

**„EWiMa“**

*Efficient Wing Cover Manufacturing*

## **ABSCHLUSSBERICHT**

Zuwendungsempfänger: fibretech composites GmbH  
Förderkennzeichen: 20W1309C  
Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2015 bis 31.12.2017  
Erstellungsdatum: 27.06.2018

Berichtersteller:

  
\_\_\_\_\_  
Michael Kantelberg

Freigegeben:

  
\_\_\_\_\_  
Jens Brandes

## Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung .....	3
1.1	Aufgabenstellung und Projektziele .....	3
1.2	Vorhaben und Verbund .....	4
1.3	Arbeitsplan und Projektaktivitäten .....	4
1.4	Grundlagen und Möglichkeiten zu Projektbeginn .....	6
1.4.1	Stand der Technik .....	6
1.4.2	Bisherige Arbeiten des Antragsstellers .....	6
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	8
2	Technischer Bericht .....	9
2.1	Erzielte Ergebnisse .....	9
2.1.1	Verwendung der Zuwendungen .....	9
2.1.2	Zeitliche Einordnung der Tätigkeiten .....	9
2.1.3	Gegenüberstellung der Ziele und Ergebnisse .....	10
2.2	Tätigkeiten im Rückblick .....	12
2.2.1	Schnittstellen definieren .....	12
2.2.2	Konstruktion .....	14
2.2.3	Begleitende Tests .....	27
2.2.4	Testwerkzeug .....	32
2.2.5	Demonstratorwerkzeug .....	39
2.2.6	Herstellung von Versuchsbauteilen .....	50
2.3	Projektergebnisse .....	51
2.3.1	Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeit .....	51
2.3.2	Bewertung und Verwertbarkeit der Ergebnisse .....	51
2.3.3	Relevante Ergebnisse Dritter .....	52
2.3.4	Veröffentlichungen und Vorträge .....	52
3	Abbildungsverzeichnis .....	53
4	Abkürzungsverzeichnis .....	54
	Berichtsblatt .....	55
	Document Control Sheet .....	56

# 1 Zusammenfassung

## 1.1 Aufgabenstellung und Projektziele

Die Definition der Projektziele ist im Antrag festgeschrieben worden, in Übereinstimmung mit dem Ziel des LuFo V-1 Programms zur Festigung der technologischen Basis der Luftfahrtforschung in Deutschland und des Hochtechnologiebereiches Luftfahrt für die Wissensgesellschaft.

Es soll einen Beitrag zum angestrebten Ziel des BMWi der Entwicklung eines Nachhaltigen wirtschaftlichen und effizienten Lufttransportsystems der Zukunft leisten.

Das Project EWiMa setzt dazu auf der Seite der Fertigungsverfahren von hochkomplexer zukunftsweisenden Flügelstrukturen an.

Für wettbewerbsfähige und effiziente Luftfahrzeuge ist eine Reduktion der Produktionskosten notwendig. Dies kann durch neue hochindustrialisierte Ablegetechnologien, verbesserte Formwerkzeuge und Produktionsstrategien sowie durch höhere Integrationsgrade der Verbundstrukturen realisiert werden. Durch einen erhöhten Integrationsgrad der Einzelteile können gleichzeitig die Montagekosten und Durchlaufzeiten reduziert werden.

Die in diesem Vorhaben entwickelten Technologien und Methoden sollen dazu beitragen, die nationale Luftfahrtindustrie im weltweiten Wettbewerb nachhaltig zu stärken.

Dies ist zwingend im Test zu bestätigen um im internationalen Wettbewerb zu bestehen und um langfristig wesentlich zur Wertschöpfung in Deutschland beizutragen.

Die wesentlichen wissenschaftlichen und technischen Arbeitsziele dieses Vorhabens sind:

1. Entwicklung und Herstellung eines Formwerkzeugs für Lege- als auch Aushärteprozessierung im Autoklaven, welches die Durchlaufzeiten und Autoklav Belegungszeiten reduziert
  - a. Aufbau eines energieeffizienten, funktionsintegrierten Fertigungsmittels mit geringer Werkzeugmasse
  - b. Verringerung der Autoklav-Prozesszeiten durch geringe Wärmeaufnahme
  - c. Aktive Kühlung des Werkzeugs im Autoklaven für kurze Härtingszyklen
  - d. Verbesserung der Handling-Eigenschaften durch Verringerung der Masse
  - e. Erhöhung der Anzahl möglicher Prozesszyklen zur Steigerung der Nutzungsdauer
2. Integration des Werkzeugs in einen industriellen Fertigungs- und Legeprozess
  - a. Temperaturgestützter, verbesserter Legeprozess auf der GroFi-Anlage durch eigenerwärmtes Werkzeug
  - b. Mechanische Integration in die GroFi-Anlage

Für die fibretech composites GmbH besteht das konkrete Ziel dabei in einer Erweiterung der fibretemp©-Basistechnologie für beheizte Formwerkzeuge durch Funktionsintegration hin zu einem Fertigungsmittel nach Luftfahrt-Anforderungen.

## 1.2 Vorhaben und Verbund

Der steigende Anteil von kohlefaserverstärkten Kunststoffen (CFK) in den Strukturen moderner Verkehrsflugzeuge und die zunehmenden monatlichen Auslieferungszahlen führen zu einem verstärkten Bedarf an wirtschaftlichen Herstellverfahren für diese CFK-Strukturen.

Mit den Produktionstechnologien aus dem A350-Programm ist eine Fertigung der geforderten hohen Stückzahlen (man prognostiziert den Bedarf von 60 Flugzeugen also 240 Flügelschalen pro Monat) nicht zu vertretbaren Kosten realisierbar. Die Erschließung neuer Technologien für die Produktion von Flügelschalen der nächsten Generation ist daher erforderlich.

Innerhalb des Projektverbundes soll eine Verknüpfung der bisherigen Forschungsprojekte aus LuFo IV zu einem Konzept für die industrielle Fertigung von hoch integrierten Flügelschalen mit leistungseffizienten Ablegetechnologien aus faserverbundverstärkten Kunststoffen erfolgen.

Für den Forschungsverbund „EWiMa“ (Efficient Wing Cover Manufacturing) konnten große sowie mittelständische Unternehmen aus Wissenschaft und Wirtschaft, die über das erforderliche Know How auf den projektrelevanten Technologiefeldern verfügen, für eine Zusammenarbeit gewonnen werden. So kann dieses Projekt nachhaltig zur Stärkung eines deutschen Netzwerkes der Luftfahrtindustrie beitragen und die Marktsichtbarkeit von mittelständischen Unternehmen stärken.

Der Forschungsverbund setzt sich zusammen aus Airbus Operations GmbH, dem Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt in Stade, dem Fraunhofer IFAM mit seinem Standort in Stade und der fibretech composites GmbH in Bremen.

## 1.3 Arbeitsplan und Projektaktivitäten

Das Projekt wurde in insgesamt fünf Hauptarbeitspakete und das begleitende Projektmanagement und den Projektabschluss aufgeschlüsselt:

AP00 - Projektmanagement

AP10 - Konstruktion

- Definiton der Entwurfsmethode
- Design eines Validierungsbauteils
- Analyse der Ablegezeiten für parallele Ablage

AP20 - Fertigungskonzeptentwicklung

- Anforderungsdefinition an einen hochindustriellen Fertigungsprozess
- Detaillierte Analyse der Fertigung von hochintegrierten Flügelschalen
- Alternatives Integrationskonzept für Versteifungselemente

AP30 - Entwicklung eines Produktionsoptimierten Aushärtewerkzeuges

- Lastenheft des Aushärtewerkzeuges
- Final design Review zum Aushärtewerkzeugkonstruktion

AP40 - Fertigung eines Produktionsoptimierten Aushärtewerkzeuges

- Bereitstellung Material für Prototypenwerkzeug
- Fertigstellung des Prototypenwerkzeuges
- Bereitstellung des Materials für das Aushärtewerkzeug
- Fertigstellung des Aushärtewerkzeuges
- Fertigstellung des Versuchswerkzeuges für alternative Integrationskonzepte

AP50 - Herstellung von Versuchsbauteilen

- Aushärtewerkzeug auf Grofi-Anlage einrichten
- Demonstrator für Versteifungsstruktur
- Demonstrator der Flügelhaut

AP60 - Projektabschluss

Innerhalb der Arbeitspakete wird die fibretech composites GmbH mit den Erfahrungen aus anderen Industriezweigen Konzepte und Demonstratoren von Formwerkzeugen entwickeln um die Aushärtezyklen von Faserverbundbauteilen zu reduzieren. Im Wesentlichen gliedert sich die Arbeit in drei Schwerpunkte:

- Im ersten Abschnitt sollen die Randbedingungen der Prozesse und vorhanden Anlagentechniken im CFK-Nord mit den Partnern analysiert werden.
- Im zweiten Teil wird ein Formwerkzeugkonzept mit Heiz- und Kühlfunktionen entwickelt. Die Weiterentwicklung und Implementierung der erforderlichen neuen, funktionalen Erweiterungen ist hier maßgebendes Ziel. Insbesondere aus der Kombination von integrierten Heiz- und Kühlfunktionen ist eine vorläufige Konzeptvalidierung erforderlich. Es wird dazu ein Prototyp umgesetzt und in das technologische Umfeld der Projektpartner eingebunden. In Zusammenarbeit mit den Partnern wird eine Analyse der Verbesserungspotenziale erfolgen. Materialtechnische Fragestellungen werden in enger Zusammenarbeit mit den Partnern und Materialherstellern untersucht.
- In der dritten Phase des Vorhabens wird auf Grundlage der Zwischenergebnisse des zweiten Abschnitts ein Demonstrator-Formwerkzeug ohne integrierter Kühlung für eine Größe von bis zu 15 m<sup>2</sup> gefertigt. Auf diesem Funktionsträger sollen insbesondere temperaturgestützte Lege- und Aushärteversuche durch die Projektpartner durchgeführt werden.

