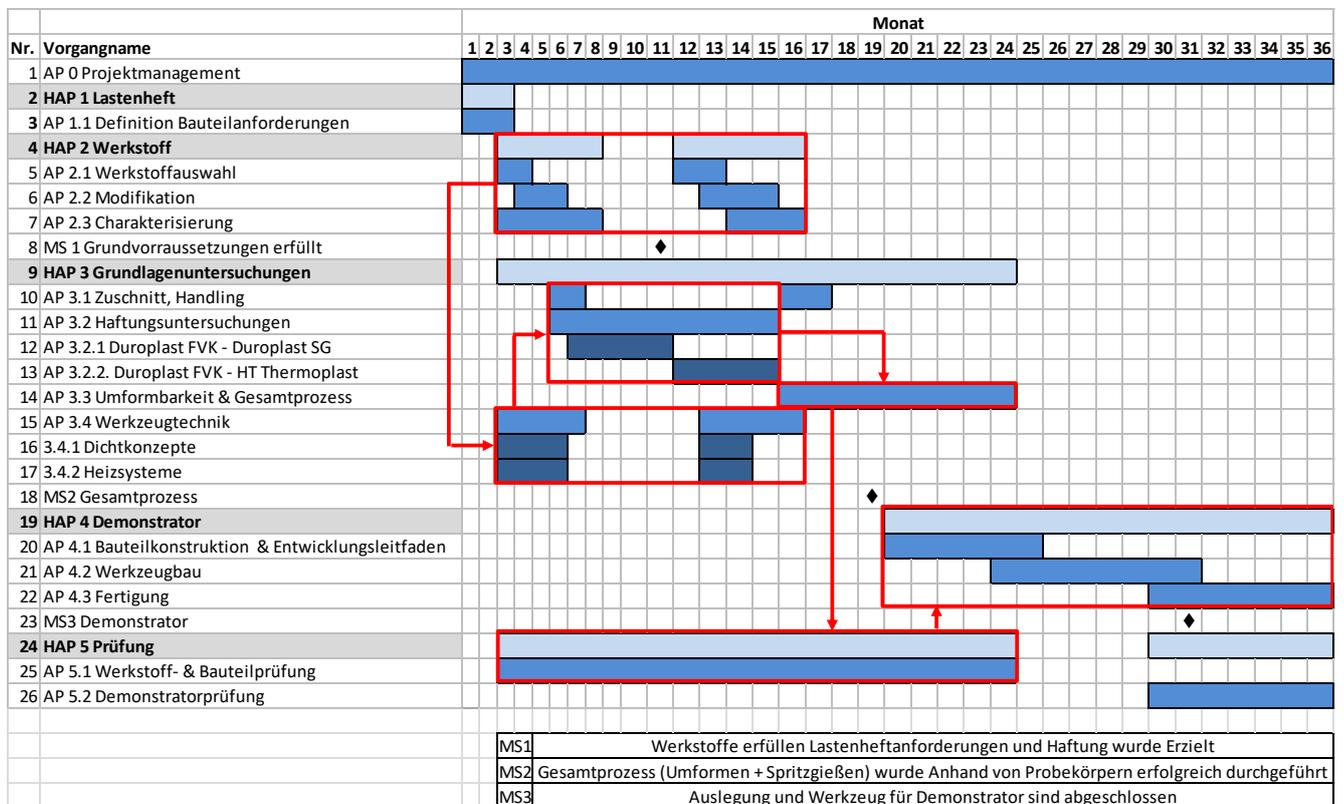


Abbildung 1 Zeitplan mit Meilsteinplanung und kritischen Pfad

Zu Beginn des Projekts wurde ein Lastenheft (HAP1) für darauffolgende HAP bezüglich des entsprechenden Referenzbauteils erstellt. Neben den Bauteilanforderungen, welche aus der Anwendung resultieren, mussten im Lastenheft auch aus dem Stand der Technik bekannte fertigungstechnische Restriktionen des Duroplastspritzgießens sowie des Stempelumformens von duroplastischen Prepregs berücksichtigt werden. Abgestimmt auf das Anforderungsprofil des Lastenhefts aus HAP1 mussten die Werkstofftypen sowie die entsprechende Halbzeugkonfiguration festgelegt werden (HAP2). Neben der Auswahl geeigneter Werkstoffe spielte innerhalb des HAP2 die Modifikation und die Charakterisierung der Materialien eine wichtige Rolle. Zum Aufbau eines Grundlegenden Verständnis zur Haftung der Werkstoffsysteme, zur Führung des Gesamtprozesses und zur Gestaltung von Werkzeugen (HAP3) wurden auf Basis der durch den LKT zur Verfügung gestellten Informationen, Zuschnitt und Handlingkonzepte erarbeitet. Weiterhin wurden im Rahmen des HAP3 wichtige Grundlagenuntersuchungen an unterschiedlichen Versuchs- und Probekörperwerkzeugen durchgeführt, anhand derer die notwendige Werkzeugtechnik als auch Parameteruntersuchungen validiert wurden. Die so gewonnen Erkenntnisse flossen wiederum in die Demonstratorauslegung in HAP4 ein. Zur Validierung des Gesamtprozesses des Duroplast In-Mould Formings innerhalb des HAP4 am komplexen, anwendungsnahen Demonstratorbauteil diente ein aerodynamisches Verkleidungselement der Triebwerksaufhängung (IMC-Intermediate Case Verkleidung). Dieses Bauteil aus der Luftfahrt muss den aerodynamischen Drücken als auch Vibrationen standhalten. Die äußere Halbschale wird aus dem umgeformten, endlosfaserverstärkten Prepreg gebildet und mit der Rippenstruktur und Endabschlüssen aus duroplastischer Formmasse durch Spritzgießen vor der Aushärtung des Gesamtbauteils versteift. Zur Auslegung des Bauteils dienten insbesondere die gewonnen Erkenntnisse aus den vorangegangenen HAP. Das Demonstratorwerkzeug zur Fertigung des Demonstrators wurde unter Berücksichtigung aller anhand der Modellgeometrien und Modellwerkzeuge erlangten Erkenntnisse konstruiert und gefertigt. Weiterhin wurden Demonstratorbauteile hergestellt welche in HAP5 geprüft und getestet wurden und zur Veröffentlichung und bei Messeauftritten allen Partnern bereitgestellt wurden.

Für das Verbundvorhaben wurden im Rahmen der Zeitplanung drei Meilensteine eingeplant, welche im Rahmen der Projektlaufzeit erreicht wurden:

- MS1 Werkstoffe erfüllen Lastenheftanforderungen und Haftung wurde erzielt
- MS2 Gesamtprozess (Umformen + Spritzgießen) wurde anhand von Probekörpern erfolgreich durchgeführt
- MS3 Auslegung und Werkzeug für Demonstrator sind abgeschlossen

Die Fortschreibung und Sicherstellung des Rahmenplans wurde durch regelmäßige Projekttreffen aller Projektpartner im Abstand von ca. 6 Monaten sichergestellt. Darüber hinaus hatte es sich als zweckmäßig erwiesen, nach Bedarf Arbeitstreffen und Arbeitsgruppen zu bestimmten Schwerpunkten einzurichten. Diese Arbeitsgruppen dienten dem Vorantreiben und der Abstimmung von Teilaspekten (z. B. Konstruktion, Verarbeitung, Simulation), bei denen es nicht erforderlich war, dass alle Projektteilnehmer anwesend waren.

#### **I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde**

Die konventionelle Formgebung und Aushärtung von duroplastischen Prepregs basiert auf der Verwendung von Autoklaven in Kombination mit manueller Belegarbeit. Im Autoklavprozess werden die aufgebauten Strukturbauteile unter Druck, Temperatur und Vakuum ausgehärtet. Generell werden hier hochwertige Bauteile mit sehr guten mechanischen Eigenschaften realisiert. Der Autoklavprozess ist jedoch mit einem hohen Kosten-, Zeit- und Arbeitsaufwand verbunden. In den letzten 10 Jahren wurde deshalb die Entwicklung von sogenannten out-of-autoclave Prozessen (OOA) für Prepregs vorangetrieben. Mit diesen ist nahezu die gleiche Qualität und Leistungsfähigkeit, bei zugleich niedrigeren Kosten und kürzeren Zykluszeiten, umsetzbar. Zu den out-of-autoclave Prozessen gehört unter anderem auch das Prepreg Compression Molding, zu Deutsch Stempelformen von Prepregs.

Das Prepreg Compression Molding basiert auf der Ausformung von flächigen und vorimprägnierten Halbzeugen (Prepregs) zu einer dreidimensionalen Bauteilgeometrie mit konstanter Wanddicke. Die Halbzeuge setzen sich aus einer Harzkomponente mit zweistufigem Härterssystem und einer Gewebe- oder Gelegeverstärkung zusammen. Der grundlegende Prozessablauf unterteilt sich in drei Abläufe. Zuerst wird das Halbzeug erwärmt bis das Harz niedrigviskos ist, anschließend erfolgt die dreidimensionale Formgebung des flächigen und biegeschlaffen Halbzeugs mittels Matrize oder Patrize. In der letzten Phase des Prozesses wird das umgeformte Bauteil unter Formzwang und Temperatur ausgehärtet. In Bezug auf den Prozessablauf kann zwischen einem einstufigen und einem mehrstufigen Prozess unterschieden werden. Im einstufigen Prozess findet die Umformung und Aushärtung in einem Werkzeug statt. Beim mehrstufigen Prozess erfolgt der Prozessschritt der Umformung in einem separaten Werkzeug zum Prozessschritt der Konsolidierung und Aushärtung. Die Zykluszeit ist dabei primär von der Aushärtungszeit des Prepregs abhängig. Durch neu entwickelte Prepregs können die Aushärtezeiten auf unter 3 min verkürzt werden. Ein Anwendungsbeispiel für das Verfahren des Prepreg Compression Moldings ist der Ersatz von diversen Alubauteilen durch CFRP im Sichtbereich des Nissan GT-R supercar des Modelljahres 2014. Unter Erhaltung hochwertiger Oberflächen konnten hier Gewichteinsparungen von 40 % realisiert werden.

Die Herstellung von bearbeitungsfreien Bauteilen mit dem Prepreg Compression Molding ist nicht bekannt. In einem nachgelagerten Prozess müssen die Bauteile z. B. noch besäumt und gebohrt werden, so dass eine weitere Anbindung oder Befestigung möglich ist. Die Integration von Rippen ist nach Stand der Technik durch eine Kombination von Fließpressen und Sheet Molding Compounds (SMC) realisierbar. Jedoch ist das Fließpressen in Hinsicht auf die Gestaltungsfreiheit stark limitiert. Im Rahmen des vorausgegangenen Forschungsprojektes SpriForm (BMBF-Verbundprojekt) wurde, unter Beteiligung der Firma Gubesch, bereits das hybride Verfahren SpriForm, auch bekannte als In-Mould Forming, entwickelt. Bei diesem Verfahren steht die Kombination von einer kurzfaserverstärkten Urformkomponente und einer endlosfaserverstärkten Umformkomponente, beides auf thermoplastischer Basis, im Vordergrund. Die Ausformung der Umformkomponente erfolgt durch die Schließbewegung des Spritzgießwerkzeuges. Nach der vollständigen Umformung wird im gleichen Zyklus die Umformkomponente

mit der Urformkomponente angespritzt. Fertigungsbezogene Vorteile des Verfahrens sind neben der Steigerung der Effizienz und der Flexibilität auch die Erhöhung der Designfreiheit und die Verkürzung der Zykluszeiten.

Die Übertragung des Prinzips des SpriForm Verfahrens auf die Verarbeitung von Duroplastwerkstoffen kann nicht ohne weiteres umgesetzt werden. Duroplaste weisen gegenüber Thermoplasten z.B. eine grundlegend andere Verarbeitungscharakteristik auf. Im Forschungsvorhaben FiberSet (BMBF-Verbundprojekt, Beteiligung Fa. Gubesch) wurde eine Wissensbasis im Bereich des Duroplastspritzgießens in Hinblick auf fertigungs- und werkstoffgerechte Bauteilkonstruktion, Werkzeugtechnik und Qualitätssicherung aufgebaut. So wurden zum einen werkstoff- und fertigungsgerechte Konstruktionsrichtlinien entwickelt und zum anderen das Verständnis der Verfahrensabläufe für Duroplaste generiert.

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

Im Rahmen des Projektes war die Firma Gubesch in den Arbeitsgruppen Simulation, Konstruktion, Verarbeitung und Werkstoff tätig. In der Arbeitsgruppe der Bauteilkonstruktion und der Erstellung des Entwicklungsleitfadens ist die Firma Gubesch federführend. Mit dem Einbringen der eigenen Kernkompetenzen fand zusätzlich eine weitreichende Unterstützung in allen Arbeitsgruppen statt. Dies war für den Gesamterfolg des Projektes essenziell und unerlässlich.

Neben dem Konsortium mit den genannten Projektpartnern ist es zur Zusammenarbeit von der Firma Gubesch und der Fa. Raschig gekommen. Fa. Raschig fungierte dabei als assoziierter Partner. Die Zusammenarbeit umfasste neben der Bereitstellung von Material auch die Beratung zu werkstofflichen und verarbeitungstechnischen Fragestellungen der Duroplastformmassen. Durch die projektbegleitende Unterstützung mittels eigenem Knowhow leistete Fa. Raschig ebenfalls einen technisch-wissenschaftlichen Beitrag zur Bearbeitung der Fragestellungen.

## **II. Eingehende Darstellung**

### **II.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele**

Die Fa. Gubesch Thermoforming GmbH, im Weiteren abgekürzt mit Gubesch, brachte sich in mehrfacher Weise in das BMWi-Projekt Duro-IMF ein.

Die Arbeitsschwerpunkte seitens Gubesch lagen in HAP1-(Definition von Bauteil- und Materialanforderungen), HAP2-(Werkstoffauswahl), HAP3-(Zuschnitt-, Handling- und Verarbeitungsversuche; Charakterisierung Gesamtprozess) und HAP4-(Bauteilentwicklung, -konstruktion und -herstellung).

#### **II.1.1 HAP1 Lastenheft**

Aufgrund der Projektübernahme seitens Gubesch von dem ursprünglichen Partner Fa. Crosslink zum Projektmonat 6 lag der Hauptfokus von Gubesch im HAP1 auf der Einarbeitung in das bereits in weiten

Teilen durch den Partner DLR fertiggestellte Lastenheft zur Definition von Bauteilanforderungen. Unter Berücksichtigung von werkstofflichen und verarbeitungstechnischen Aspekten und Restriktionen setzte sich Gubesch intensiv mit neuartigen zu erforschendem Fertigungsverfahren sowie Anforderungen aus dem Bereich der Luft- und Raumfahrt auseinander.

Durch weiterführende Recherchen bezüglich verfügbarer Materialien und möglichen Verarbeitungsstrategien konnte ein intensives Verständnis zur Aneignung der im Lastenheft geforderten luftfahrtspezifischen Anforderungen entwickelt werden. Dabei wurde ein enger Austausch mit den Verbundpartnern und dem federführendem Partner DLR gepflegt.

Die Erkenntnisse aus HAP1 trugen maßgeblich zur Erreichung des MS1 (Werkstoffe erfüllen Lastenheftanforderungen und Haftung wurde erzielt) bei.

Neben der Festlegung der Anwendungsreferenz (einer aerodynamischen Verkleidung der im Triebwerk befindlichen Struts) geht das Lastenheft detailliert auf Bauweiseanforderungen, Thermische Anforderungen und unterschiedliche Lastfälle ein. In Hinblick auf die spätere Materialauswahl wurden folgende wesentliche Kennwerte festgelegt:

- Max. Dauertemperaturbereich: ca. 140°C
- Thermischer Temperaturzyklus: ca. -55°C bis 115 °C (5000 Zyklen)
- Medienbeständigkeiten: nach MIL-STD-810G
- Oberflächengüte:  $R_a=0,2 \mu\text{m}$

### **II.1.2 HAP2 Werkstoff**

Gemäß Lastenheft (HAP1) wurden zur Herstellung von Demonstratoren unterschiedliche Materialien, Materialkombinationen und Zusammensetzungen benötigt. Anhand des Anforderungsprofils wurden für erste Versuche unterschiedliche Werkstofftypen für die endlosfaserverstärkte Umformkomponente ausgewählt.