Der Hauptanteil der fibretech composites GmbH fällt in die Arbeitspakete AP10 bis AP40, in AP 50 wird die fibretech composites GmbH lediglich in der Fertigung beratend und unterstützend tätig sein.

## 1.4 Grundlagen und Möglichkeiten zu Projektbeginn

### 1.4.1 Stand der Technik

Bei Formenwerkzeugen ohne integrierte Heizung erfolgt die Temperung in Öfen. Bei Bauteilen, bei denen eine hohe Güte des Verbundes verlangt wird, werden die mit den Halbzeugen belegten Formenwerkzeuge in einem Autoklaven unter Druck und Wärme ausgehärtet, um einen hohen Verdichtungsgrad zu erreichen. Beide Verfahrensweisen sind sehr energieintensiv. Gleichzeitig stellen sie im Produktionsprozess häufig einen Engpass dar.

Das integrierte Heizen bzw. Kühlen von Formwerkzeugen erfolgt heute vielfach über Wärmeleitung vom Unterwerkzeug auf das Bauteil. Die Energieeffizienz dieser Verfahren ist im Vergleich zu den in der Luftfahrt eingesetzten Autoklaventechnik gut, jedoch ergibt sich dennoch ein erhebliches Verbesserungspotenzial. Der Wärmeeintrag erfolgt hier über elektrische Heizpatronen oder durch ein Thermofluid z. B. Heißwasser auf der Unterseite der Formen. Es muss also zunächst die gesamte Form aufgeheizt werden, bis das eigentliche Bauteil erwärmt wird.

Die Verfahren erfordern meist eine sehr aufwendige Konstruktionen und einen hohen Energiebedarf. Aus der komplexen Bauweise mit hohen Wärmekapazitäten der Formen resultiert in vielen Fällen ein sehr träges Temperaturregelverhalten. Die maximal erreichbaren Temperaturen sind häufig auf Werte um 90°C limitiert.

Ein weiteres Verfahren heizt Formen aus FVK durch eine integrierte Widerstandsheizung auf Grundlage z. B. meanderförmig verlegter Metalldrähte oder Kohlefaserrovings. Es können aber auch andere geometrische Anordnungen bahnförmig gelegt und beispielsweise in Silikonhauben eingebettet werden. Auf Grund der vielfach sehr unterschiedlichen Wärmeausdehnungen von Formenmaterial und Heizdraht oder Roving haben diese Werkzeugkonstruktionen eine eher geringe Lebensdauer. Außerdem bedeutet ein Heizdrahtbruch an einer Stelle immer auch den Ausfall des gesamten Heizfeldes.



Abbildung 1: Meanderförmiges CFK-Heizbahnen [2]

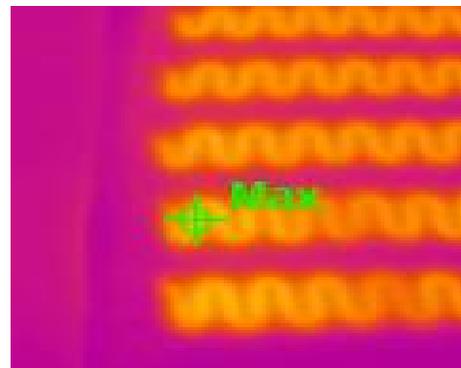


Abbildung 2: Wärmebild der Heizung [2]

Die besprochenen Verfahren sind heute in der Industrie verbreitet. Trotz der Nachteile haben sie ihre Berechtigung in der Fertigung. Gerade im Bereich der Prototypen- und Individual-Fertigung, wie etwa in vielen Bereichen des Schiffbaus sind beheizte Formenwerkzeuge vom Aufwand der Auslegung und der Herstellung zu teuer.

### 1.4.2 Bisherige Arbeiten des Antragsstellers

Mit dem System fibretemp© steht ein Verfahren zur Verfügung, welches Oberflächen unter Nutzung der elektrischen Leitfähigkeit von Kohlenstofffasern beheizt. Die Umsetzung von elektrischer Energie in Heizenergie erfolgt kavitätsnah an der Oberfläche, so dass die Wärmeflusswege im Vergleich zu anderen Heizverfahren

extrem kurz sind. Dieses ermöglicht eine energieeffiziente Beheizung von großen Formen, da - im Vergleich zu konventionellen Formwerkzeugen aus Stahl oder Aluminium - kaum thermische Massen vorhanden sind. Dadurch können schnelle Aufheiz- und auch Abkühlvorgänge umgesetzt und so deutliche Zykluszeiten-Reduzierungen vorgenommen werden. Das Heizverfahren fibretemp© wird bereits erfolgreich industriell in verschiedenen autoklavfreien Verfahren eingesetzt. Formwerkzeuge für z. B. Anwendungen im Bootsbau und nicht zuletzt in der Windenergieindustrie sind auf Temperaturbereiche von 80°C bis 100°C ausgelegt und limitiert.

Die 2005 gegründete fibretech composites GmbH ist ein Hersteller von High-End-Faser-Kunststoff-Verbundbauteilen, dessen Ziel es ist, Bauteile mit optimalem Aufbau und Geometrie für den jeweiligen Einsatzzweck zu entwickeln und zu fertigen. Die Aufgabenbereiche fächern sich auf in maritime Technik, Automotive, Windenergie, Luftfahrt- und Spezialbauteilfertigung. Kompetenzfelder sind der Formenbau für die Windenergiebranche, Konstruktion und Realisierung von hoch belasteten Leichtbaustrukturen aus faserverstärkten Kunststoffen, wie z. B. Radarmastsysteme für Megayachten, Herstellung von Wabensandwich-Panels für Flugzeuginnenräume.

Die fibretech composites GmbH beschäftigt sich intensiv mit der Weiterentwicklung von energieeffizienten beheizbaren Formen für hochwertige Faserverbundbauteile nach dem fibretemp©-Verfahren. In der fibretemp©-Technologie wurden bislang in Preforming- und autoklavfreien Infusionsprozessen insbesondere auch in der Windenergiebranche umgesetzt; siehe Abb.3. Im Projekt „Blademaker“ wird für die Windkraftbranche die Heiztechnologie für Infusionsverfahren im Niedertemperaturbereich optimiert und weiterentwickelt.

Es sind bislang in einer Größenordnung von etwa 20.000 m<sup>2</sup> Formenoberfläche seit der Unternehmensgründung damit ausgerüstet worden. Im Bereich der Verfahrenstechnik sind auch Untersuchungen zu Vakuuminfusionstechniken durchgeführt worden. Zu den Kunden gehören neben den Werften insbesondere Hersteller von Rotorblättern und nationale und internationale Zulieferer für die Automobil- und Luftfahrttechnik.



Abbildung 3: Großwerkzeug in fibretemp©-Technologie für die Rotorblattfertigung bis 110°C maximal

## 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Zusammenarbeit erfolgte im Verbund mit den jeweiligen Projektpartnern und den erforderlichen Unterlieferanten (z. B. Material- und Harzherstellern).

Eine vollständige Erläuterung der geplanten Partnerbeiträge zur Erreichung der Projektziele kann dem Antrag entnommen werden.

[1] *fibretch composites GmbH, 2010*

## 2 Technischer Bericht

### 2.1 Erzielte Ergebnisse

#### 2.1.1 Verwendung der Zuwendungen

Die Projektaktivitäten sind im Arbeitsplan festgeschrieben. Vollzieht man die Ausführungen des technischen Berichts aus Kapitel 2.2 kann man die Tätigkeiten in die Bereiche vor und Begleittests, Konstruktion und Bau des Test der Konstruktion und Bau des Demonstrator Werkzeuges sowie Projektkoordination und Unterstützung festlegen. Die Gewichtung der genannten Tätigkeiten wird dabei wie folgt angegeben:

- Konstruktion AP10 und Fertigungskonzeptentwicklung (inkl. Begleittests) AP 20 - 20%
- Entwicklung eines Produktionsoptimierten Aushärtewerkzeuges (beinhaltet die Entwicklung der Konzepte für das Testwerkzeug und das Demonstrator-Werkzeug inklusive der Lösung der Peripherieschnittstellen Problemstellungen) AP 30 - 20%
- Konstruktion und Bau des Testwerkzeuges AP 40 und Begleitung bei der Herstellung /Inbetriebnahme - 15%
- Konstruktion und Bau des Demonstrator-Werkzeuges AP40 und Begleitung bei der Bauteilherstellung AP50 - 40%
- Projektmanagement AP00 und –Abschluss AP60 - 5%

#### 2.1.2 Zeitliche Einordnung der Tätigkeiten

Das LuFo-V1 Verbundvorhaben EWiMa erstreckte sich insgesamt über den Zeitraum von 3 Jahren mit dem Ende des Projektes am 31.12.2017. In diesem Zeitraum wurden alle im Antrag festgeschriebenen Arbeiten und Tätigkeiten ausgeführt die in Kapitel 2.2 ausführlich beschreiben und deren Ergebnisse in Kapitel 2.3 Bewertet werden.