Im Idealfall sollten die Materialien eine gute mediendichte Anbindung an Metalloberflächen aufweisen, Härtezeiten <3 min und eine Glasübergangstemperatur (TG) von > 140°C erreichen. Die Eigenschaften bezüglich der Anbindung an Metalloberflächen lag in der Tatsache begründet, dass im ersten Ansatz in das Demonstrator-Bauteil ein Metallinsert eingefasst werden sollte. Dieses Metallinsert sollte, wie in Kapitel 6 des Lastenhefts beschrieben, vor Erosion und dem Durchschlagen des Bauteils durch z.B. Steinschlag schützen.

Tabelle 1 zeigt eine Zusammenfassung unterschiedlicher ausgewählter Materialien und deren Eigenschaften gegenüber dem Anforderungsprofil aus dem Lastenheft:

| Material         | Hersteller | Matrixsystem | Prepreg (CF; 0°/90°) | Prepreg (CF; 0°) | Anbindung an Metalloberflächen | TG         | Härtezeiten    |
|------------------|------------|--------------|----------------------|------------------|--------------------------------|------------|----------------|
| Pyrofil #360/361 | Mitsubishi | Epoxid       | Ja                   | Ja               | tbd                            | 170 °C     | <5 min [140°C] |
| Pyrofil #365/366 | Mitsubishi | Epoxid       | Ja                   | Ja               | tbd                            | 125 °C     | <5 min [140°C] |
| E420             | SGL        | Epoxid       | Ja                   | Ja               | tbd                            | 140-150 °C | 3 min [150°C]  |
| HexPly M77       | Hexcel     | Epoxid       | Ja                   | Ja               | tbd                            | 135 °C     | 7 min [120°C]  |
| VTC401           | SHD        | Epoxid       | Ja                   | Ja               | tbd                            | 120 °C     | 15 min [120°C] |
| MTM710-1         | Cytec      | Epoxid       | Ja                   | Ja               | tbd                            | 150 °C     | 3 min [150°C]  |

**Tabelle 1 Materialien und deren Eigenschaften**

Aufgrund des Anforderungsprofils und der entsprechenden Materialeigenschaften wurden für erste Versuche drei unterschiedliche Materialien ausgewählt. Die Beschaffung der Prepreg-Materialien Pyrofil #360/361 (Mitsubishi Rayon), E420 (SGL Carbon) und MTM710-1 (Cytec Solvay Group) erfolgten durch den Verbundpartner LKT, der den Verbund bei den Rohstoffherstellern vertritt.

### II.1.2.1 Lagerkonditionen Prepreg-Materialien

Laut Product Data Sheet der einzelnen Prepreg-Materialien müssen die einzelnen Halbzeuge bei einer Umgebungstemperatur von -18°C gelagert werden, um deren Haltbarkeit zu gewährleisten. Bei Lagerkonditionen von beispielsweise Raumtemperatur (20 °C) würde eine vorzeitige Vernetzung der Epoxidharzsysteme stattfinden, welche die Materialien zur Weiterverarbeitung unbrauchbar macht.

Die entsprechend vorgeschriebenen Lagerbedingungen bei min. -18°C setzten somit die Beschaffung einer Tieftemperatureinrichtung im Hause Gubesch voraus. Zur Anschaffung der entsprechenden Kühleinrichtung wurden unterschiedliche Anforderungen definiert.

Die Trägerhülsen, auf denen die Prepreg-Materialien für das Projekt Duro-IMF geliefert wurden, können gemäß Nachfrage bei einigen Rohstoffherstellern Außendurchmesser von 150 - 350 mm annehmen. Die Kühleinrichtung sollte auch die größten Rollen aufnehmen können. Daher wurde zur Bestimmung der Lagerkapazitäten im Folgenden mit einem Durchmesser von max. 350 mm gerechnet. Ziel war es mindestens zwei Rollen mit einem Trägerhülsendurchmesser von 350 mm oder fünf Spulen mit einem Trägerhülsendurchmesser von 250 mm in einer Tiefkühltruhe aufbewahren zu können.

Im Durchschnitt werden ca. 20 m Prepreg-Material pro Spule geliefert woraus sich die maximalen Außendurchmesser pro Spule wie folgt errechnen lassen:

$$d = 2 \cdot \sqrt{\frac{l \cdot s}{\pi} + \left(\frac{D}{2}\right)^2}$$

*l* = Länge des aufgespulten Materials in mm

*d* = Durchmesser der Spule in mm

$D = \text{Außendurchmesser der Hülse in mm}$

$s = \text{Materialstärke}$

Somit ergeben sich folgende Außendurchmesser für Hülsendurchmesser mit 350 mm und 250 mm:

|                                    |      |      |
|------------------------------------|------|------|
| Außendurchmesser Hülse [mm]        | 350  | 250  |
| Länge aufgespultes Material [m]    | 20   | 20   |
| Materialstärke [mm]                | 0,25 | 0,25 |
| Errechneter Spulendurchmesser [mm] | 359  | 262  |

Sowohl unterschiedliche Kühlzellen mit separatem Kühlaggregat als auch klassische Tiefkühltruhen mit Abmessungen von ca. 1450x550x750 mm können die entsprechenden Anforderungen erfüllen. Aus Kostengründen wurde sich für eine klassische Tiefkühltruhe mit Innenabmaßen von (BxHxT) 1520x757x702 mm und einem regelbaren Temperaturbereich von -14°C bis -26°C entschieden.

### II.1.2.2 Sicherheit im Umgang mit Prepreg-Materialien

Aufgrund der komplexen chemischen Zusammensetzung der verwendeten Epoxid-Harzsysteme müssen entsprechende Sicherheitsvorschriften im Umgang mit den Prepreg-Materialien eingehalten werden. Neben Atemschutz und Hautschutz aufgrund der Chemikalien müssen zusätzlich noch die entsprechenden Verarbeitungsbedingungen (Temperaturen > 120°C) beachtet werden.

Gubesch eignete sich durch intensiven Austausch mit den Materialherstellern sowie Recherche in entsprechenden Werkstoffdokumenten und -dokumentationen detailliertes Wissen im sicheren Umgang mit den zu verwendenden Materialien an.

### II.1.3 HAP3 Grundlagenuntersuchungen

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden Probekörperplatten für spätere Kopfzugversuche erstellt. Die Ergebnisse aus der Probekörperplattenherstellung in Bezug auf Zuschnitt, Handling und Verarbeitungsparametern wurden im weiteren Projektverlauf zur Demonstratorfertigung herangezogen.

Zur Herstellung der Probekörperplatten wurden unterschiedliche Werkzeuge und Vorrichtungen wie beispielsweise eine Modifikation an einem bestehenden Plattenwerkzeug, ein Spannrahmen sowie eine Debulking-Station benötigt, welche durch Gubesch entwickelt, konstruiert und beschafft wurden.

#### II.1.3.1 AP 3.1 Zuschnitt und Handling: Herstellung von Probekörperplatten

##### II.1.3.1.1 Prozesskette zur Herstellung von Probekörperplatten

Die Prozesskette zur Herstellung von Probekörperplatten im duroplastischen Prepeg-Pressverfahren sieht im Wesentlichen fünf Prozessschritte vor.

#### a. Zuschnitt

Wie bereits in Kapitel II.1.2 HAP2 Werkstoff näher erläutert werden die verwendeten Prepreg-Materialien i.d.R. als Rollenware geliefert, was einen entsprechenden Halbzeug-Beschnitt zur Bauteilfertigung notwendig macht.

Um die Materialien zu beschneiden waren unterschiedliche Beschnittwerkzeuge wie Messer, Scheren, Stanzschnitte, Elektromesser, etc. denkbar.

#### b. Stacking

Zum Erreichen der erforderlichen Halbzeugdicke zur Plattenherstellung werden mehrere Lagen Prepreg-Material übereinandergestapelt. Zu beachten ist hierbei eine akkurate Positionierung und die jeweilige Faserausrichtung der Einzellagen.

#### c. Debulking

Debulking ist ein Prozessschritt der vor dem Verpressen der Materialien/ des Stacks stattfindet. Hierbei wird die Luft bzw. Gase aus den Zwischenräumen und Zwischenlagen der beim Stacking aufeinander gestapelten Prepreg-Lagen mittels Unterdruck gezogen.

Ohne Debulking besteht bei der späteren Bauteil- bzw. Probekörperfertigung die Gefahr der Lunkerbildung, des Ablösens der Einzellagen und der Ausbildung inhomogener Oberflächen.

Zur Validierung des Einflusses des Debulking wurden bei der späteren Probekörperplattenherstellung sowohl Proben ohne vorhergehendes Debulking und solche mit Debulking hergestellt.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens DuroIMF wurde seitens Gubesch eine entsprechende Debulking-Station entwickelt und gefertigt.

#### d. Konsolidierung/ Solidifikation

Während der Konsolidierungsphase wird unter Einwirkung von Druck und Temperatur eine Verbindung zwischen den einzelnen Laminatschichten hergestellt. Durch diesen Prozessschritt wird ein Delaminieren der einzelnen Schichten verhindert. Ebenfalls werden Lufteinschlüsse zwischen den einzelnen Lagen eliminiert. Im Idealfall liegt nun ein vollständig imprägnierter, porenfreier Materialverbund vor.

In der Solidifikationsphase reagiert das entsprechende Harzsystem unter Einfluss von Druck und Wärme zu einem festen Materialverbund aus – es bildet sich die Morphologie der duroplastischen Matrix aus. Die zur Aushärtung benötigte Wärme wird über das entsprechende Werkzeug zugeführt. Hier kommen überwiegend Rohrheizsysteme und Medienheizsysteme zum Einsatz.

Im duroplastischen Prepreg-Pressverfahren wird insbesondere mit Drücken von 3-13 MPa und Temperaturen von 120°C-200°C gearbeitet.

#### e. Entformen

Nach vollständiger Aushärtung des entsprechenden Harzsystems wird das Werkzeug geöffnet und das Bauteil kann entnommen werden. Zur Bauteilentnahme können unterschiedliche Entformungssysteme – wie beispielsweise Auswerfersysteme, automatisierte Entnahmesysteme, etc. – zum Einsatz kommen.

Zur Kosteneinsparung, zur einfacheren Ausgestaltung des Probekörperplattenwerkzeugs sowie zur Erhöhung der geometrischen bzw. verfahrenstechnischen Freiheitsgrade im weiteren Verlauf der geplanten Versuche innerhalb AP 3.1 wurde auf ein komplexes Entformungs- bzw. Entnahmesystem verzichtet und somit die Bauteile manuell entnommen.

#### II.1.3.1.2 Zuschnittversuche

Im Rahmen von AP 3.1 wurden Zuschnittversuche mit unterschiedlichen Prepreg-Materialien durchgeführt. Beschnittversuche der verwendeten Materialien bei Lagertemperatur (-18°C) mit manuellen Schneidewerkzeugen (Messer, Schere) zeigten, dass der Beschnitt nur erschwert durchgeführt werden kann. Versuche bei Raumtemperatur hingegen ermöglichten problemlos einen sauberen Schnitt.

Zur Probekörperplattenherstellung wurden ein mehrlagiger Aufbau aus Prepreghalbzeugen erstellt. Hierzu wurden mehrere Einzellagen aus dem entsprechenden Rollenmaterial geschnitten. Um einen gleich-bleibenden Zuschnitt aller Einzellagen zu gewährleisten wurde seitens Gubesch eine Zuschnittschablone erstellt. Anhand dieser Schablone wurden die Einzellagen mittels eines Messers in Form geschnitten. Die Zuschnitte wurden analog zum Plattenwerkzeug auf ein Maß von 300 x 350 mm geschnitten.

Beim Erstellen der Zuschnitte ist darauf zu achten, dass parallel zum Faserverlauf geschnitten wird. Weiterhin muss bei allen Zuschnitten die gleiche Halbzeug-Produktionsrichtung eingehalten werden.

#### II.1.3.1.3 Vorversuche Stacking

Bei Raumtemperatur zeigte sich, dass einzelne übereinander gestapelte Lagen aneinander anhaften was erste Rückschlüsse auf ein gutes Handlingverhalten des Stacks erahnen lässt.

Die Anhaftung der Einzellagen bei Raumtemperatur lässt sich auf die Klebrigkeit - den sog. Tack – zurückführen. Je nach verwendetem Material – insbesondere dem Matrixwerkstoff – lässt sich der Tack über Zuschlagstoffe einstellen. Im Wesentlichen wird zwischen High, Middle und Low Tack unterschieden. Neben den Zuschlagstoffen hängt der Tack von der Viskosität und der Temperatur des Materials ab.

In ersten Vorversuchen waren keinerlei Hilfsmittel zum Stapeln der jeweiligen Einzellagen erforderlich. Zur späteren Herstellung komplexer Stacks mit u.U. unterschiedlichen Faserorientierungen sind Positionier- und Kontrollvorrichtungen denkbar.

### II.1.3.1.4 Debulking Station

Wie bereits in Kapitel II.1.3.1.1 näher erläutert wurde zur späteren Probekörperplattenherstellung eine sog. Debulking Station benötigt. Im Wesentlichen besteht die Debulking Station aus einer Grundplatte und einer Membran zwischen denen der Stack platziert wird. Zwischen Membran und Grundplatte wird ein Vakuum angelegt durch welches Luft bzw. Gase aus dem Stack gezogen werden. Im Rahmen des HAP3 wurde eine Debulking Station seitens Gubesch entwickelt, konstruiert und gebaut (siehe Abbildung 2).



**Abbildung 2 Übersicht Vakuumtisch**

#### ① Silikonmembran in Halterahmen

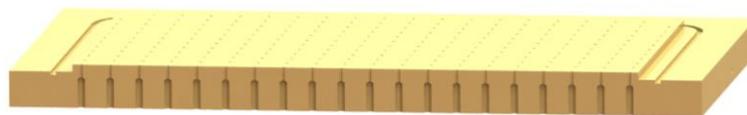
Unter einer Silikonmembran wird mit Hilfe einer Vakuumpumpe der Fa. Becker ein Unterdruck erzeugt. Die Vakuumpumpe erreicht einen minimalen Druck von 150 mbar. Dies entspricht einem Vakuum von 85%. Die Silikonmembran wird an einem Rahmen aus Profilen der Firma Item verklemt. Hierfür wird ein Aluminiumblech mit Nutensteinen, die sich in den Item-Profilen befinden, verschraubt. Die Silikonmembran befindet sich zwischen Rahmen und Aluminiumblech und wird dadurch verklemt und abgedichtet. Mittels dieser Klemmkonstruktion können Membrane in verschiedenen Dicken verwendet werden. Der Rahmen ist an der Grundfläche des Vakuumtischs mit Scharnieren an der Rückseite und Kniehebelspannern an der Vorderseite befestigt. Die Kniehebelspanner sind notwendig, um eine luftdichte Verbindung zwischen der Lochplatte und dem Rahmen mit der Silikonmembran zu erhalten. Zudem ist in der Grundfläche eine Nut mit Dichtschnur eingebracht, die für weitere Dichtung sorgt. Für ein leichteres Öffnen und Schließen des Vakuumtischs sind seitlich am Rahmen zwei Gasdruckfedern und ein Handgriff befestigt (siehe Abbildung 4).