Die Tätigkeiten im Bereich der Fertigungskonzeptentwicklung und der Entwicklung eines produktionsoptimierten Aushärtewerkzeuges wurden nahezu über den gesamten Projektzeitraum mit Beginn des Kickoff Meetings geführt. Erkenntnisse aus Vortests und den gebauten Werkzeugen flossen hier immer wieder mit ein.

Für fibretech composites GmbH finden stehen im Projektverlauf noch die Konstruktion und der Bau des Test-Werkzeuges sowie des Demonstrator-Werkzeuges heraus. Beide Ereignisse sind wichtige Teile des Projektes, stellen die Werkzeuge doch das physische Ergebnis all der Forschungen dar.

Im Rückblick lassen sich zeitlich die wichtigsten Ergebnisse und Treffen über den gegebenen Projektzeitraum einordnen:

- Februar 2015 - Treffen um das Projekt zu starten
- August 2015 - Treffen zwischen fibretech composites GmbH und DLR zur ersten Definition der Schnittstellen

- November 2015 - Beginn mit dem Bau des Test-Werkzeuges
- Februar 2016 - Tooling Workshop in Stade mit allen Projektpartnern zur Definition der Anforderungen an das Prototypen-/ Demonstrator-Werkzeug
- Mai 2016 - Auslieferung des fertiggestellten Test-Werkzeuges nach Belegung mit Hextool, Nacharbeiten, Ausrüstung und Tests
- Juni 2016 - Status Review mit dem Projektträger in Stade. Das Ablegen von UD-Tapes auf die Oberfläche des Test-Werkzeuges mittels der Grofi-Anlage konnte dabei demonstriert werden
- März 2016 - Abstimmung mit dem DLR und der Fa. Scholz zu den finalen Anforderungen an die Elektrik und die Einbindung der Regelung in die Autoklav-Steuerung
- August 2016 - Beginn mit dem Urmodellbau für das Demonstrator-Werkzeug und der Regelungs- und Steuereinheiten, sowie der Elektrik
- Januar 2017 - Auslieferung des Demonstrator-Werkzeuges zum CTC nach Stade
- April 2017 - Status Review mit dem Projektträger
- Juli 2017 - Volle Integration des Demonstrator-Werkzeuges im Autoklaven des DLR inklusive Heizungs- und Aushärtetests
- April 2018 - Final Review mit dem Projektträger, das immer noch funktionsfähige Demonstrator-Werkzeug konnte erneut gezeigt werden

### 2.1.3 Gegenüberstellung der Ziele und Ergebnisse

Die im Antrag postulierten Projektziele konnten erreicht werden. Dies betrifft sowohl die Ziele des Verbundes als auch die eigenen Ziele der fibretech composites GmbH.

Das wesentliche wirtschaftliche Ziel des Vorhabens war die Entwicklung eines Formwerkzeuges für Lege und Aushärteprozessierung im Autoklaven, welches die Durchlaufzeiten reduziert. Es wurden:

- a. Ein energieeffizientes funktionsintegriertes Werkzeug gefertigt das eine hohe Steifigkeit bei geringer eigener Masse aufweist gefertigt. Integriert wurden das fibretemp-Heizsystem, sowie verschiedenen Vorrichtungen für die schnelle Belegung und Entformung von Bauteilen
- b. eine Verringerung der Prozesszeiten im Autoklaven durch die integrierte fibretemp Heizung um ca. 40% erreicht. Gleichzeitig wurde die Homogenität der Wärmeverteilung durch das System gesteigert.
- c. die Möglichkeiten einer aktiven Kühlung mit dem Test-Werkzeug demonstriert und dabei verfahrenstechnisch sinnvolle und sichere Möglichkeiten gefunden.
- d. Verbesserungen in den Handling Eigenschaften mit einer Werkzeugmasse von weniger als 400kg erreicht, so das aufwendige Dreh- und Kippvorrichtungen nicht benötigt wurden. Ein risikoloses drehen der gesamten Werkzeugschale mit dem kleinen Finger war dabei möglich. Gleichzeitig sinkt damit auch der Bedarf an Krankapazitäten.
- e. mit den getesteten Harzsystemen eine Erhöhung der möglichen Prozesszyklen erreicht. Zu der Erhöhung trägt dabei auch der erforschte Werkzeugaufbau bei, der für minimale innerer mechanische Spannungen auf Grund von Wärmeausdehnungen verantwortlich ist.

Auch die Integration eines Werkzeuges, speziell eines eigenbeheizten in einen industriellen Fertigungs- und Legeprozess konnte erfolgreich demonstriert werden. Gleichwohl ist hier ein Teil der Arbeiten, die mechanische Integration des Demonstrator-Werkzeuges in die Grofi-Anlage des DLR, nur theoretisch erfolgt, was aber mit den heutigen Mitteln des CAD aus unserer Sicht keine Verfehlung des gesteckten Zieles darstellt, zumal die notwendigen physischen Parameter mit dem Testwerkzeug ermittelt werden konnten.

Dabei wurden:

- a. ein Temperaturgestützter verbesserter Legeprozess, welcher auf dem Testwerkzeug erfolgte in der Grofi-Anlage getestet und konnte dem Projektträger bei einem Treffen vorgeführt werden.
- b. Die Möglichkeiten der mechanischen Integration der Werkzeuge auf der Grofi Anlage geschaffen und mit dem Testwerkzeug auch erfolgreich umgesetzt. Die Umsetzung für das Demonstrator-Werkzeug erfolgte dann im CAD-System.



Abbildung 4: Demonstrator-Werkzeug im Autoklaven des DLR [2]

Das fibretech composites GmbH eigene Ziel der Erweiterung der fibretemp®-Basistechnologie hin zu Werkzeugen für die Fertigung von Luftfahrtbauteilen muss nach dem Projekt ebenfalls als positiv angesehen werden. Die Möglichkeiten zu den ausführlichen Tests und den Zugang in diesen Bereich der Fertigung wäre ohne die Projektpartner nicht in diesem Umfang möglich gewesen.

Der Erkenntnisgewinn über die notwendige Art der Bauweise und den Schnittstellenanforderungen ist von unschätzbarem Wert für das zukünftige Auftreten auf dem avisierten Markt.

Die direkten Erkenntnisse um Werkstoffe für das Werkzeug selbst aber auch die Peripherie wie Anschlusskabel, die unter extremen Bedingungen (Druck und Temperatur) getestet werden konnten, sind für fc der wahrscheinlich größte Gewinn.

## 2.2 Tätigkeiten im Rückblick

Die Haupttätigkeiten im Projekt lagen für fibretech composites in den Arbeitspaketen AP30, AP40 und AP50. Die Arbeiten werden im Folgenden in den Unterkapiteln nach Tätigkeitsfeldern geordnet dargestellt.

### 2.2.1 Schnittstellen definieren

Um überhaupt eine Werkzeug erfolgreich entwickeln und diese Entwicklung mit den Projektpartnern abstimmen zu können, war die Definition der physischen Schnittstellen und die Möglichkeiten der Software ein und Anbindung nötig. Dies sind wesentliche Teile des Arbeitspaketes AP30.

Die wichtigsten Abstimmungen fanden zwischen dem DLR Stade und der fibretech composites GmbH statt. Die im Projekt zu entwickelnden und fertigenden Werkzeuge sollten schließlich in den Räumen des DLR verwendet werden. Dazu mussten diese mit der Infrastruktur der Grofi-Anlage und des Autoklaven kompatibel sein.

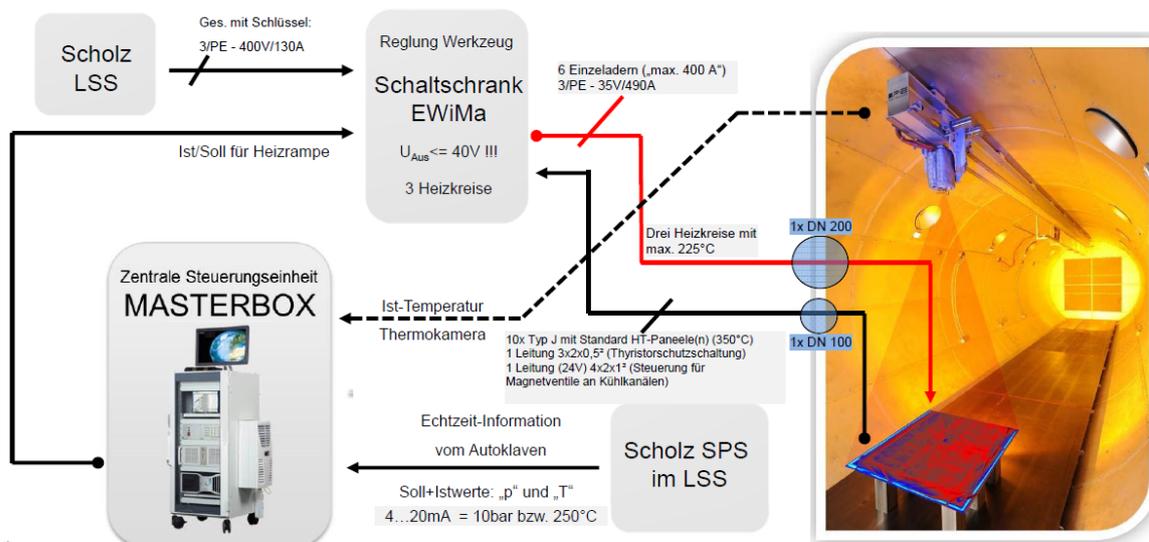


Abbildung 5: Kommunikationsskizze für das installationskonzept EWiMa - Aktiv beheiztes Werkzeug im Autoklaven [3]

So erfolgte zum einen eine Abstimmung der kommunikativen Schnittstellen für die Integration in die Autoklavsteuerung, sowie des Steuerungskonzeptes mit dem Projektpartner DLR Stade.

In Folge dessen wurde auch die Softwareschnittstelle und die Art des Datenaustausches zwischen geplanter Werkzeugregelung und Regelung des Autoklaven festgelegt wurde.

Die wahrscheinliche Mindest- und Höchstzahl der späteren Heiz- und Regelkreise und die Art und zahlenmäßiger Umfang der Sensorik war ebenfalls ein früher Punkt in den Abstimmungen. Hier wurden Drei Heizfelder und maximal 5 Sensoren pro Heizfeld vereinbart.

Ebenfalls erfolgten Überlegungen zwischen den Partnern über die möglichen Aufstellorte der Hardware außerhalb des Autoklaven und die Möglichkeiten der Sensorführungen in den beheizten und druckfesten Raum besprochen.

Zudem entstanden Überlegungen zu den Übergabepunkten an beiden Anlagen. Dazu erfolgten auch Gespräche mit dem Hersteller des Autoklaven.

Für die Späteren Werkzeuge erfolgte zwischen allen Projektpartnern die Abstimmung über die geometrischen Randbedingungen.

Hierzu zählen die Größe des Demonstrator-Bauteils, die Belegebereiche der Grofi-Anlage wie auch die Kräfte beim Belegen.

Im Abstimmung mit dem Fraunhofer IFAM wurden im Projekt auch die möglichen Ausführungen der Werkzeugformenränder, Vakuumkanäle und Durchführungen abgestimmt.

Mit dem DLR erfolgten weiter Planungen die den Transport und das Handling des Werkzeuges in den Werkhallen betrafen.

Mit den Randparametern erfolgte von Seitens fibretech composites GmbH auch eine erste überschlägige Auslegung der Heizfelder um mit den Kenndaten und dem Wissen aus bisherigen Projekten zur Eingrenzung und Konkretisierung der Schnittstellenanforderungen beizutragen.

Anhand dieser Auslegungen sind die Abschätzungen der elektrischen Leistungen gelungen und damit die mindest notwendigen Elektrischen Lasten, Kabelquerschnitte für Zu- und Ableitungen.

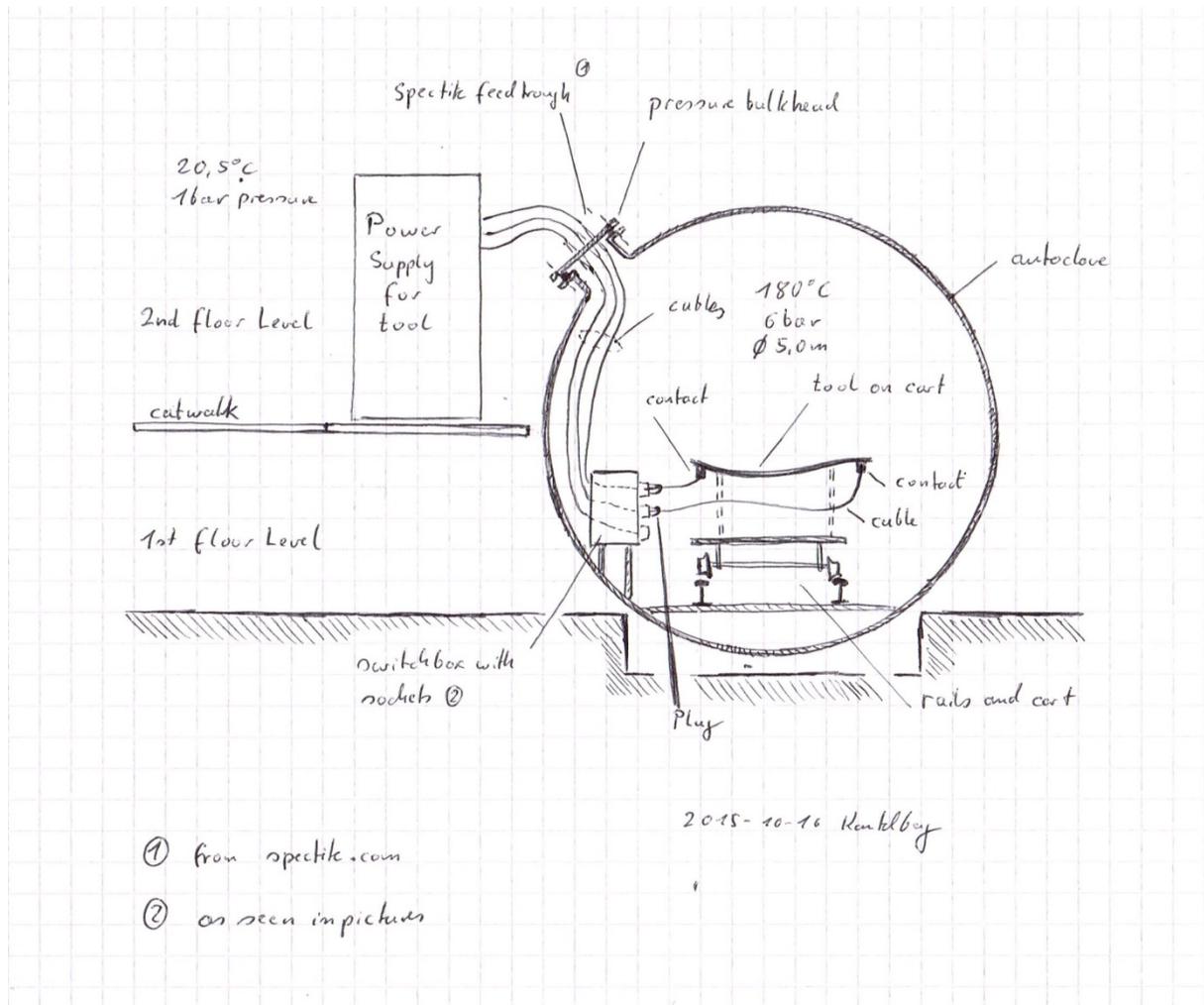


Abbildung 6: Erste Konzeptskizze zur Installationssituation im und am Forschungsautoklav [4]

### 2.2.2 Konstruktion

In dem Konstruktionsteile, der ebenfalls Teil des Arbeitspaketes AP 30 ist wurden, fallen alle Tätigkeiten für die für die Ausführung des Prototypen und Aushärtewerkzeuges notwendig waren.

In dem Fall einer Projektentwicklung ist der Konstruktionsbereich anteilig mindestens genau so umfangreich und hoch zu bewerten wie die hergestellten Prototypen selber.

Für das kleinere Prototypenwerkzeug erfolgte anhand der im Antrag festgelegten und zwischen den Partnern abgestimmten Parameter eine grobe Skizze der späteren Ausführung.

Für das automatisierte Ablegen von Prepreg-Tapes an einer vertikalen Form wurde eben ein solches entwickelt. Dazu wurde ausgehend von einem Heizfeld unter Berücksichtigung der Randbedingungen die Formgeometrie erstellt. Es wurde eine aktive Kühlung, welche einmalig pro Durchlauf gezielt zugeschaltet wird entwickelt und es wurde eine Anbindung an die bestehende GroFi-Anlage konstruiert. Darüber hinaus wurde in die Geometrie ein Vakuumkanal eingebracht, welcher zum arretieren der Applikationsfolie des IFAM genutzt werden soll.

Die Validierung innerhalb des Projektes erfolgt mit dem Testwerkzeug.

Basierend auf der fibretemp-Technologie wurde ein rechteckiges Heizfeld mit einer Fläche von ca. 1m<sup>2</sup> ausgelegt. Ausgehend von den elektrischen Kennwerten des Feldes und der geforderten Maximaltemperatur von 180°C wurden Anforderungen an die Beheizungshardware definiert und entsprechende beschafft.