**Abbildung 3 Schnitt durch Vakuumtisch Rahmen**

## ② Lochplatte

Die Grundfläche auf der das zu entlüftende Prepreg-Material aufgelegt wird besteht aus einer Siebdruckplatte, die mit Durchgangsbohrungen mit einem Rastermaß von 20 mm versehen ist. An der Oberseite ist der Durchmesser der Bohrungen mit 2 mm gewählt, um ein Einsaugen des Materials zu vermeiden. Nach 5 mm erweitert sich die Bohrung auf einen Durchmesser von 5mm. Dies ist notwendig, um einen möglichst großen Volumenstrom zu erhalten und somit möglichst schnell Unterdruck zu erzeugen. Die nutzbare Fläche, an der der Unterdruck entsteht, wurde auf 442x392 mm festgelegt. Auf diese Fläche passen somit sowohl die gepressten Platten auf die im Laufe des Berichts eingegangen wird (300x359 mm), als auch der später zu entwickelnde Demonstrator (maximal 220 mm lang, 240 mm breit und 280 mm hoch). Außerhalb der nutzbaren Fläche ist eine Nut, die mithilfe einer Silikonmembran und dem Aluminiumblech den inneren Raum gegen die Umgebung abdichtet. Die Siebdruckplatte wurde später im Projekt aus Gründen der Dichtheit und Haltbarkeit durch eine Aluminiumplatte mit analoger Ausführung ersetzt.



**Abbildung 4 Schnitt durch Vakuumtisch Lochplatte**

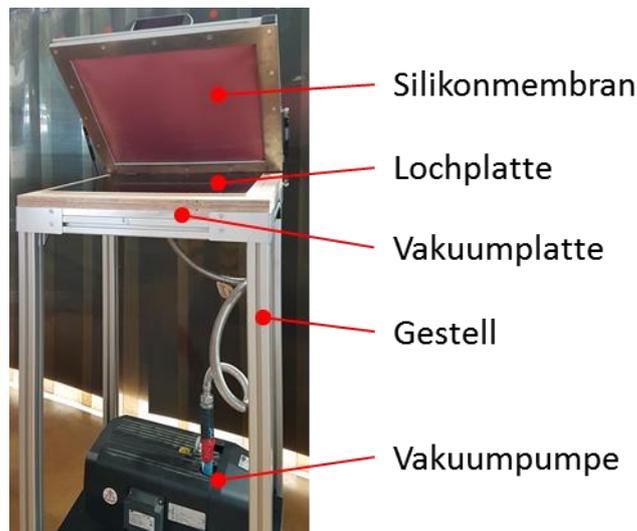
## ③ Nutenplatte

An der Unterseite der Lochplatte ist eine Aluminiumplatte verschraubt. Auf der der Lochplatte zugewandten Seite ist in die Aluminiumplatte ein Raster aus Nuten eingebracht. Anhand dieses Rasters wird eine gleichmäßige Verteilung des Vakuums gewährleistet. Zudem sind die Nuten so gewählt, dass sie Silikondichtschnüre der Dicke 3 mm aufnehmen können und somit ein Bereich abgetrennt werden kann, in dem lokal kein Unterdruck entsteht. Um eine Dichtheit des Gesamtsystems gewährleisten zu können ist umlaufend eine Nut eingebracht in die eine Silikondichtschnur, zur Abdichtung zwischen Lochplatte und Nutenplatte, eingelegt wird. In der Mitte der Aluminiumplatte ist eine Gewindebohrung angebracht, an die die Vakuumpumpe verbunden wird.



**Abbildung 5 Schnitt durch Aluminiumplatte**

Die Debulking Station wurde im Rahmen des Projekts seitens Gubesch vollständig entwickelt, konstruiert und gebaut. Abbildung 6 zeigt die fertig montierte Debulking Station.



**Abbildung 6 Debulking Station Gubesch**

#### II.1.3.1.5 Plattenwerkzeug mit Heizplatten

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden Probekörperplatten für spätere Kopfzugversuche erstellt. Bei der Auslegung der Plattengröße wurde berücksichtigt, dass diese nach dem Pressen Biege- und Zugversuchen unterliegen müssen. Die Abmessungen der Probekörper sind im Folgenden dargestellt.

#### **Zugprobekörper angelehnt an DIN EN ISO 527:**

- Länge: 250 mm
- Breite: 25 oder 50 mm
- Dicke: 1 oder 2 mm
- Anzahl: 4 Stk. pro Platte

#### **Biegeprobekörper angelehnt an DIN EN ISO 14125:**

- Länge:  $80 \pm 2$  mm
- Breite: 15 mm
- Dicke: 1 oder 2 mm
- Anzahl: 4 Stk. pro Platte

### → Herzustellende Platten:

- Länge: 350 mm
- Breite: 300 mm
- Höhe: 1 und 2 mm

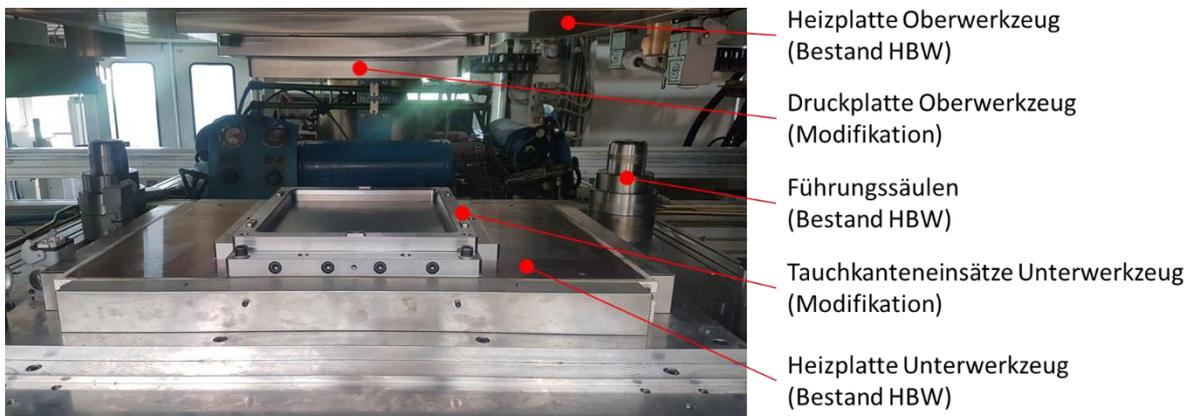
→ Umlaufender Abstand der zu entnehmenden Probekörper: min 25 mm

## Werkzeugspezifikation

### Modifikation Plattenwerkzeug

Um die Kosten zur Probekörperplattenherstellung im Rahmen des AP 3.1 möglichst gering zu halten, wurde bei Gubesch auf ein bereits bestehendes beheizbares Plattenwerkzeug zurückgegriffen. Das bei Gubesch vorhandene Plattenwerkzeug wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens soweit modifiziert, dass es den Anforderungen zur Verarbeitung von duroplastischen Prepregmaterialien genügt. Hierzu wurden Tauchkanteneinsätze in das bestehende Werkzeug eingebracht um die entsprechende Werkzeugabdichtung während der Verarbeitung zu gewährleisten und in den späteren Probekörperplatten eine konstanten und definierten Faservolumengehalt zu erhalten.

Abbildung 7 zeigt das bestehende beheizbare Plattenwerkzeug mit entsprechender Modifikation. Herausforderungen in den entsprechenden Modifikationen liegen hierbei in einem möglichst homogenen Wärmeübergang zwischen Heizplatten und Tauchkanteneinsätzen, sowie in der passgenauen Abstimmung zwischen Ober- und Unterwerkzeug.



**Abbildung 7 Modifikation des beheizten Plattenwerkzeugs**

### Werkzeugdaten:

- Werkzeugart: beheizbares Plattenpresswerkzeug mit Tauchkanteneinsätzen
- Werkzeuggröße (Modifikation): 490 x 440 x 126 mm
- Werkstoff (Modifikation): 1.2162

- Bauteilgröße (Probekörperplatte): 300 x 350 mm mit einer Dicke von 1 mm oder 2 mm (Einstellung der Probekörperplattendicke über Distanzplatten und Fühlerlehrenband)
- Einsatztemperatur: 100°C bis 170°C

## **Besonderheiten**

### **a) Variable Bauteildicke**

Anhand von Distanzplatten können im Werkzeug unterschiedliche Bauteil-/ Probekörperplattendicken realisiert werden.

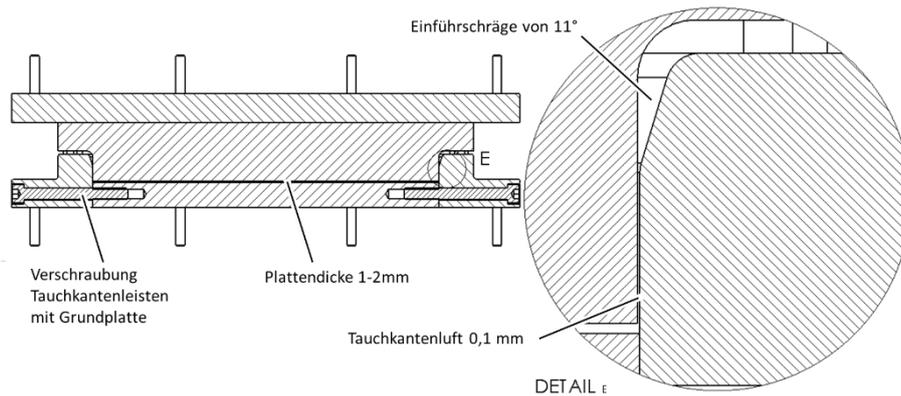
Aufgrund der Werkzeug-/ bzw. Verarbeitungstemperaturen von 100 bis 190°C war es notwendig, dass die entsprechenden Distanzplatten auf die Längenänderungen bei erhöhten Temperaturen ausgelegt wurden. Eine abweichende oder fehlerhafte Auslegung der Distanzplatten und somit eine Abweichung des Werkzeugspalts der die spätere Bauteildicke abbildet, kann im Bauteil zu unterschiedlichsten Fehlerbildern wie einem schlechten Konsolidierungsgrad, inhomogenen Oberflächen, einem inhomogenen Faservolumengehalt u.a. führen.

Aus Voruntersuchungen entsprechender Prepregmaterialien durch den Verbundpartner LKT zeigten, dass ab 190°C keine schnellere Aushärtung mehr stattfindet (Messungen anhand HexPly M77 Fa. Hexcel). Als optimale Aushärtetemperatur wurde ein Bereich von um 170°C definiert, welcher auch zur Auslegung der einzelnen Werkzeugkomponenten herangezogen wurde. Bei einer Aushärtetemperatur von ca. 170°C werden nahezu identische Aushärtezeiten und Aushärtungsgrade wie bei 190°C erreicht, wobei bei 170°C ein deutlich geringer Energieaufwand zum Beheizen des entsprechenden Werkzeugs notwendig ist.

### **b) Auslegung Tauchkanten**

Während des Schließvorgangs des Werkzeugs taucht die Oberwerkzeughälfte in die Tauchkanten des Unterwerkzeugs ein. Um eine Beschädigung sowohl der Tauchkanten als auch der Druckplatte während des Schließvorgangs zu vermeiden muss ein minimaler Spalt zwischen Tauchkante und Druckplatte eingehalten werden – die sog. Tauchkantenluft. Während bei Tauchkantenwerkzeugen zur Verarbeitung thermoplastischer Werkstoffsysteme i.d.R. eine Tauchkantenluft von ca. 0,3 mm gewählt wird musste aufgrund der niedrigen Viskosität bei duroplastischen Werkstoffsystemen ein geringer Werkzeugspalt gewählt werden.

Gemäß einschlägiger Literatur (Bsp. AVK Handbuch Faserverbundkunststoffe) wurde die Tauchkantenluft im vorliegenden Werkzeug auf 0,1 mm ausgelegt. Somit wurde vermieden, dass größere Mengen des Matrixsystems in den Werkzeugspalt eindringen und die beiden Werkzeughälften bei der Aushärtung verkleben. Weiterhin kann ein konstanter und definierter Faservolumengehalt in den Probekörperplatten gewährleistet werden.



**Abbildung 8 Schnitt durch das Tauchkantenwerkzeug**

### c) Wärmeauslegung

Zur genauen Ermittlung der auftretenden Wärmeausdehnung, der homogenen Wärmeverteilung und auftretender Eigenspannungen im Werkzeugaufbau aufgrund erhöhter Temperaturen wurde seitens Fa. Schmidt WFT eine entsprechende Wärmesimulation erstellt. Die Simulationsergebnisse dienen zum einen zur Werkzeugauslegung, zum anderen zur Prozessentwicklung. Wichtige Prozessparameter wie beispielsweise Aufheizzeiten, Temperaturverteilungen, etc. wurden ermittelt und mit realen Prozessbedingungen verglichen.

Um die notwendige Vor- bzw. Aufheizzeit der Heizplatten des Werkzeugs bis zur homogenen Temperaturverteilung sowie der Homogenität der Temperaturverteilung selbst zu untersuchen wurde eine Aufheizanalyse durchgeführt.

Oberflächentemperaturen und Temperaturverteilung der Heizplatten wurden hierbei mittels einer Infrarotkamera der Fa. FLIR (Typ Thermacam e45) aufgezeichnet. Weiterhin wurde zur Verbesserung der Auflösung und zur Eliminierung von Reflektionen und Spiegelungen halbseitig (in den Infrarotaufnahmen (

Abbildung 9) auf der linken Werkzughälfte zu erkennen) auf die zu untersuchende Heizplatte ein Thermografiespray (Graphitspray) aufgebracht.

Die folgende

Abbildung 9 zeigt die Temperaturen und Temperaturverteilung in Abhängigkeit von der Zeit auf der Heizplattenoberfläche:

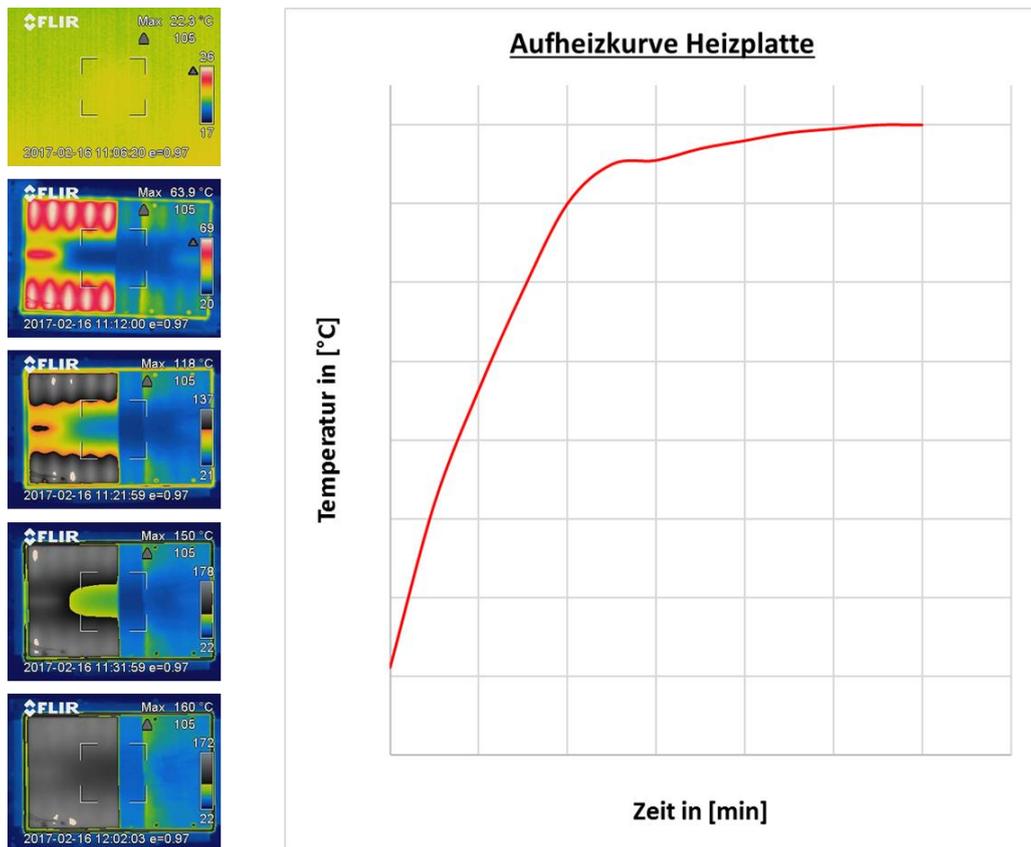


Abbildung 9 Aufheizanalyse Heizplatten

#### d) Montage

Aufgrund der geringen Tauchkantenluft von 0,1 mm muss eine positionsgenaue Zentrierung von Oberwerkzeug zu Unterwerkzeug gewährleistet sein. Hierzu sind außerhalb der Bauteilkavität Montagezentrierungen sowohl in den Tauchkanteneinsätzen als auch in der Druckplatte eingearbeitet. Beim späteren Pressprozess wurden diese entfernt, um zum einen eine Beschädigung der Zentrierungen durch Presskräfte zu vermeiden und zum anderen die Wärmeausdehnung der Werkzeugkomponenten während des Heizvorgangs zuzulassen.