Belegung Probeform Hextool		Platte 5					
spezifische Gewebedaten:							
U <sub>max</sub> =	2,8 V	2,8 V	3,0 V	3,2 V	3,4 V	3,6 V	
I <sub>max</sub> =	32,46 A	34,96 A	37,45 A	39,95 A	42,45 A	44,94 A	
P =	84 W	98 W	112 W	128 W	144 W	162 W	
PIA =	9,59 W/m <sup>2</sup>	1,088 W/m <sup>2</sup>	1,248 W/m <sup>2</sup>	1,420 W/m <sup>2</sup>	1,604 W/m <sup>2</sup>	1,798 W/m <sup>2</sup>	
bei freier Konvektion:							
T <sub>U</sub> =	28 °C						
α <sub>konv</sub> =	15 W/m <sup>2</sup> K						
ΔT =	43 K	73 K	83 K	95 K	107 K	120 K	
T <sub>max</sub> =	83 °C	95 °C	103 °C	115 °C	127 °C	149 °C	
x	b (d)	1. Lage	2. Lage	3. Lage	4. Lage		
0	250	8790°	Kontaktierung	545°	8790°	245°	m <sub>lamin</sub>
160	250	400 g/m <sup>2</sup>	16 mm <sup>2</sup>	400 g/m <sup>2</sup>	400 g/m <sup>2</sup>	10 mm <sup>2</sup>	400 g/m <sup>2</sup>
200	250	400 g/m <sup>2</sup>		400 g/m <sup>2</sup>	400 g/m <sup>2</sup>		400 g/m <sup>2</sup>
230	250	400 g/m <sup>2</sup>		400 g/m <sup>2</sup>	400 g/m <sup>2</sup>		400 g/m <sup>2</sup>
300	250	400 g/m <sup>2</sup>		400 g/m <sup>2</sup>	400 g/m <sup>2</sup>		400 g/m <sup>2</sup>
400	250	400 g/m <sup>2</sup>		400 g/m <sup>2</sup>	400 g/m <sup>2</sup>		400 g/m <sup>2</sup>
450	250	400 g/m <sup>2</sup>	12mm <sup>2</sup>	400 g/m <sup>2</sup>	400 g/m <sup>2</sup>	10 mm <sup>2</sup>	400 g/m <sup>2</sup>
450	250	400 g/m <sup>2</sup>		400 g/m <sup>2</sup>	400 g/m <sup>2</sup>		400 g/m <sup>2</sup>
1-seitig Kontaktieren							
Plattengröße: 500mm x 200mm		Belegung:					Signatur
Heizfeldgröße: 700mm x 300mm		4x Hextool					
		2x 200g Glas					
		4 x 400g/m <sup>2</sup> CFK-Gewebe (siehe oben)					
		Hilfsfilm					
		1x 200g Glas					
		Wabenstreif, 18mm					
		2x 420g CFK-Prepreg (45° / 90°)					
		Harz: Epoxy 8615 von Hueston					
		Waben: 10mm Nomex					

Abbildung 7: Heizfeldauslegung für das Test-Werkzeug [4]

Um die bestehenden Randbedingungen, welche sich aus den Eigenheiten des Tape-Legers ergeben gerecht zu werden, wurde ein entsprechend großer Formenrand vorgesehen. Dieser soll als An- und Auslaufzone für den Tape-Leger dienen und bietet darüber hinaus Raum für Lasertargets zur automatisierten Einmessung der Form.

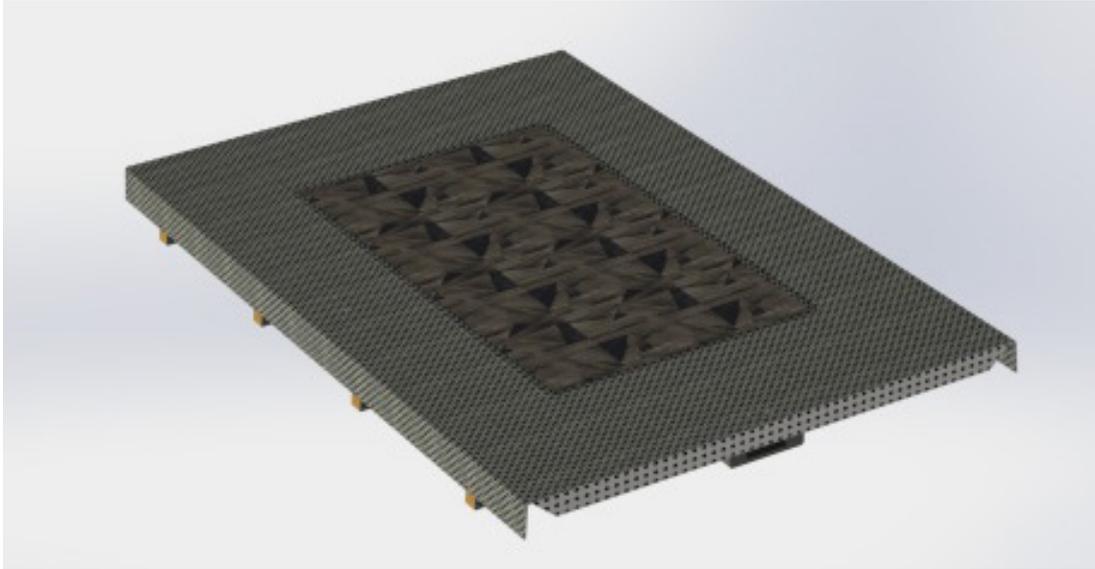


Abbildung 8: CAD-Modell des Test-Werkzeuges mit Hextool im Belegbereich und Auslaufflächen für den Tape-Leger [4]

Die aktive Kühlung an sich basiert auf dem Prinzip der erzwungenen Konvektion. Die Form wurde in Sandwichbauweise konstruiert und hat einen strömungsdurchlässigen Kern. Durch diesen strömt die ohnehin im Autoklaven zirkulierende Luft und transportiert dabei Wärmeenergie ab, was zu schnelleren Kühlraten führt.

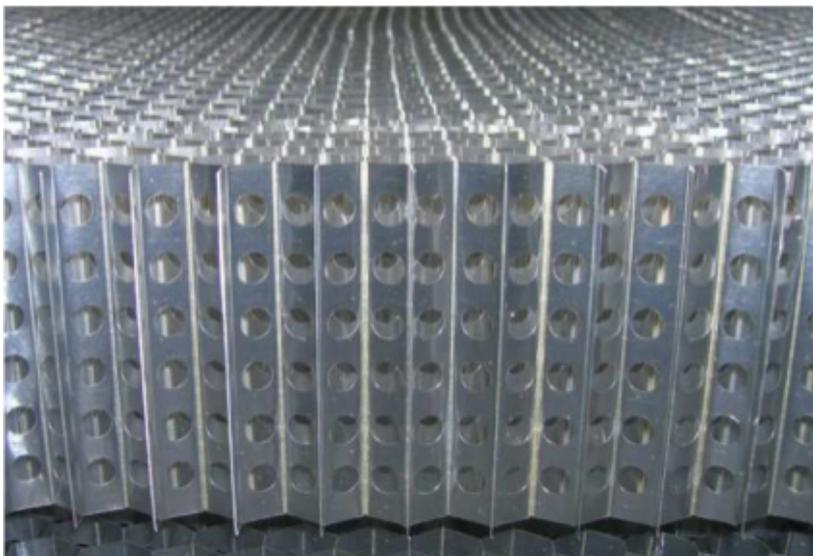


Abbildung 9: gelochter Aluminium-Wabenkern für die Durchlüftung [4]

In Absprache mit dem DLR wird für die Befestigung an der Gro-Fi-Anlage auf das Lindapter-System zurückgegriffen. Dieses hat sich beim DLR bereits in vorherigen Versuchen als sinnvolles Anbindungssystem erwiesen. Das Formwerkzeug wurde für diese Anbindung rückseitig mit Querstreben versteift, an welche Metallplatten anlamiert wurden, welche um die bestehenden Doppel-T-Träger der Gro-Fi-Anlage herumkonstruiert wurden und eine sichere Anbindung ermöglichen.

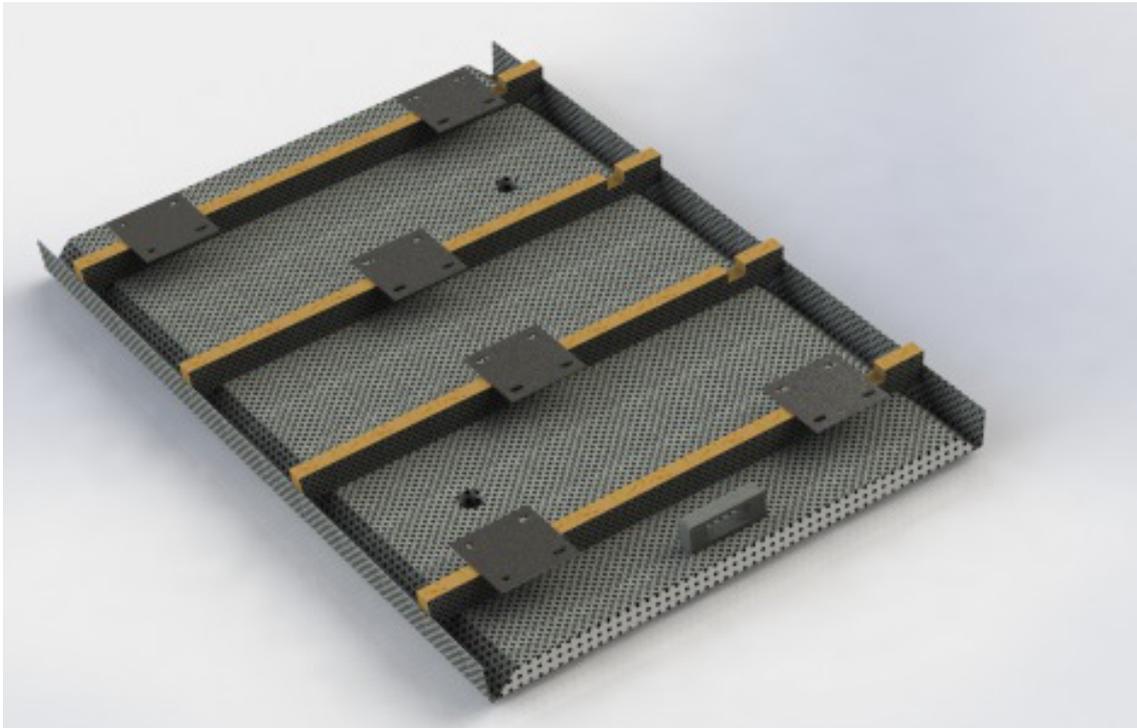


Abbildung 10: Ansicht der Rückseite des Test-Werkzeuges im CAD [4]

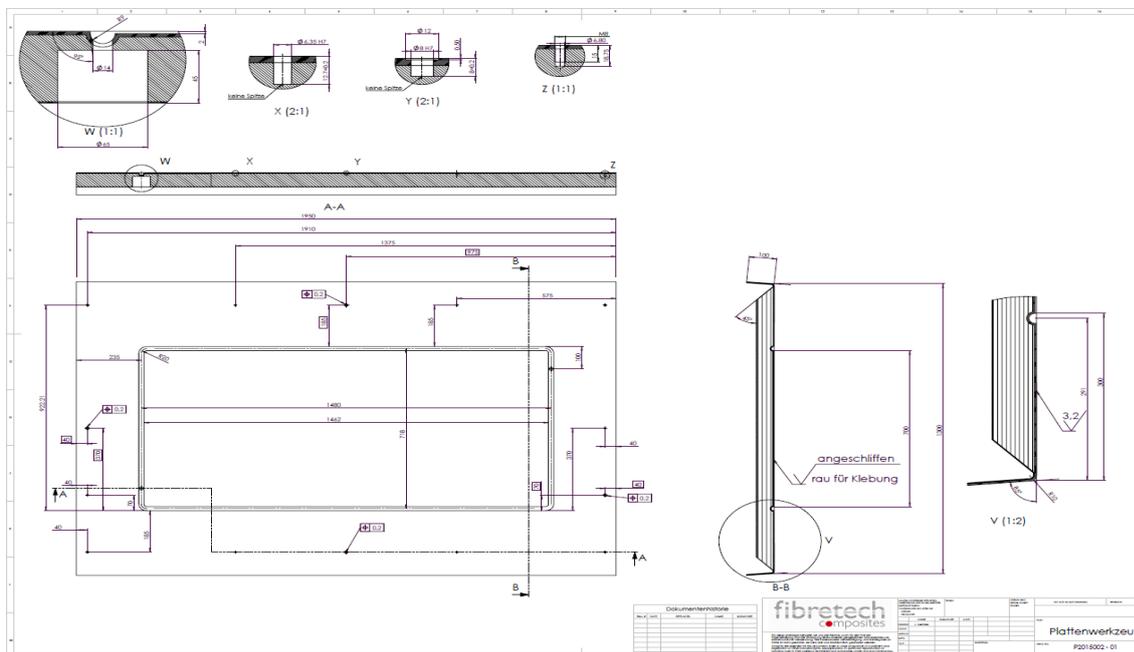


Abbildung 11: Fetigungszeichnungen für das Testwerkzeug [4]

Die Konstruktion des Aushärte-Werkzeuges, im Laufe des Projektes auch Demonstrator-Werkzeug genannt erfolgte in mehreren Schritten.

Wie eingangs erwähnt, erfolgte im Zuge der Definition der Schnittstellen eine erste Abschätzung hinsichtlich Größe und Leistungsfähigkeit.

Auslegung der Heizfelder, Geometrie der Oberfläche und ähnliche Arbeiten erfolgten parallel zur Entwicklung und Umsetzung des Prototypenwerkzeuges.

Was die Konstruktion und Durchgestaltung des inneren Aufbaus, der Anschlüsse an die Grofi-Anlage und finale Auswahl der Werkstoffe betrifft erfolgten diese Teile nach den Test des ersten Werkzeuges sowie nach entsprechenden Einzelkomponententests.

Ein Hauptteil der Aufgabe stellt die Auslegung der Heizfelder in Abstimmung mit den Anforderungen an ein Werkzeug für die Fertigung von Luftfahrtbauteilen dar.

So konnten parallel zur Entwicklung und Umsetzung des Testwerkzeuges die Heizfelder für das 15m<sup>2</sup> Demonstrator-Werkzeug definiert, angepasst und ausgelegt.

Die finale Definition der Bestandteile und der Größe des Demonstrators wurde mit dem Workshop in Stade am 16.02.2016 eingeleitet. Hierzu trafen sich alle Projektbeteiligten.

Als Basis diente die Geometrie EWiMa-4001-101. Aus den vorangegangenen Analysen ließen sich, basierend auf der Demonstrator Geometrie, die nötigen Werkzeugränder definieren.

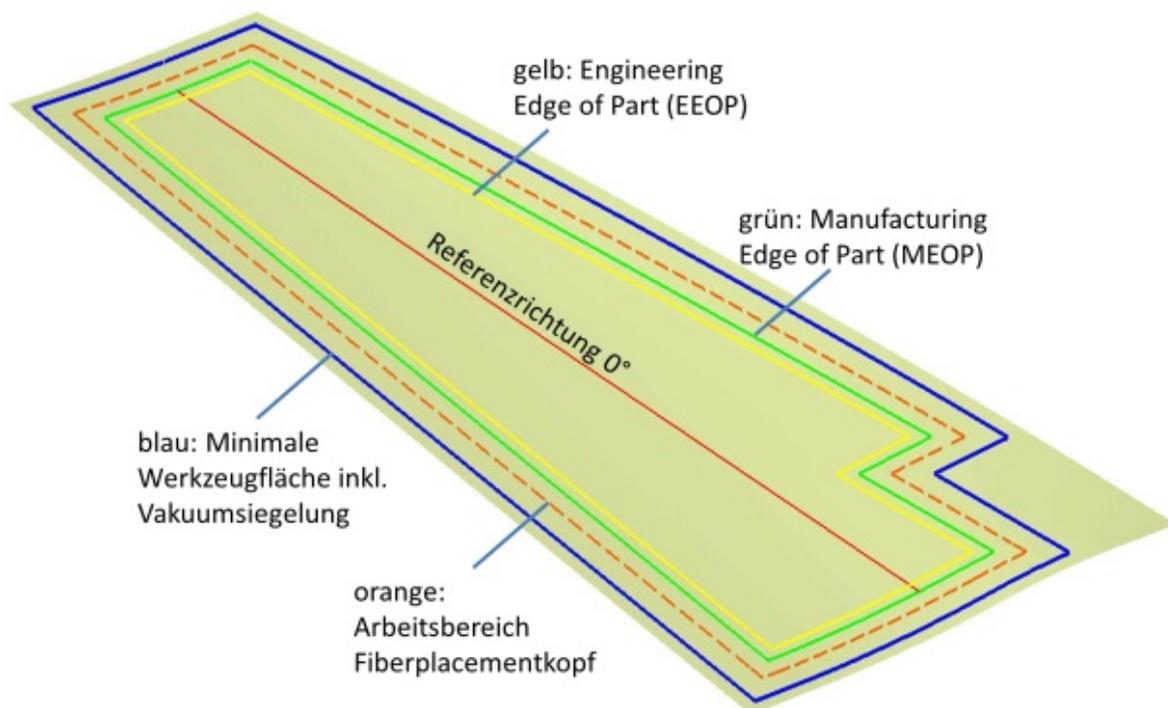


Abbildung 12: Referenzen für die Gestaltung der Flächen des Demonstrator-Werkzeuges [3]

Die notwendige Beheizung erfolgt bis zur Manufacturing Edge of Part. Für die erste Auslegung wurde die Werkzeug Geometrie an diesen Kanten getrimmt und abgewickelt.

Durch die Abwicklung sind Dehnungen aufgetreten. Da sich diese aber nur auf einen schmalen Bereich beziehen ist davon auszugehen, dass die durch die Drapierung des Gewebes aufgefangen werden können.