##### II.1.3.1.6 Herstellung von Probekörperplatten

Ziel der Probekörperplatten-Herstellung war die Validierung des Gesamtprozesses. Hierzu wurden bei Gubesch Probekörperplatten unter Variation des Druckes, der Temperatur und der Aushärtezeit gefertigt. Um Aufschlüsse auf den notwendigen Werkzeug-/ Konsolidierungsdruck zu gewinnen wurden die Probekörperplatten zunächst durch Gubesch optisch hinsichtlich Fehlstellen und Oberflächenqualität beurteilt. Weiterhin wurden die Plattendicken ermittelt und bewertet.

Zur Validierung der optimalen Aushärtetemperaturen und Aushärtezeiten wurden die entsprechenden Probekörperplatten von Projektpartner LKT hinsichtlich des Aushärtegrades untersucht.

Durch die bereits in HAP2 gewonnenen Erkenntnisse der Materialanalyse (LKT), den Forderungen aus dem Bauteil-Lastenheft (DLR) und den Verarbeitungsrichtlinien durch den Materialhersteller ergaben sich zu untersuchende Aushärtetemperaturen zwischen >140 °C und <180 °C. Die entsprechend zu untersuchenden Aushärtezeiten ergaben sich ebenfalls aus den bereits gewonnenen Erkenntnisse der Materialanalyse (LKT), aus den Verarbeitungsrichtlinien durch den Materialhersteller sowie aus dem Projektziel Zykluszeiten von < 180 s zur erreichen

Tabelle 2 zeigt den Versuchsplan zur Plattenherstellung:

| Versuchsplan Plattenwerkzeug Duro-IMF |                    |     |     |                     |     |     |                             |    |    |    |
|---------------------------------------|--------------------|-----|-----|---------------------|-----|-----|-----------------------------|----|----|----|
| Probenkennung                         | Temperatur in [°C] |     |     | Aushärtezeit in [s] |     |     | Werkzeuginnendruck in [bar] |    |    |    |
|                                       | 150                | 160 | 170 | 90                  | 180 | 300 | 5                           | 15 | 20 | 25 |
| #3.1                                  | •                  |     |     |                     |     | •   | •                           |    |    |    |
| #3.4                                  | •                  |     |     |                     |     | •   |                             | •  |    |    |
| #3.5                                  | •                  |     |     |                     |     | •   |                             |    | •  |    |
| #3.6                                  | •                  |     |     |                     |     | •   |                             |    | ↓  | •  |
| ⋮                                     | ⋮                  | ⋮   | ⋮   | ⋮                   | ⋮   | ⋮   | ⋮                           | ⋮  | ↓  | ⋮  |
| #4.3                                  |                    | •   |     | •                   |     |     |                             |    | •  |    |
| #3.8                                  |                    | •   |     |                     | •   |     |                             |    | •  |    |
| #3.9                                  |                    | •   |     |                     |     | •   |                             |    | •  |    |
| #4.0                                  |                    |     | •   | •                   |     |     |                             |    | •  |    |
| #4.1                                  |                    |     | •   |                     | •   |     |                             |    | •  |    |
| #4.2                                  |                    |     | •   |                     |     | •   |                             |    | •  |    |

Tabelle 2 Versuchsplan Plattenherstellung

### Ergebnisse

Durch die Versuchsreihen konnte festgestellt werden, dass bei einer Presskraft unter 20 bar keine ausreichende Konsolidierung auftritt und somit Fehlstellen auf der Bauteiloberfläche entstehen (Abbildung 10).

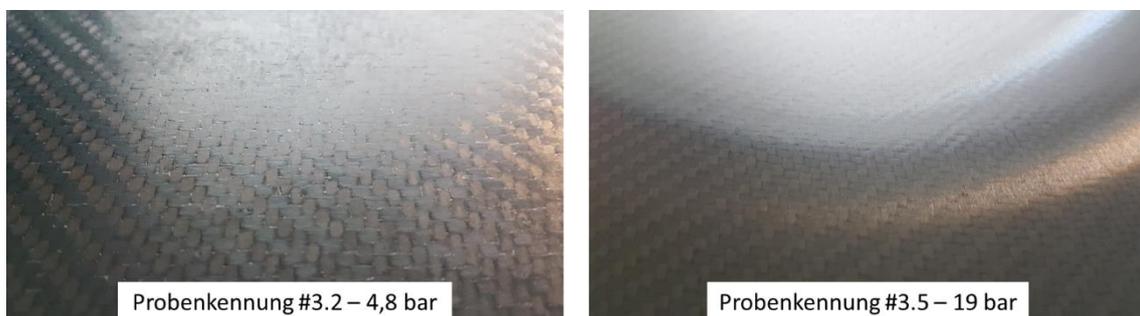


Abbildung 10 Oberflächenqualität bei unterschiedlichen Drücken

Zur Untersuchung des Aushärtegrades des duroplastischen Matrixsystems in Abhängigkeit der Aushärtetemperatur und der Aushärtezeit wurden entsprechende Analysen durch den Projektpartner LKT

durchgeführt (Proben #3.7 bis #4.4). Die Ergebnisse dienen zur Ableitung des Gesamtprozesses (Druck, Temperatur, Zeit) zur Herstellung des Demonstrators in HAP 4.

Zur Validierung der optimalen Aushärtetemperatur und Aushärtezeit wurden am Lehrstuhl für Kunststofftechnik thermische Analysen (dynamische Differenzkalorimetrie (DSC) und dynamisch-mechanische Analysen (DMA)) durchgeführt.

Über DSC-Messungen ist es zum einen möglich Aufschluss über noch nicht reagierte Anteile im zu untersuchenden Probekörper zu erhalten, welche wiederum Hinweise auf den Aushärtegrad geben. Zum anderen wird anhand der DSC-Messung die entsprechende Glasübergangstemperatur ( $T_g$ ) des Probekörpers bestimmt.

Die Messproben wurden hierbei aus den durch Gubesch hergestellten, und zumindest teilweise während der Verarbeitung ausgehärteten Probekörperplatten entnommen. Die jeweilige Probenkennzeichnung Temperatur, Zeit, Druck bezieht sich auf die jeweiligen Herstellungsparameter (SOLL-Werte) der Probekörperplatten.

Aus den gemessenen DSC-Kurven der ersten Aufheizanalyse (Abbildung 11) kann auf den Fortschritt der Aushärtereaktion des Epoxid-Harzsystems geschlossen werden.

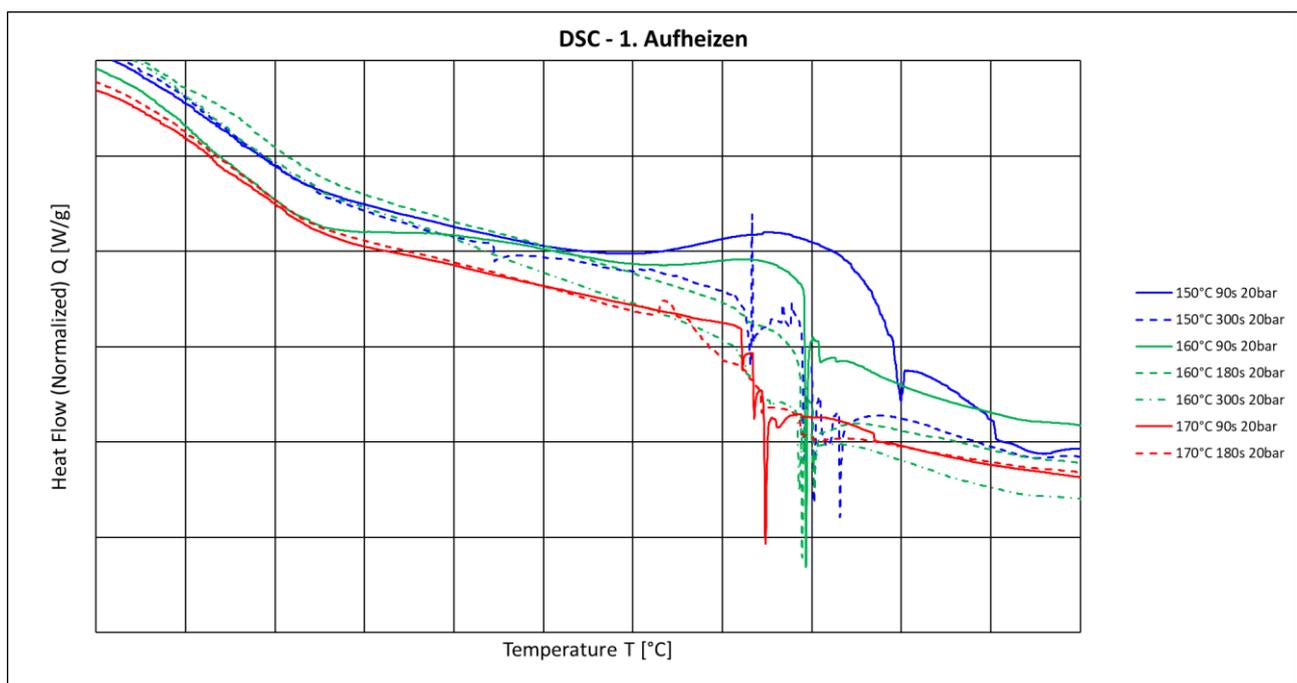
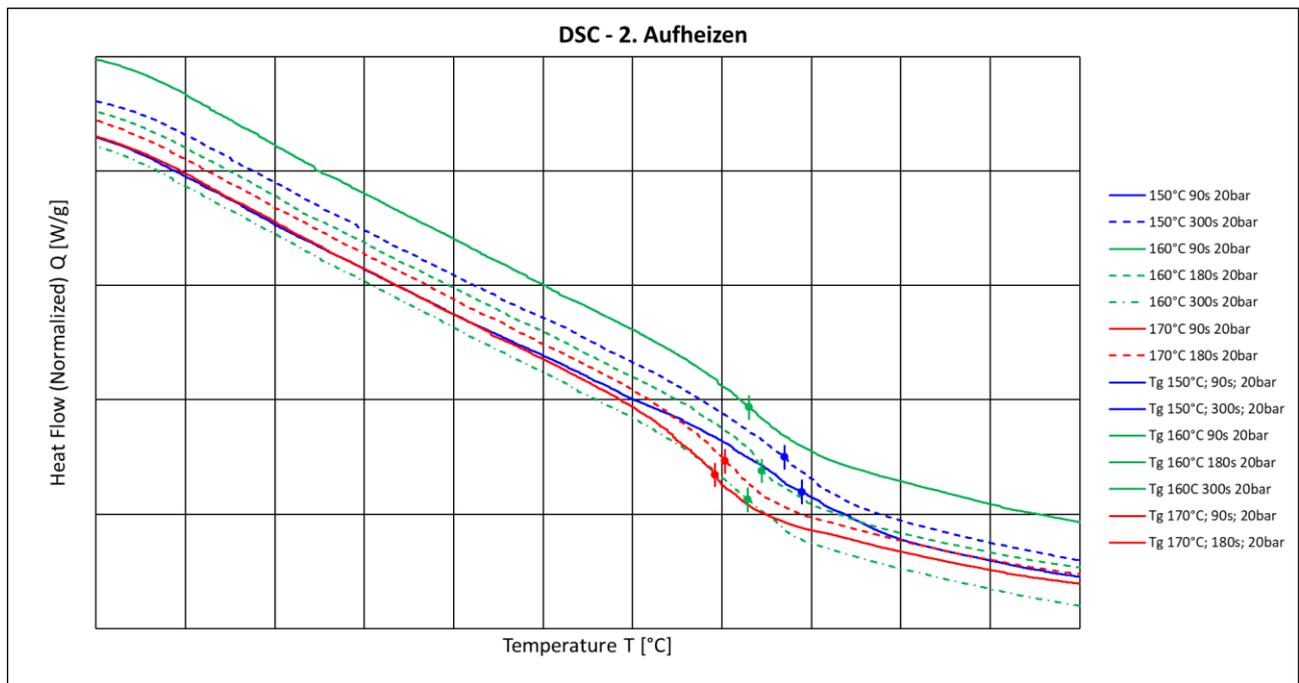


Abbildung 11 DSC-Analyse 1. Aufheizen

Aus der zweiten Aufheizanalyse (Abbildung 12) lassen sich die jeweiligen Glasübergangstemperaturen  $T_g$  des Epoxid-Harzsystems nach der größtenteils abgeschlossenen Aushärtung ermitteln. Die Kurven zeigen mit Anstieg der Aushärtetemperatur bei der Plattenherstellung einen Abfall der Glasübergangstemperatur, was wiederum auf eine Schädigung des Harzsystems bei Aushärtetemperaturen nahe des  $T_g$  schließen lässt.



**Abbildung 12 DSC-Analyse 2. Aufheizen**

Um die Ergebnisse zur Glasübergangstemperatur aus der DSC-Analyse zu validieren wurden weiterhin die entsprechenden DMA-Analysen herangezogen.

Die jeweiligen DSC- und DMA-Analysen zeigen, dass Aushärtetemperaturen nahe des Tg (~160 °C) das Harzsystem schädigen und somit der Tg des ausgehärteten Harzsystems sinkt. Die Aushärtetemperatur ist somit ≤160 °C zu wählen.

Weiterhin ist festzuhalten, dass Aushärtezeiten von ~90 s ungenügend für eine vollständige Aushärtung des Harzsystems sind. Die Aushärtezeit muss somit deutlich über 90 s bis max. 180 s gewählt werden. Um Aufschluss auf die optimale Aushärtezeit zu bekommen müssen weitere Versuche mit Aushärtezeiten zwischen 90 s und 180 s durchgeführt werden.

In Hinblick auf die Herstellung der Probekörper aus AP3.2, AP3.3 und des Demonstrators (HAP4) können aus den entsprechenden Untersuchungen folgende Prozessparameter als optimal für den Gesamtprozess abgeleitet werden:

| Parameter  | Bemerkung                  | Verarbeitungsfenster | Ziel                   |
|------------|----------------------------|----------------------|------------------------|
| Druck      | Werkzeuginnendruck         | 5 bar bis 25 bar     | so klein wie möglich   |
| Temperatur | Aushärtetemperatur Prepreg | 140 °C bis 180°C     | so niedrig wie möglich |
| Zeit       | Aushärtezeit Prepreg       | 90 s bis 300 s       | <180 s                 |

**Tabelle 3 Prozessparameter Gesamtprozess**

### **II.1.3.2 AP 3.2 Haftungsuntersuchungen: Herstellung des Rippenprüfkörpers**

Gubesch hat sich in enger Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern Siebenwurst, Schmidt WFT und LKT an der Erstellung des Lastenhefts für den Rippenprüfkörper beteiligt. Gubesch hat sich besonders bei den Themen hydrostatische Betrachtung durch Sensoren und deren Lage, sowie Größe des Einlegers und verschiedene Angussituation eingebracht. Besonderes Augenmerk wurde auf die Möglichkeit zur Erarbeitung von Wirkzusammenhängen bei dem zu untersuchenden neuartigen Verfahrensansatz gelegt. Diese Themen wurden durch den Projektpartner LKT im Lastenheft festgehalten.