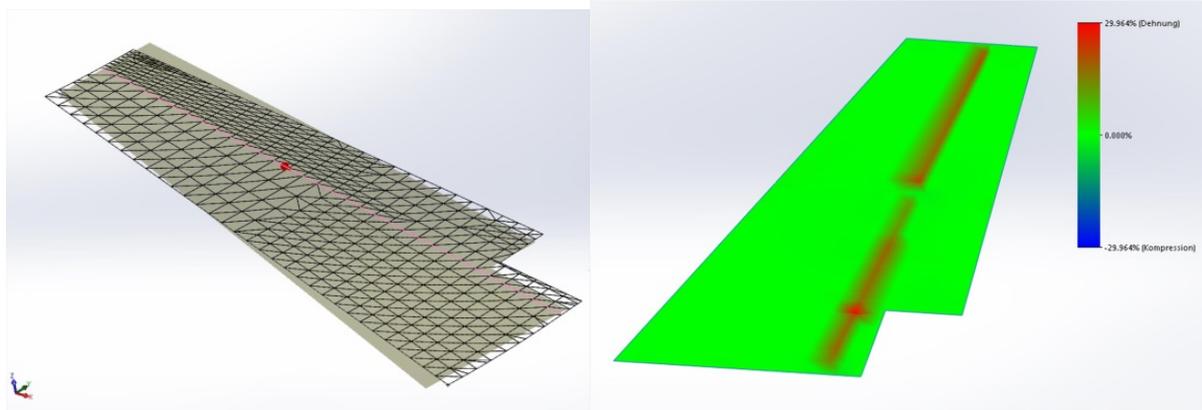


Abbildung 13: Netz und Flächenabwicklung der Schalenoberfläche [4]

Im nächsten Schritt wurde die optimale minimale Heizfeldgröße für die abgewickelte Fläche bestimmt. Der Optimierung liegt der Umstand zu Grunde, dass eine optimale Wärmeverteilung mit einem rechteckigen oder gleichförmig Trapezoiden Heizfeld zu erreichen ist.

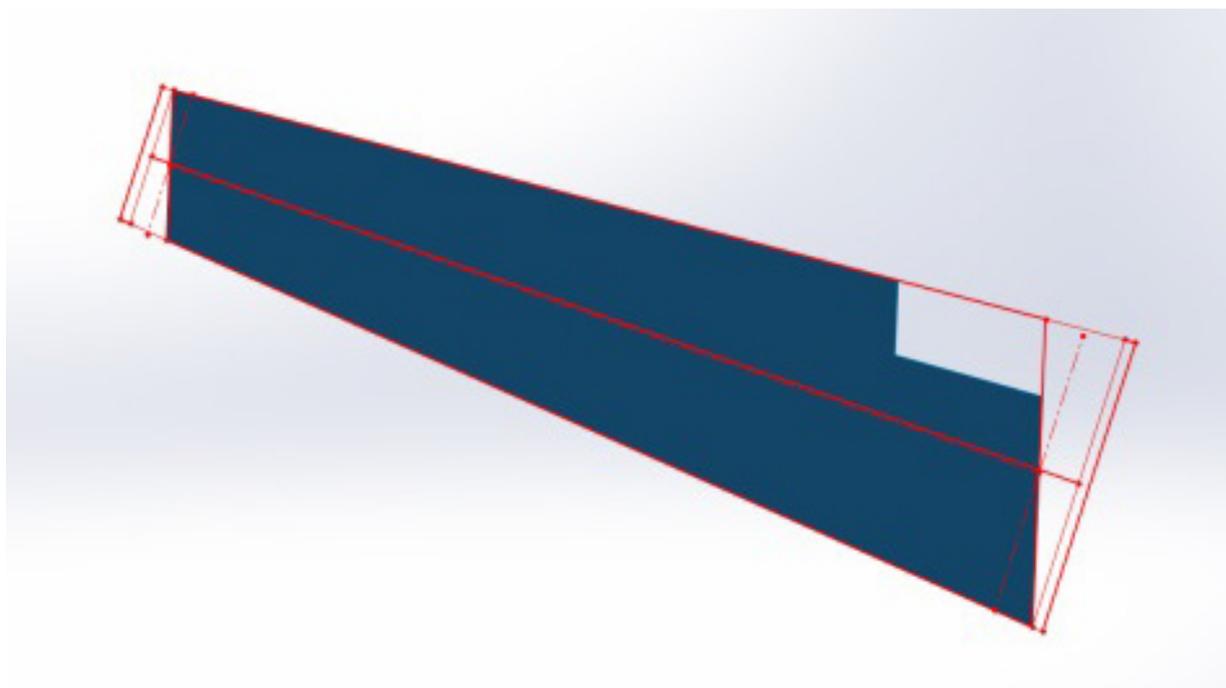


Abbildung 14: mindest zu beheizende Oberfläche in blau und abgeleitete Kontur der Heizung in rot [4]

Basierend auf der Heizfläche wurden zwei Vorschläge erarbeitet. Jeweils davon ausgehend, dass das Werkzeug drei Heizfelder hat.

Der erste Vorschlag, der erarbeitet wurde, sieht eine Teilung in drei gleich lange Heizfelder entlang der Längsachse des Werkzeuges vor. Der zweite berücksichtigt mehr die Exothermie des Harzes bei der Aushärtung des Bauteils. Hier wurde ein kleines Heizfeld im dünner belegten Tippbereich hinzugefügt und die Heizung auf der Fläche in zwei große Heizfelder geteilt.

Für den Demonstrator wurde im Workshop eine längenmäßige gleiche Teilung der Heizfelder beschlossen. Dies führte zu drei Heizfeldern, für die eine Belegung einer fibretemp®-Heizung erarbeitet wurde. Die elektrischen



Nach ersten Überlegungen musste die Werkzeuggröße auf Grund fertigungstechnischer Beschränkungen angepasst werden.

Auch wenn hier für seitens fibretech composites GmbH keine vollends befriedigende Lösung gefunden werden konnte, so konnte zumindest eine Reduktion der Außenmaße des Werkzeuges auf eine Größe gelingen, die ein Fräsen des Urmodells in einem Stück bei fibretech composites GmbH ermöglichen werden.

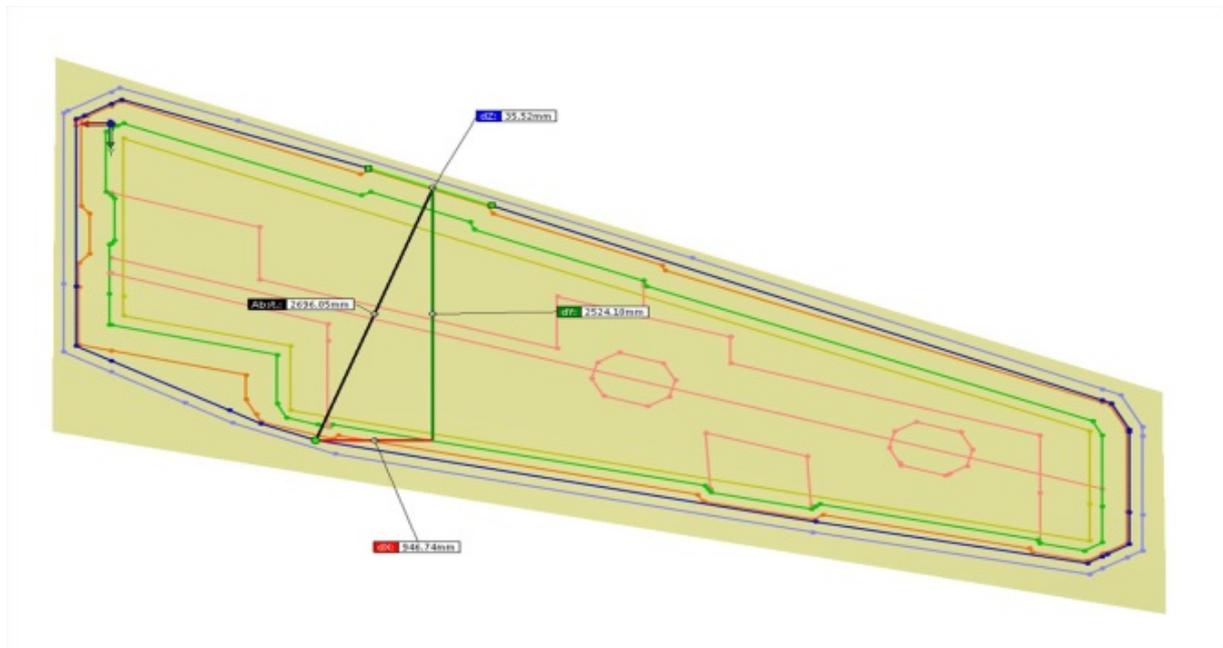


Abbildung 18: finale optimierte minimale Belegebereiche für das Werkzeug [3]

Zum dem Stand des eingangs erwähnte Workshops standen schon erste Erkenntnisse aus dem Bau des Testwerkzeuges zur Verfügung. Somit konnte das Fertigungskonzept angepasst werden.

Vorgehensehen wurde eine eigensteife Werkzeugschale die an Hebeegeräte angeschlagen und gedreht werden kann, um einerseits auf der Grofi-Anlage in vertikaler Position belegt zu werden, andererseits in horizontaler Position im Autoklav eingefahren wird, um bei der Bauteilaushärtung durch die bildgebenden Infrarot Sensoren überwacht werden zu können.