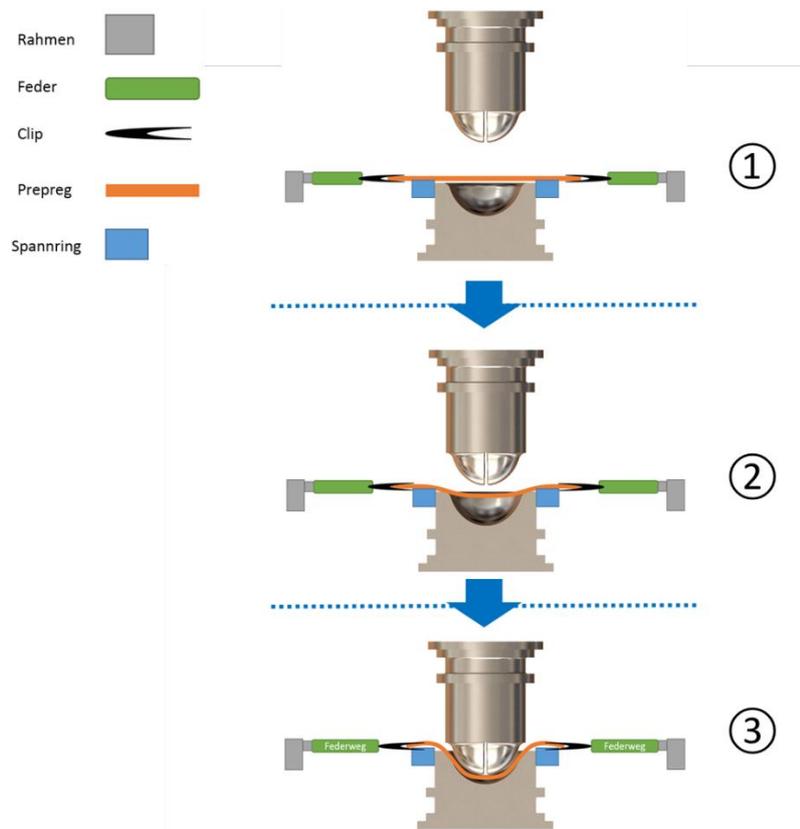
### **II.1.3.3 AP 3.3 Umformbarkeit und Gesamtprozess**

Die aus der Verarbeitung ebener Prepregzuschnitte gewonnenen Erkenntnisse aus AP3.1 wurden in AP3.3 genutzt, um dreidimensionale Bauteile, wie die Kalotte herzustellen. Dabei wurde das zugeschnittene Prepreg zu einer Halbkugel umgeformt.

Um die entsprechenden Prepregmaterialien reproduzierbar zu handeln und dem Werkzeug zuzuführen war ein spezielles Handling- und Aufnahmesystem erforderlich. Das Handling der Prepregsysteme stellte eine besondere wissenschaftlich-technische Herausforderung dar, insbesondere vor dem Hintergrund der temperaturabhängigen Viskosität der Halbzeuge. Es wurde daher ein temperierbarer Spannrahmen zur Verfügung gestellt der eine sichere und reproduzierbare Handhabung als auch isotherme Temperaturführung vor und während der Umformung der Materialien gewährleistet.

#### **II.1.3.3.1 Spannrahmen**

In Vorbereitung auf AP 3.3 wurde dieser Spannrahmen durch Gubesch entwickelt und ausgelegt. Das Prepreg wurde im Spannrahmen durch Clips, welche über Federn mit dem Spannrahmen verbunden sind, auf Spannung gehalten. Ein beheizter Spannring in der Mitte des Spannrahmens sorgte für homogene Spannungen im Material während der Umformung und verringert so die Faltenbildung beim Umformprozess. Eine schematische Darstellung des Umformprozesses verdeutlicht die Funktionsweise des Spannrahmens:



**Abbildung 13 Umformung Prepreg zur Herstellung Kalotte**

Abbildung 13 zeigt schematisch die Umformschritte sowie die Funktionen des Spannrahmens bei der Herstellung der Kalotte:

- ① Das noch ungeformte Prepreg wird in einem definierten Abstand zum Kalottenwerkzeug von den Clips festgehalten. Dabei ist das Prepreg über dem Ring schon geringfügig vorgespannt.
- ② Während der Umformung wird das Prepreg über Federn auf Spannung gehalten, nachgeführt und über den Spannring gezogen. Der Spannring wirkt der Faltenbildung während der Umformung entgegen und sorgt somit für einen umlaufend homogenen Einlauf des Prepregs in die Kavität. Um während der Umformung eine homogene Temperaturführung zu gewährleisten wird der Spannring zusätzlich mittels eines Rohrheizkörpers auf konstanter Temperatur gehalten. Somit ist ein Wärmeverlust des Prepregs beim Gleiten über den Spannring auszuschließen. Hierbei werden die Federkräfte so ausgelegt, dass kein Schlupf zwischen Prepreg und Clips entsteht.
- ③ Im Endzustand ist das Prepreg vollständig umgeformt und wird weiterhin vom Spannrahmen gehalten.

Zur Bestimmung der Haltekraft der Clips, sowie zur Auslegung der entsprechenden Federn des Spannrahmens wurden seitens Gubesch Zugversuche in Abhängigkeit der Temperatur durchgeführt aus welchen die Kraft bis zum Schlupf zwischen Clip und Prepreg ermittelt wurde.

## Versuchsaufbau

Zur Bestimmung der Kraft bis zum Abgleiten des Halteclips auf dem Prepreg wurden Probekörper mit einer Größe von 40x50 mm hergestellt. Des Weiteren wurden vier Zuschnitte aufeinandergestapelt, um die später für das Kalottenwerkzeug notwendige Wandstärke von 1 mm darzustellen. Der Versuchsaufbau sieht vor, dass der entsprechende Probekörper einseitig in einer Universalprüfmaschine (ZWICK M250) eingespannt wird. Auf der jeweiligen Gegenseite wird der Probekörper in dem zu verwendenden Clip eingespannt der wiederum in der Zugprüfmaschine eingespannt ist. Während der Zugprüfung wird der Kraft-Weg-Verlauf bis zum Abgleiten des Clips auf dem Prepreg bestimmt und aufgezeichnet. Abbildung 14 zeigt den schematischen Versuchsaufbau:

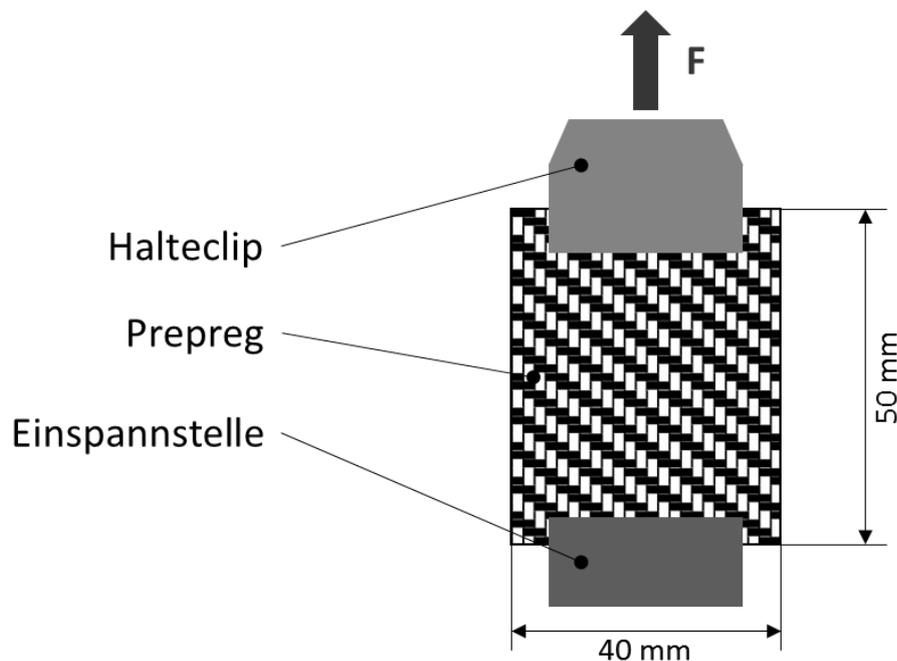


Abbildung 14 Versuchsaufbau Zugversuch

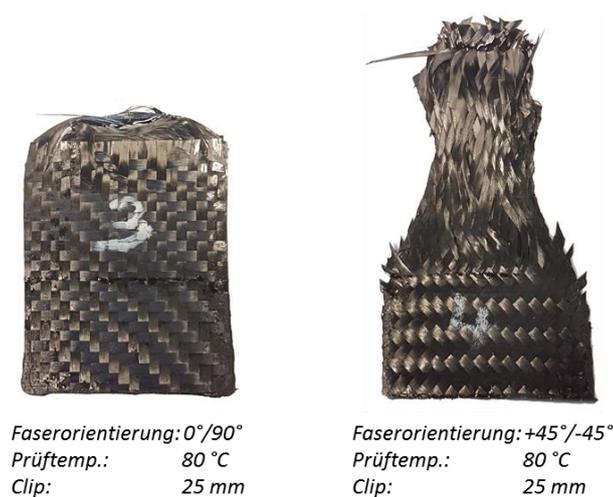
Im Rahmen der Zugversuche wurden verschiedene Parameter variiert. Getestet wurden drei unterschiedliche Größen an Halteclips (15 mm, 19 mm und 25 mm) (Abbildung 7). Weiterhin wurde die Faserrichtung in Zugrichtung variiert ( $0^\circ/90^\circ$  sowie  $+45^\circ/-45^\circ$ ). Um den Einfluss steigender Prepreg-Temperatur und der damit sinkenden Viskosität in Bezug zur Haltekraft der Clips zu setzen wurden zudem Versuche bei Raumtemperatur und bei  $80^\circ\text{C}$  durchgeführt.

## Auswertung

Bei Raumtemperatur können bei Clipbreiten von 19 mm und 25 mm die höchsten Kräfte erzielt werden. Hierbei ist zu beachten, dass die Faserorientierung keine Rolle spielt. Wie gewünscht gleitet der Clip nach Erreichen der Maximalkraft über den Prepreg. Bei Raumtemperatur ist weder Scherung des Prepregs noch Faserschlupf (Verschiebung) zu beobachten.

Versuche bei 80°C Prepreg-Temperatur zeigen deutlich niedrigere Kräfte. Weiterhin ist bei erhöhter Temperatur und damit erhöhter Viskosität zu beachten, dass kein Abgleiten des Clips auf dem Prepreg stattfindet. Bei unterschiedlicher Faserorientierung sind unterschiedliche Versagensbilder am Prepreg zu beobachten. Bei erhöhter Temperatur (80 °C) ist an den 0°/90° Proben Faserschlupf der 90° Fasern zu erkennen. Anhand der +45°/-45° Proben ist Faserschlupf sowie zur Scherung des Prepregs an der Einspannstelle des Halteclips festzustellen.

Abbildung 15 zeigt das Versagensbild bei 80°C anhand einer Probe mit 0°/90° und +45°/-45° Faserorientierung zur Einspannstelle:

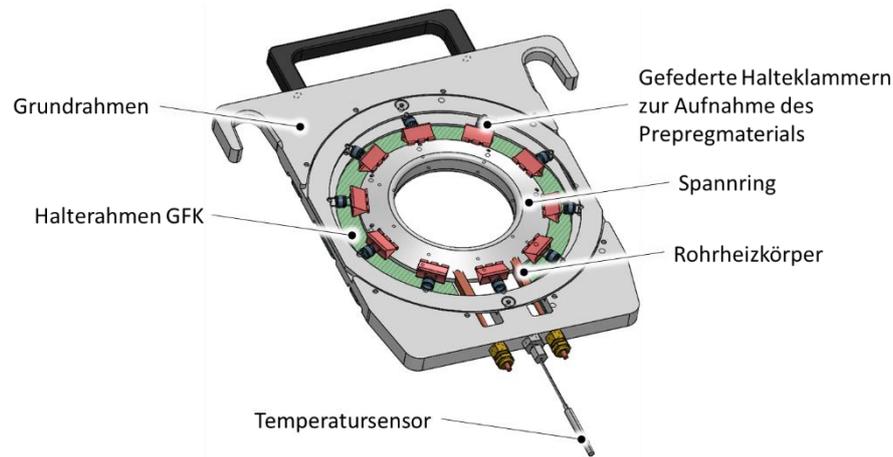


**Abbildung 15 Versagensbild Probekörper bei 80°C**

In Hinblick auf die die jeweiligen Clipgrößen ist festzuhalten, dass bei erhöhter Temperatur mit einer Clipbreite von 19 mm die höchsten Kräfte übertragen werden können.

Die Ergebnisse zeigten, dass eine Temperierung des Prepregs auf 80 °C während des Handlings im Spannrahmen nicht zielführend ist. Weitere Untersuchungen zur Temperierung des Spannrahmens wurden innerhalb der Prozessvalidierung durch den LKT anhand des erstellten Spannrahmens durchgeführt.

Im Wesentlichen besteht der Spannrahmen aus einem Grundrahmen zur Aufnahme der übrigen Komponenten Halterahmen, Spannring und Halteklammern (Abbildung 16).



**Abbildung 16 Spannrahmen zur Herstellung des Kalotten-Probekörpers**

Der Spannrahmen wurde zur Herstellung des Kalotten-Probekörpers auf die Führungssäulen des entsprechenden Umform-Werkzeugs aufgesetzt und hielt während des Umformprozesses das Prepregmaterial in Position. Ein eingebrachter Temperatursensor dient zur Überwachung und Regelung der Temperaturführung des Spannringes. Abbildung 17 zeigt den durch Gubesch erstellten Spannrahmen mit Prepreg:

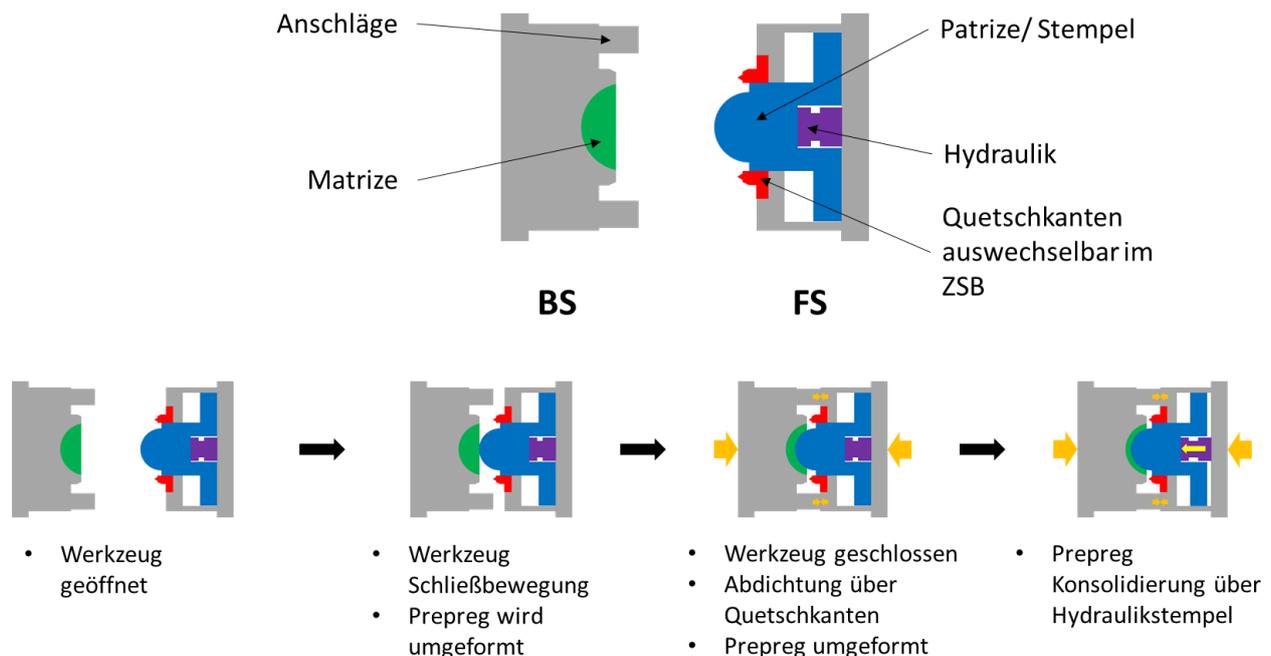


**Abbildung 17 Spannrahmen mit Prepreg**

#### II.1.3.3.2 Lastenheft Kalottenwerkzeug

Im Rahmen der Herstellung 3-dimensional umgeformter Probekörper (Kalottenwerkzeug) wurde seitens Gubesch in Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern Siebenwurst, Schmidt WFT und LKT das Lastenheft zur Erstellung des Kalottenwerkzeugs hinsichtlich des Prozessablaufs erarbeitet. Insbesondere wurde hierbei Augenmerk auf ein möglichst einfaches Werkzeugkonzept zur Ermöglichung einer

robusten Prozessführung gelegt. Das Werkzeugkonzept sah vor, die Konsolidierung des Prepreg-Materials erst nach vollständiger Abdichtung der Kavität zuzulassen. Vorteil des neuartigen Werkzeugkonzepts ist die Gewährleistung eines konstanten und definierten Faservolumengehalts in den herzustellenden Probekörpern. Hierbei kam ein hydraulisch betätigter Stempel (Patrize) zum Einsatz, der eine Stempelbewegung in Maschinenschließrichtung ermöglicht. Die Abdichtung der Kavität erfolgt über die Maschinenschließbewegung und entsprechende Abdichtelemente. Abbildung 18 zeigt schematisch den werkzeugseitigen Prozessablauf:



**Abbildung 18 Prozessablauf Kalottenwerkzeug**

#### II.1.4 HAP4 Umsetzung des Gesamtprozesses und der Bauteilkonstruktion

Die Arbeitsschwerpunkte im Rahmen des HAP 4 liegen seitens Gubesch in der Bauteilkonstruktion sowie der Erstellung eines Entwicklungsleitfadens (AP4.1).

Die Hauptanforderungen an den zu entwickelnden Demonstrator sind die Reduzierung der Prozessschritte und Prozesszeiten in der Bauteilherstellung und eine damit verbundene Reduzierung des Energieverbrauchs. Ein weiterer Hauptaspekt der neuartigen Fertigungstechnologie und Materialkombination ist die Reduzierung des Bauteilgewichts und somit die Einsparung von Energie im Flugbetrieb. Als Gewichtsreferenz wird eine aus Aluminium gefertigte aerodynamische Verkleidung herangezogen.

Weiterhin brachte sich Gubesch im Rahmen des HAP4 in die Arbeitspakete AP4.2 (Werkzeugbau) und in AP4.3 (Fertigung) ein.

### II.1.4.1 AP4.1 Bauteilkonstruktion Demonstrator

Aufgrund der beim LKT zur Verfügung stehenden Anlagen wurden die Dimensionen des Demonstratorbauteils durch die maximale Zuschnittgröße von 280 mm x 240 mm (H x B) begrenzt.

Auf Basis des Profils NACA\_66\_018 (siehe Abbildung 19) wurde als Anwendungsfall ein generisches Turbofan Triebwerk der Schubklasse von ca. 70 kN herangezogen.

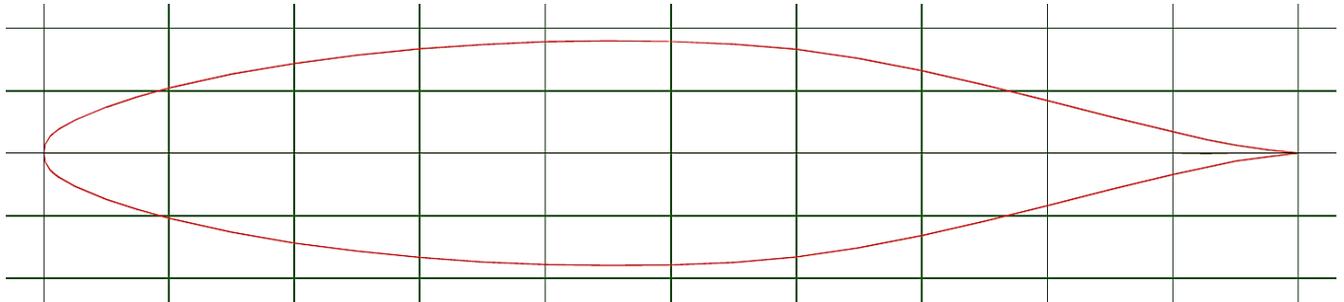


Abbildung 19 Profil NACA\_66\_018

Wie im Bauteil-Lastenheft (HAP 1) beschrieben ergeben sich weitere physikalische als auch mechanische Hauptanforderungen an das Bauteil. Zur konstruktiven Auslegung des Demonstratorbauteils spielen hierbei folgende mechanische Anforderungen eine Rolle:

- Aerodynamische Last
- Lasten durch Kerntriebwerk
  - Verschiebung entlang Triebwerksachse resultierend aus Schub durch das Kerntriebwerk (Lastfall 1)
  - Verschiebung in radialer Richtung durch das Gewicht des Kerntriebwerks (Lastfall 2)
  - Verschiebung in Umfangsrichtung durch Torsionslast im Kerntriebwerk bei Beschleunigung/ Entschleunigung (Lastfall 3)
- Dynamische Lasten
  - Low Cycle Fatigue
  - High Cycle Fatigue
- Impact
  - FOD (Einschlag von Vogelteilen, Hagel oder Steinschlag)
  - Erosion

Im ersten Entwicklungsschritt wurde die Grundauführung des Demonstratorbauteils definiert. Hierbei wurde der Demonstrator aus einer äußeren äußeren Halbschale aus dem umgeformten, endlosfaserverstärktem Prepreg mit angespritzter Rippenstruktur und Endabschlüssen aus duroplastischer Formmasse aufgebaut.



## Auslegung Rippenstruktur

Die urgeformte Rippenstruktur dient zur Abstützung und Verstärkung des Bauteils sowie zu Gewährleistung definierter äußerer Rand- und Endbereiche um eine nacharbeitsfreie Bauteilherstellung zu realisieren. Weiterhin können über die angeformte Spritzgusskomponente Funktionalisierungen wie beispielsweise Anschraubpunkte und Fügegeometrien eingebracht werden.

Grundwandstärke der Rippen ist in wenig beanspruchten Bereichen 1 mm und steigt über die erforderliche Auszugskonizität von  $\geq 2^\circ$  auf bis zu 4 mm im Rippengrund an (Abbildung 22).

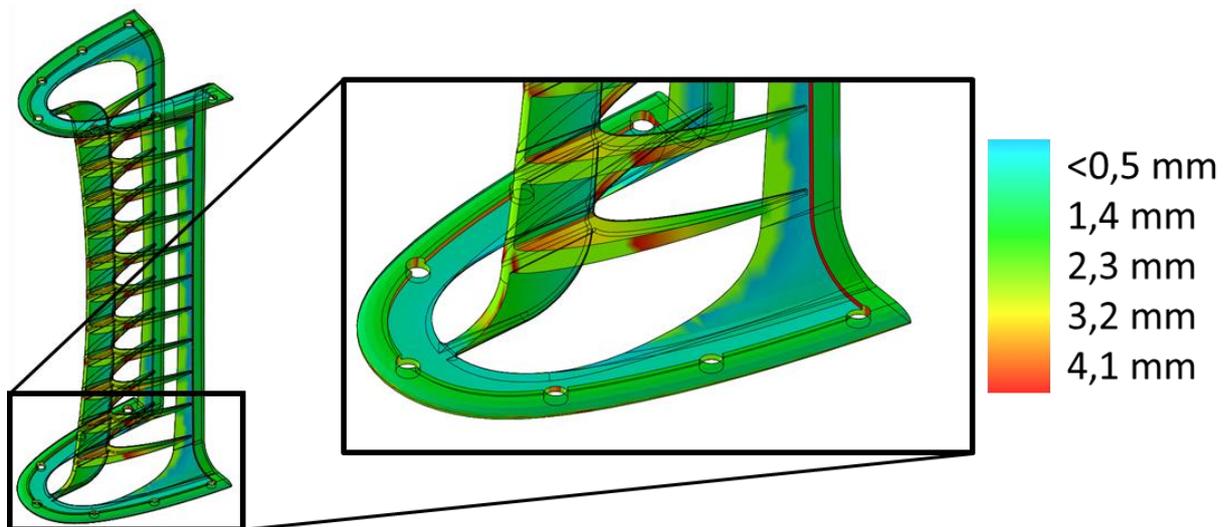


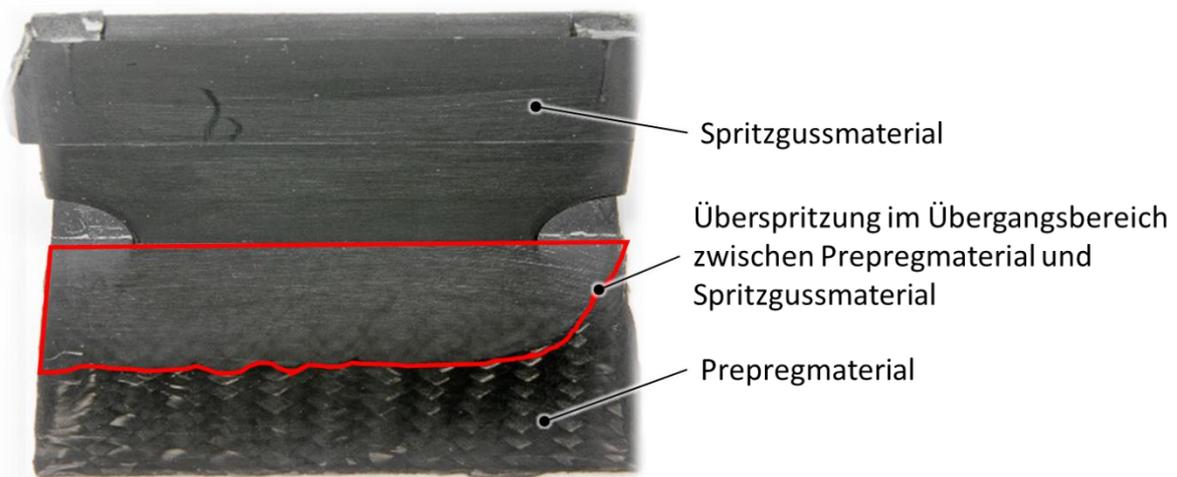
Abbildung 22: Wandstärkenanalyse

Tabelle 4 zeigt eine Übersicht der Bauteildaten zur Grundaufführung des Demonstrators:

|  |                                       |
|--|---------------------------------------|
| <b>Bauteilabmaße:</b>                                | 80 mm x 73,25 mm x 214 mm             |
| <b>Projizierte Bauteilfläche in Entformungsrtg.:</b> | ca. 70 cm <sup>2</sup>                |
| <b>Halbzeugabmaße (Prepreg):</b>                     | ca. 250 mm x 125 mm (Konturzuschnitt) |
| <b>Wanddicke (Prepreg):</b>                          | 1 mm                                  |
| <b>Wanddicke (Spritzguss):</b>                       | 1 – 4,1 mm                            |
| <b>Masse (Prepreg):</b>                              | ca. 40 g                              |
| <b>Masse (Spritzguss):</b>                           | ca. 48 g                              |
| <b>Gesamtmasse:</b>                                  | ca. 88 g                              |

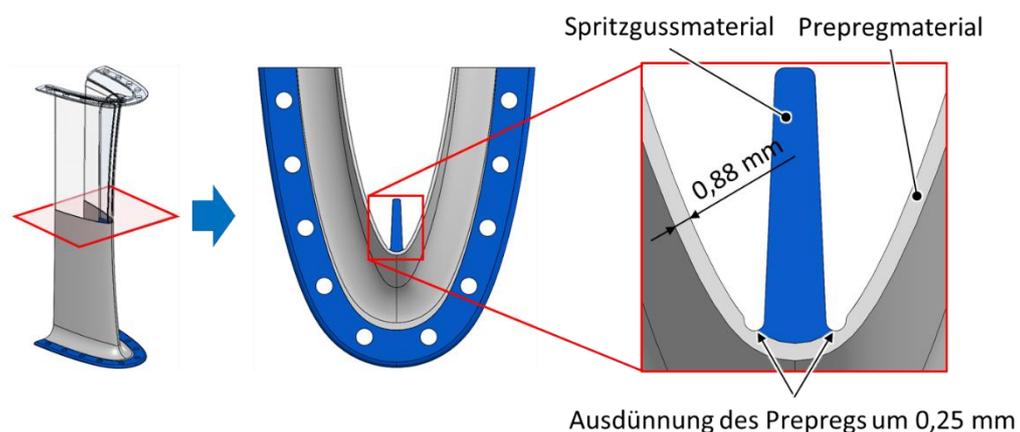
Tabelle 4 Bauteildaten Demonstrator

Innerhalb der Herstellung des Rippenprüfkörpers konnten Überspritzungen (vgl. Abbildung 23) des Prepregmaterials festgestellt werden. Die Überspritzungen sind u.a. mit den Dickenschwankungen der Prepreg-Einzellagen zu begründen.



**Abbildung 23: Rippenprüfkörper mit Überspritzung [Quelle: LKT]**

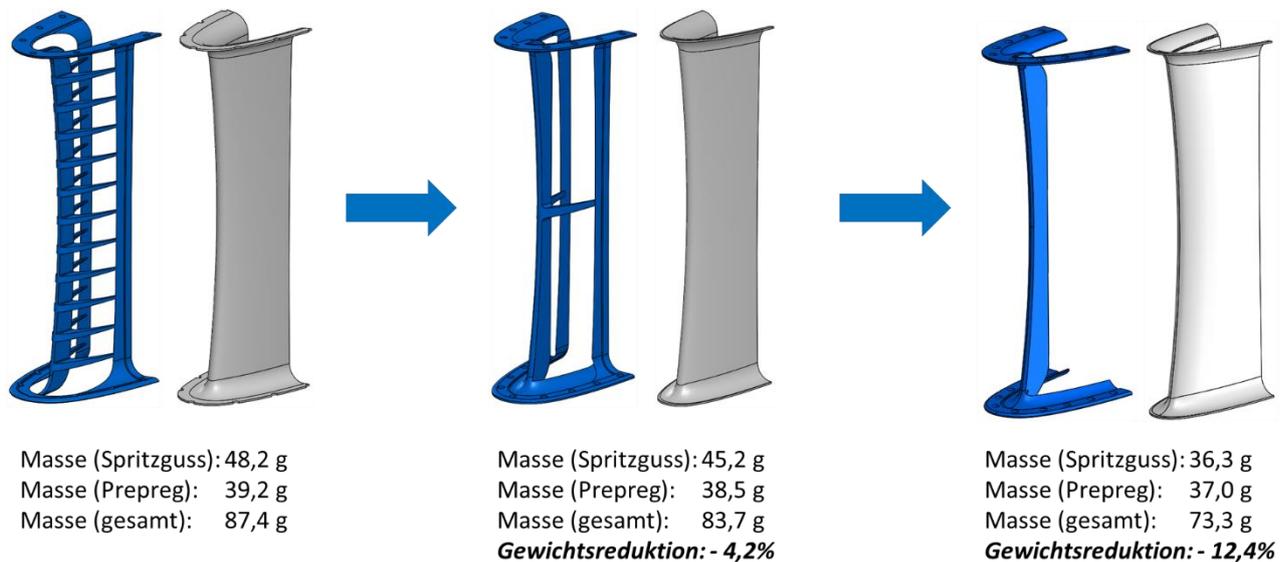
Es wurde festgestellt, dass durch gezieltes Überdrücken des Prepregs der Effekt der Überspritzungen deutlich reduziert wird, was allerdings wiederum Einfluss auf die spätere Qualität des konsolidierten Prepregs hat. Um bei der Demonstratorherstellung ein Überspritzen zwischen Prepregmaterial und Spritzgussmaterial zu vermeiden und gleichzeitig negative Einflüsse auf die Qualität zu mindern, wurde im Demonstrator eine lokale Dichtkante eingebracht. Die Dichtkante sieht eine lokale Wandstärkenreduktion um 0,25 mm im Übergangsbereich Spritzguss zu endlosfaserverstärktem Halbzeug vor. Abbildung 24 zeigt eine schematische Darstellung der Dichtkante. Ein weiterer Vorteil der lokalen Wandstärkenreduktion bietet sich in der lokalen Klemmung des Prepregs, welche ein Verrutschen bzw. Verschieben des Prepregs während der Einspritzphase verhindert.



**Abbildung 24: Demonstrator mit Dichtkante**

In Hinblick auf eine konsequente Leichtbauweise und auf Basis von Berechnungsergebnissen des Projektpartners DLR wurde weiterhin der Randbereich aus Spritzgussmaterial eliminiert und die Rippenstruktur verfeinert. Somit ergibt sich zum einen eine Gewichtsreduktion um 14,1 g, zum anderen können

die hohen mechanischen Eigenschaften des Prepregmaterials bis in die Bauteilrandzonen aufrechterhalten werden. Diese Maßnahme bedingt im späteren Duro-IMF-Prozess einen genauen Konturzuschnitt des Prepregs und ein präzises und reproduzierbares Materialhandling in das Spritzgusswerkzeug.



**Abbildung 25: Demonstrator Entwicklung**

#### II.1.4.2 AP4.2 Werkzeugbau

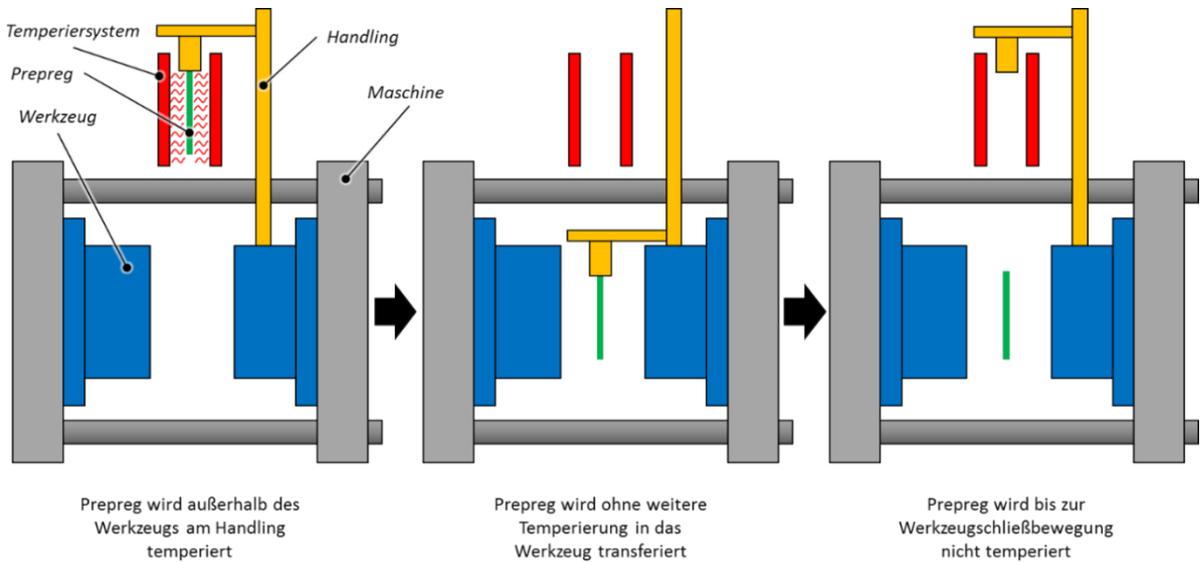
Gubesch hat sich in enger Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern Siebenwurst, Schmidt WFT und LKT an der Konzeptionierung und Konstruktion des Duro-IMF-Spritzgießwerkzeugs zur Herstellung der Demonstratorbauteile beteiligt. Gubesch hat sich hierbei insbesondere bei den Themen Umformung des Prepregmaterials, der Temperaturführung während des Gesamtprozesses sowie der Kavitätsgestaltung eingebracht.

Ein weiterer Themenschwerpunkt für Gubesch lag im Handling des Prepregmaterials in das Spritzgießwerkzeug bis zur vollständigen Umformung. Um die entsprechenden Prepregmaterialien reproduzierbar zu handeln und dem Werkzeug zuzuführen ist ein spezielles Handling- und Aufnahmesystem erforderlich. Das Handling der Prepregsysteme stellt eine besondere wissenschaftlich-technische Herausforderung dar, insbesondere vor dem Hintergrund der extrem starken temperaturabhängigen Viskosität der Halbzeuge.

Es wurden daher in Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern drei unterschiedliche Konzepte zur isothermen Temperaturführung des Prepregs während des Handlings erarbeitet:

a. Temperierung außerhalb des Werkzeugs:

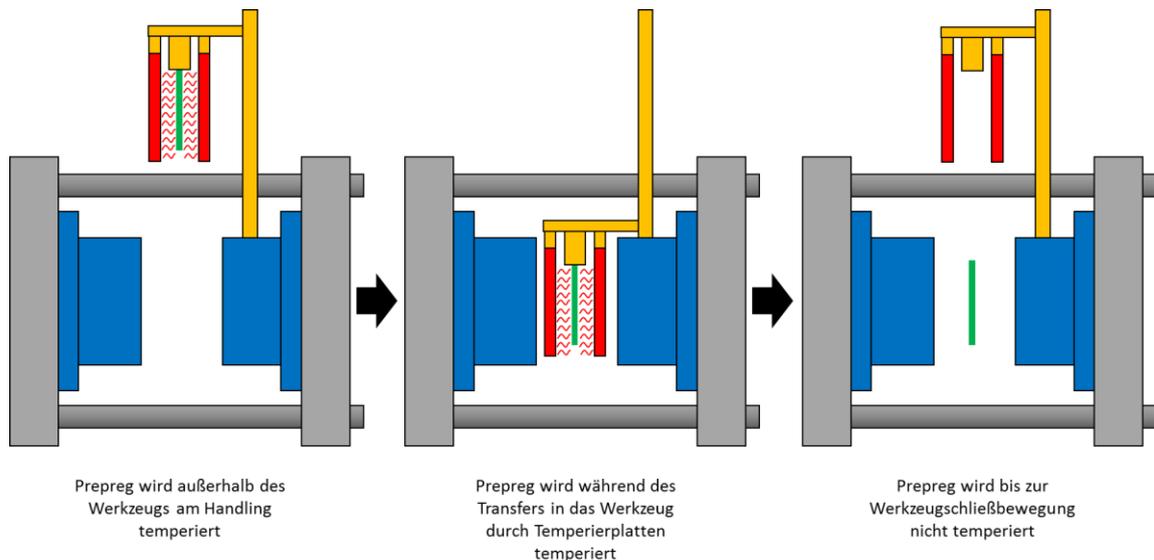
Zur einfachen Umsetzung einer Temperierung des Prepregs, wurde ein Temperiersystem außerhalb des Spritzgießwerkzeugs mittels Infrarotstrahlern konzeptioniert. Nachteilig hierbei ist die nachgeschaltete Bewegung des Prepregs in das Werkzeug, wodurch es zur Abkühlung des Prepregs kommen kann.



**Abbildung 26 Temperierung außerhalb des Werkzeugs**

b. Temperierung am Handlingsystem

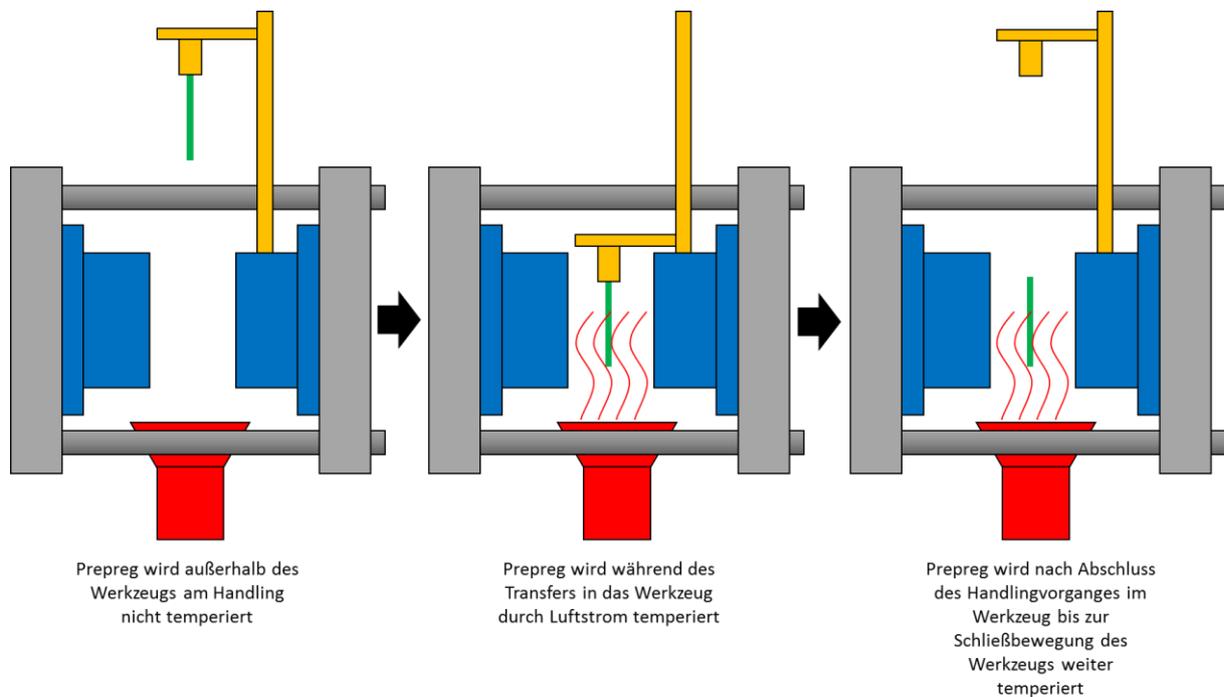
Zur definierten Temperierung des Prepregs während des Handlings wurde zudem ein Konzept erarbeitet, bei dem Heizplatten am Handlingsystem angebracht sind. Mit diesem Konzept besteht die Möglichkeit das Prepregmaterial während des gesamten Handlingzyklus definiert zu temperieren und gleichzeitig eine Abschirmung der Wärmestrahlung des Werkzeugs zu realisieren. Hierbei bestand die größte Herausforderung im möglichen Bauraum im geöffneten Werkzeugzustand.



**Abbildung 27 Temperierung am Handlingsystem**

### c. Temperierung über Luftstrom

Eine weitere Variante zur definierten Temperaturführung des Prepregmaterials bietet sich durch den Einsatz eines Heizgebläses, welches einen definierten Luftstrom um das Prepregmaterial im Werkzeug zulässt. Herausforderung hierbei ist den Luftstrom durch das geöffnete Werkzeug möglichst homogen zu halten und Kamineffekte nach Möglichkeit zu eliminieren.



**Abbildung 28 Temperierung über Luftstrom**

Zusätzlich zu den oben aufgeführten Konzepten zur Temperierung des Prepegmaterials, bietet sich die Möglichkeit zur Kombination der einzelnen Strategien.

#### II.1.4.3 AP4.3 Fertigung

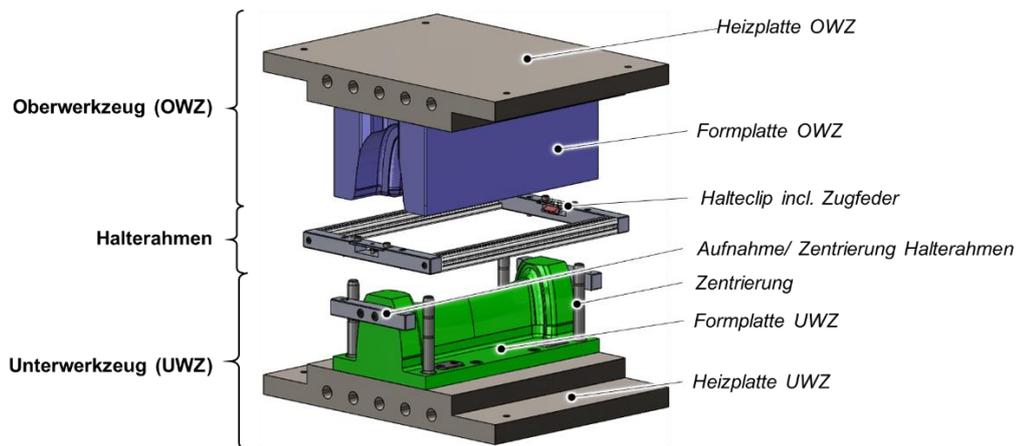
Gem. HAP4 wurde innerhalb der Demonstrator-Fertigung die innovative Duro-IMF-Technologie mit einem konventionellen zweistufigen Fertigungsprozess, zur Gegenüberstellung der mechanischen Performance sowie des Energieeinsparpotentials, näher betrachtet.

Hierzu wurden im ersten Fertigungsschritt Preformlinge aus duroplastischen Prepregmaterialien im Pressprozess hergestellt (Abbildung 29). Diese wurden anschließend, in das im Rahmen des AP4.2 gebauten Spritzgießwerkzeugs, eingelegt und mit einem duroplastischen Spritzgussmaterial hintergespritzt.



**Abbildung 29 Preformling aus dem Presswerkzeug**

Zur Herstellung der entsprechenden Preformlinge wurde durch Gubesch ein Presswerkzeug entwickelt und gebaut. Das Presswerkzeug sieht eine Nacharbeitsfreie Preformherstellung mittels Konturzuschnitten vor. Zum reproduzierbaren Handling der Konturzuschnitte in das Presswerkzeug wurde zusätzlich zum Presswerkzeug ein Halterahmen für das Prepreg konzeptioniert. Abbildung 30 zeigt die 3D-Konstruktion der Presswerkzeugs inkl. Halterahmen:

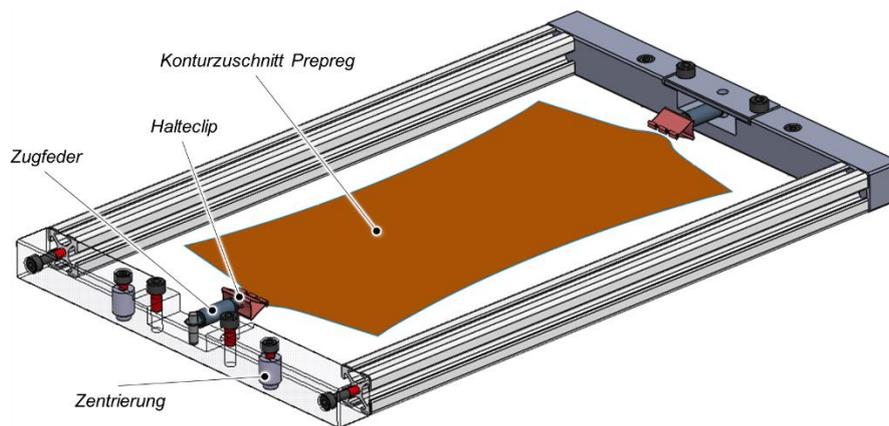


**Abbildung 30: Preformwerkzeug inkl. Halterahmen**

Das Presswerkzeug zur Herstellung von Preformlingen setzt sich aus Ober- und Unterwerkzeug zusammen. Ober- und Unterwerkzeug werden hierbei durch Heizplatten auf die entsprechende, aus HAP3, ermittelte Aushärtetemperatur von 150°C-160°C temperiert. Die Werkzeugkavität, die aus oberer und unterer Formplatte im vollständig geschlossenen Werkzeug entsteht, wird mittels Tauchkanten umlaufend abgedichtet. Die Tauchkanten gewährleisten während der Verarbeitung einen konstanten und definierten Faservolumengehalt der herzustellenden Preformlinge. Die entsprechende Bauteildicke der Preformlinge kann mittels Distanzplatten eingestellt werden, womit ebenso Dickentoleranzen des Prepregmaterials ausgeglichen werden können.

Zur Führung des Ober- und Unterwerkzugs wurden entsprechende Zentrierungen in die Formplatten eingebracht. Weiterhin befinden im Unterwerkzeug Aufnahmen bzw. Zentrierungen zur reproduzierbaren Aufnahme des Halterahmens.

Das Konzept des Halterahmens (Abbildung 31) zur Aufnahme der Konturzuschnitte basiert im Wesentlichen auf den Ergebnissen zum Handling aus HAP3. Das Prepreg wird im Halterahmen durch Halteclips, welche über Zugfedern mit dem Rahmen verbunden sind, auf Spannung gehalten. Der Halterahmen wird mittels Zentrierungen auf den entsprechenden Aufnahmen im Presswerkzeug aufgelegt und positioniert, was eine reproduzierbare Prefomherstellung beim Materialhandling und während der Umformung gewährleistet.



**Abbildung 31: Halterahmen mit Konturzuschnitt**

Im Rahmen der Demonstratorherstellung wurden ca. 15 Stk. Preformlinge durch Gubesch dem LKT für weitere Versuche und Prozessvergleiche zur Verfügung gestellt.

## II.2 Wichtigste Positionen aus dem zahlenmäßigen Nachweis

Gemäß des Projektantrages und zur Erarbeitung der dort definierten Arbeitspakete fielen die Kosten in den Positionen Personal, Material und sonstige unmittelbare Kosten an, welche entsprechend im zahlenmäßigen Nachweis erfasst wurden.

Die Arbeitsschwerpunkte von Gubesch lagen im Wesentlichen in den Grundlagenuntersuchungen und der Validierung von Prozessen und Materialien sowie der Bauteilentwicklung. Die benötigten Personalressourcen wurden hauptsächlich hierfür bereitgestellt.

Weiterhin wurden die Mittel nicht nur für intern entstandene Kosten aufgewendet, sondern unter anderem auch für die Beschaffung von extern bezogenen Materialien und Verbrauchsmaterialien die nicht von den Konsortiums Mitgliedern gestellt werden konnten. Die größten Posten betrafen hierbei die Modifikation des Plattenwerkzeugs (HAP3) in Höhe von 3840,-€ sowie die Erstellung des Preform-Werkzeugs (HAP4) mit Kosten von 9850,-€. Zur Validierung der Plattenqualität und zur Qualitätssicherung

in HAP3 wurde ein Veraschungs-ofens für Faservolumengehaltsuntersuchungen an Probekörperplatten mittels Glührückstand angeschafft (4126,58 €).

### **II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Die angestrebte Zielsetzung des Forschungsvorhabens wies ein hohes Potential auf und war durchaus als ehrgeizig zu betrachten. Zur Erreichung dieser Zielsetzung ist aufgrund der werkstofflichen und prozesstechnischen Komplexität mit einem erhöhten technisch-wissenschaftlichen Risiko zu rechnen. Aufgrund der interdisziplinären Aufgabenstellung war die Realisierung des Vorhabens kaum von Gubesch allein tragbar. Das Risiko wäre in diesem Fall zu hoch und wichtige Fragestellungen, die eine erhöhte Anfälligkeit bezüglich des Scheiterns aufweisen, hätten nicht betrachtet werden können. Die öffentliche Förderung des Vorhabens im Verbund reduzierte das Risiko des Scheiterns deutlich für alle Partner. Durch die Kooperation und Förderung konnten die vielseitigen Fragestellungen intensiv und weitreichend bearbeitet werden. Im Zuge des Projekts wurden umfangreiche Daten generiert und analysiert, welche beispielsweise in die Erstellung von Materialkarten, Konstruktionen, Verarbeitungsstrategien und der Erstellung von Prozessfenstern einfließen.

Die durchgeführten Arbeiten sowie die dafür aufgewandten Ressourcen waren notwendig und angemessen, da sie der im Projektantrag detailliert dargelegten Planung entsprachen und alle im Arbeitsplan formulierten Aufgaben erfolgreich bearbeitet wurden.

### **II.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse**

Der konstruktive Leichtbau gekoppelt an Materialeichtbau (Faser-Verbundwerkstoffe) ist für Gubesch ein wichtiges Schwerpunktthema. Den Bauteilen aus diesen Leichtbaustrategien wird gemeinhin eine wachsende Bedeutung für Struktur- und Semistrukturanwendungen zugeschrieben, bei denen Kostenaspekte im Vordergrund stehen. Deutlich sichtbar ist das an der stetigen Substitution von Blech- und Metallstrukturen durch hochintegrierte Kunststoffteile. Als einer der Väter des Spri-Form Verfahrens (In-Mould Forming mit endlosfaserverstärkten Thermo-plasten), welches ebenfalls im Rahmen eines Forschungsvorhabens erforscht und entwickelt wurde, hat die Firma Gubesch schon einige Erfahrung mit der Verwertung von völlig neuartigen, integrativen Verfahren gesammelt. Besonders wichtig ist die stete Vermarktung der neu entwickelten Technologien auf Messen sowie im Internet. Mit Vorentwicklungsstudien und Machbarkeitsanalysen werden beim Kunden Vertrauen zur neuen Technologie aufgebaut und die Vorteile des Verfahrens ausgearbeitet. Gubesch möchte mit den Ergebnissen aus dem Vorhaben (bestehend vor allem aus Wissen und einem vorzeigbaren Demonstrator) die werkstoffliche Lücke der Duroplaste im Bereich des In-Mould Formings schließen. Dabei zielt Gubesch ganz klar auf die Märkte wie Luft- und Raumfahrt sowie Maschinenbau ab, in denen Themen wie hohe Temperaturen, geringe Kriechneigung und gute Verklebbarkeit einen besonderen Stellenwert haben. Es hat sich gezeigt, dass es die Kunden sehr schätzen, wenn man beide werkstoffliche Disziplinen anbieten kann, um sich schließlich auf rein technischer Basis für den – auf die Anwendung bezogen – besseren Werkstoff entscheiden zu können.

Die wissenschaftlichen Ergebnisse werden auf Tagungen, Seminaren und Messen vorgestellt, um die Möglichkeit zur Herstellung von Bauteilen aus duroplastischen Faserverbundkunststoffen und deren Vorteile gegenüber thermoplastischen Systemen aufzuzeigen. Ferner soll die Firmen-Website der Gubesch Thermoforming GmbH zu Informations- und Werbezwecken erweitert und neugestaltet werden, wobei neu entwickelte, kostengünstige Technologien, insbesondere Duro-IMF, in den Vordergrund gestellt werden. Gubesch wird gezielt Werbung für die neuartige Verfahrenstechnik bei vorhandenen und potentiellen Kunden aus der Automobilbranche machen. Im Bereich Luftfahrt müssen die ersten Kontakte zu den OEMs bzw. T1s ausgebaut werden.

## II.5 Fortschritt anderer auf dem Gebiet des Vorhabens

Während der Laufzeit des Projekts sind keine Forschungs- und Entwicklungsergebnisse von anderen Stellen bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind.

## II.6 Veröffentlichungen

Der Fokus zur Veröffentlichung des Projektvorhabens liegt für Gubesch bei Messen und Kundenbesuchen. Weiterhin wurden die Projektfortschritte und Ergebnisse zentral durch den LKT veröffentlicht.

Neben den bereits genannten Veröffentlichungswegen wurde das Projekt für folgende Preise beworben:

- AVK Innovationspreis 2018
- JEC Award 2020
- AVK Innovationspreis 2020

## II.7 Verwendete Literatur

- Malnati, P. Prepreg compression molding makes its commercial debut. 2015; Available from: <http://www.compositesworld.com/articles/prepreg-compression-molding-makes-itscommercial-debut>
- Ermanni, P. Composites Technologien. 2007; Available from: [https://www1.ethz.ch/structures/education/master/intro/compulsory/composites/Skript/151-0307-V4.0-K04\\_Autoklaven-technik.pdf](https://www1.ethz.ch/structures/education/master/intro/compulsory/composites/Skript/151-0307-V4.0-K04_Autoklaven-technik.pdf)
- M. Neitzel, P.M.: Handbuch Verbundwerkstoffe. 2004: Hanser Verlag
- H. Lengsfeld, F.W.-F., Faserverbundwerkstoffe: Prepregs und ihre Verarbeitung. 2015
- T.Chemnitz. BMBF Verbundprojekt FiberSet. Available from: <https://www.tuchemnitz.de/mb/KunstStTechn/fiberset/vorstellung.php>
- Akiyama, K., Development of PCM\* technology. Society of Plastics Engineers - 11th-Annual Automotive Composites Conference and Exhibition, ACCE 2011, 2001

- J. Wulfsberg, A.H., G. Ziegmann, G. Lonsdorfer, N. Stöß, M. Fette, Combination of Carbon Fibre Sheet Moulding Compound and Prepreg Compression Moulding in Aerospace Industry, Procedia Engineering 81. 2014.
- Schemme, M., Langfaserverstärkte Thermoplaste - Status und Perspektiven. Moulding in Aerospace Industry, Procedia Engineering 81, 2014: p. 1601-1607.
- DIN EN ISO 527
- DIN EN ISO 14125

## Abbildungsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 1 Zeitplan mit Meilsteinplanung und kritischen Pfad .....      | 6  |
| Abbildung 2 Übersicht Vakuumtisch .....                                  | 15 |
| Abbildung 3 Schnitt durch Vakuumtisch Rahmen .....                       | 16 |
| Abbildung 4 Schnitt durch Vakuumtisch Lochplatte .....                   | 16 |
| Abbildung 5 Schnitt durch Aluminiumplatte .....                          | 17 |
| Abbildung 6 Debulking Station Gubesch .....                              | 17 |
| Abbildung 7 Modifikation des beheizten Plattenwerkzeugs .....            | 18 |
| Abbildung 8 Schnitt durch das Tauchkantenwerkzeug .....                  | 20 |
| Abbildung 9 Aufheizanalyse Heizplatten .....                             | 21 |
| Abbildung 10 Oberflächenqualität bei unterschiedlichen Drücken .....     | 22 |
| Abbildung 11 DSC-Analyse 1. Aufheizen .....                              | 23 |
| Abbildung 12 DSC-Analyse 2. Aufheizen .....                              | 24 |
| Abbildung 13 Umformung Prepreg zur Herstellung Kalotte .....             | 26 |
| Abbildung 14 Versuchsaufbau Zugversuch .....                             | 27 |
| Abbildung 15 Versagensbild Probekörper bei 80°C .....                    | 28 |
| Abbildung 16 Spannrahmen zur Herstellung des Kalotten-Probekörpers ..... | 29 |
| Abbildung 17 Spannrahmen mit Prepreg .....                               | 29 |
| Abbildung 18 Prozessablauf Kalottenwerkzeug .....                        | 30 |
| Abbildung 19 Profil NACA_66_018 .....                                    | 31 |
| Abbildung 20 Grundaufführung des Demonstratorbauteils .....              | 32 |
| Abbildung 21: Ermittlung Prepreg-Konturzuschnitt .....                   | 32 |
| Abbildung 22: Wandstärkenanalyse .....                                   | 33 |
| Abbildung 23: Rippenprüfkörper mit Überspritzung [Quelle: LKT] .....     | 34 |
| Abbildung 24: Demonstrator mit Dichtkante .....                          | 34 |
| Abbildung 25: Demonstrator Entwicklung .....                             | 35 |
| Abbildung 26 Temperierung außerhalb des Werkzeugs .....                  | 36 |
| Abbildung 27 Temperierung am Handlingsystem .....                        | 36 |
| Abbildung 28 Temperierung über Luftstrom .....                           | 37 |
| Abbildung 29 Preformling aus dem Presswerkzeug .....                     | 38 |
| Abbildung 30: Preformwerkzeug inkl. Halterahmen .....                    | 38 |
| Abbildung 31: Halterahmen mit Konturzuschnitt .....                      | 39 |

## Tabellenverzeichnis

|  |           |
|--|-----------|
| <i>Tabelle 1 Materialien und deren Eigenschaften .....</i> | <i>11</i> |
| <i>Tabelle 2 Versuchsplan Plattenherstellung.....</i>      | <i>22</i> |
| <i>Tabelle 3 Prozessparameter Gesamtprozess .....</i>      | <i>24</i> |
| <i>Tabelle 4 Bauteildaten Demonstrator.....</i>            | <i>33</i> |

## Berichtsblatt

|   |   |
|---|---|
| 1. ISBN oder ISSN geplant   | 2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung)<br>Schlussbericht |
| 3. Titel<br><br>Duroplast In-Mould Forming zur Herstellung durch Spritzgießen funktionalisierter duroplastischer Faserverbundbauteile (Duro-IMF)  |   |
| 4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]<br><br>Müller-Lenhardt Thomas<br>Baier Matthias  | 5. Abschlussdatum des Vorhabens<br>Dezember 2019                        |
|   | 6. Veröffentlichungsdatum<br>-  |
|   | 7. Form der Publikation<br>Abschlussbericht                             |
| 8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)<br><br>Gubesch Thermoforming GmbH<br>Industriestraße 1<br>91489 Wilhelmsdorf<br>Deutschland  | 9. Ber. Nr. Durchführende Institution                                   |
|   | 10. Förderkennzeichen<br>20W1503F                                       |
|   | 11. Seitenzahl<br>44  |
| 12. Fördernde Institution (Name, Adresse)<br><br>Bundesministerium für<br>Wirtschaft und Energie (BMWi)<br>53107 Bonn   | 13. Literaturangaben<br>10  |
|   | 14. Tabellen<br>4   |
|   | 15. Abbildungen<br>31   |
| 16. Zusätzliche Angaben<br>---  |   |
| 17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)<br>---  |   |
| 18. Kurzfassung<br><br>Ziel dieses Vorhabens "Duroplast In-Mould Forming zur Herstellung durch Spritzgießen funktionalisierter duroplastischer Faserverbundbauteile" oder kurz Duro-IMF war die Entwicklung einer neuen Technologie zur Herstellung innovativer Strukturen für Luftfahrzeuge. Förderpolitisch verfolgte das Vorhaben eine leistungsfähigere und effizientere Luftfahrt. In der zu entwickelnden neuen Fertigungstechnologie wurden ähnliche Aushärtezeiten neuartiger Compression Molding Prepregs und derer von Duroplastspritzgießmassen in einem integrierten Prozess genutzt.<br><br>Zentrale Innovation war die Kombination von umgeformten endlosfaserverstärkten, duroplastischen Halbschalen mit spritzgegossenen kurz- oder langfaserverstärkten Duroplasten als Versteifung und somit die Maximierung werkstofflicher und konstruktiver Leichtbaupotentiale.<br>Weiterhin wurde durch die entwickelte innovative Duro-IMF-Technologie eine Verkürzung der Prozesskette von einem mehrstufigen auf einen einstufigen One-Shot-Prozess realisiert.<br>Zum Nachweis der Machbarkeit wurden Demonstrator-Bauteile entwickelt, simuliert, gebaut und getestet. |   |
| 19. Schlagwörter<br>Leichtbau, Faserverbundwerkstoffe, Duroplast, Spritzgießen, Composite   |   |
| 20. Verlag<br>---   | 21. Preis<br>---  |