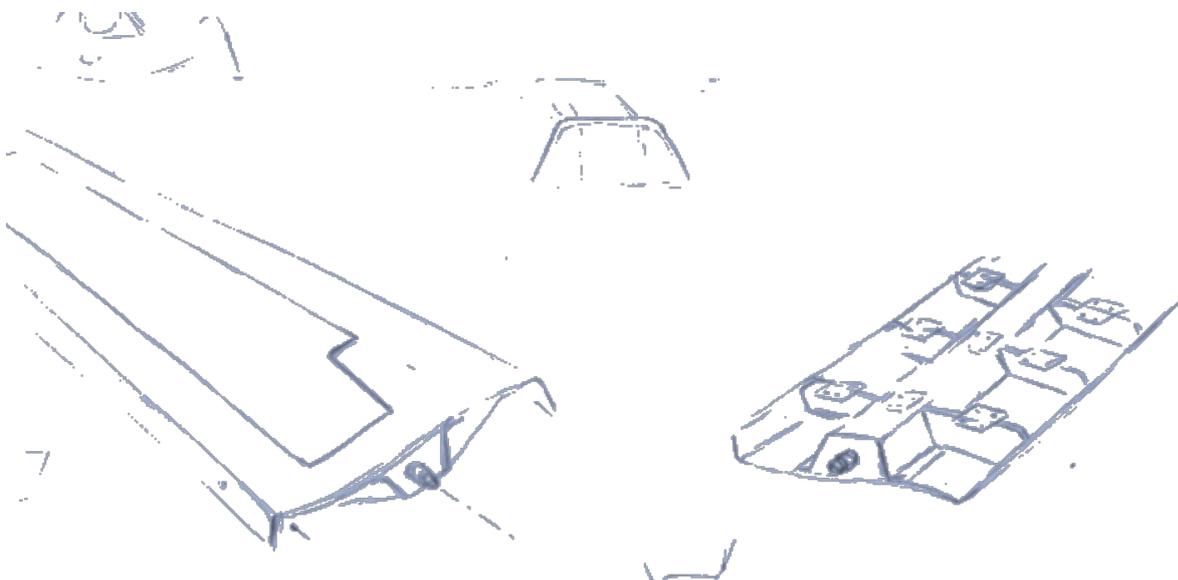


Abbildung 19: erste Skizzen zur Ausführung des Werkzeuges [4]

Für das Werkzeug wurde eine Werkzeugschale in Sandwichbauweise konzipiert.

Der Bauteilrand selber wird um 120° Abgewinkelt und dann noch ca. 100mm fortgeführt. Er dient somit der Versteifung und auch als möglicher Abdichtrand für das Tacky Tape.

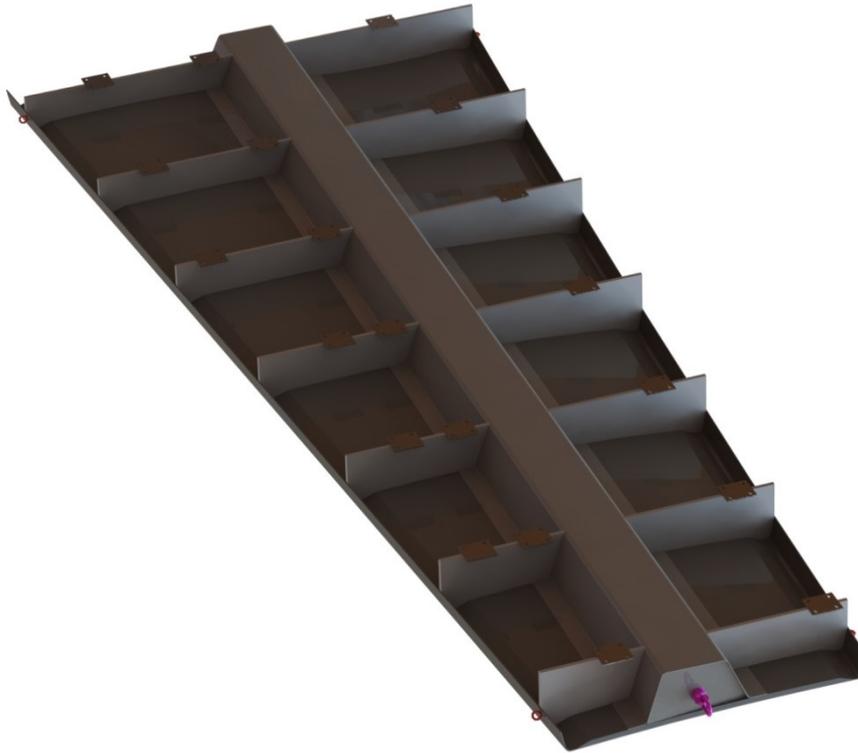


Abbildung 20: Konzept des Demonstrator-Werkzeuges von unten gesehen [4]



Abbildung 21: Konzept für die Drehaufnahme [4]

Innerhalb des Vakuumkanals wurde die Originalfläche mit einem Offset von 2,5mm abgesenkt um Platz für die spätere Belegung mit Hextool zu schaffen. Die Ausführung gleicht hier dem Test Werkzeug.

Die Fläche selber wurde als Sandwichfläche konstruiert die Rückseitig eine Versteifung erhält. Diese Versteifung muss zum einen druckdicht sein, die auftretenden Kräfte bei der Belegung abfangen und dem Bauteil genügend Eigensteifigkeit für das Handling verleihen. Zudem muss sie eine Befestigungsmöglichkeit für die GroFi-Anlage und den Autoklavwagen bieten. Diese Anforderungen wurden in der Konstruktion mit einem mehrteiligen Hinterbau begegnet. Er besteht aus einem an der Längsachse ausgerichteten Omega-Träger als zentral versteifendes Element. Zwischen ihm und dem Werkzeugrand wurden dann im Abstand von ca. 1000mm Spanten aufgestellt. Die Spanten wurden mit Befestigungsplatten ausgestattet, die die Trag- und Haltefunktion übernehmen. Hier wurde aus den Erfahrungen mit dem Test Werkzeug eine aufgelöste Bauweise gewählt, bei dem die Füße über Verschraubungen an die Tragspanten angebunden werden.

Über den zentralen Träger erfolgt auch die Aufnahme des Werkzeuges für das Kranen und Wenden. Hierfür wurde eine zentrale Rohrachse vorgesehen, die durch die Schwerebenen führt. Dadurch konnte ein leichtes Handling gewährleistet werden.

Für die Führung sind Augbolzen in der Konstruktion vorgesehen. Sie sind für das Anschlagen von Führungsseilen gedacht.

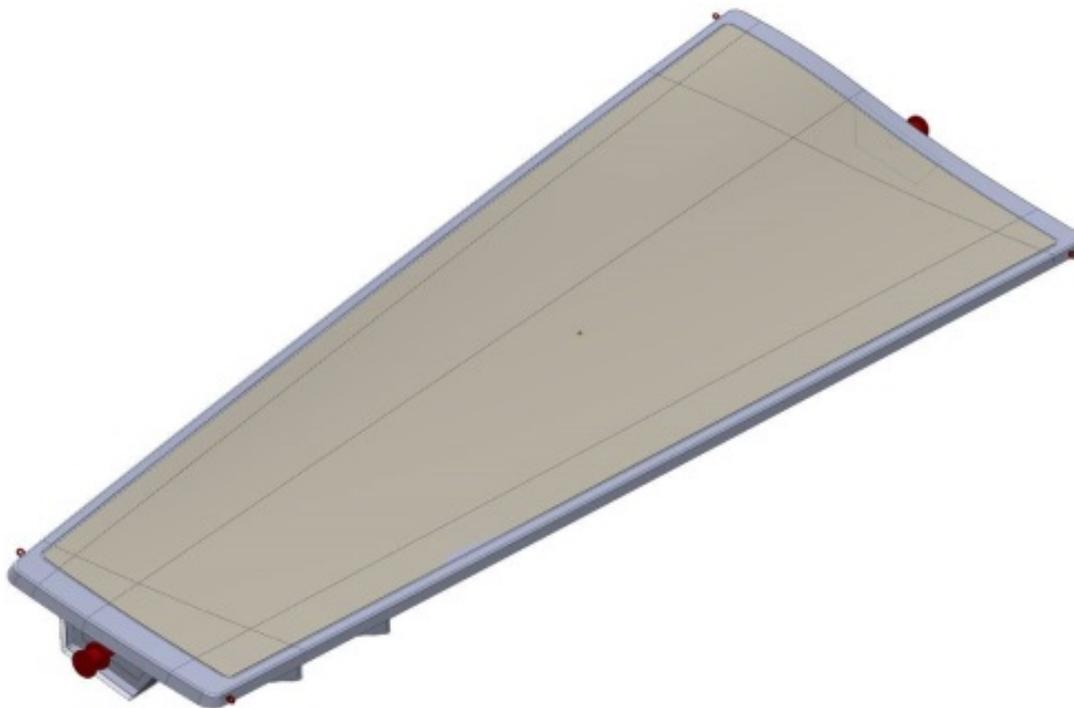


Abbildung 22: fertig konstruiertes Werkzeug mit Drehachse [4]

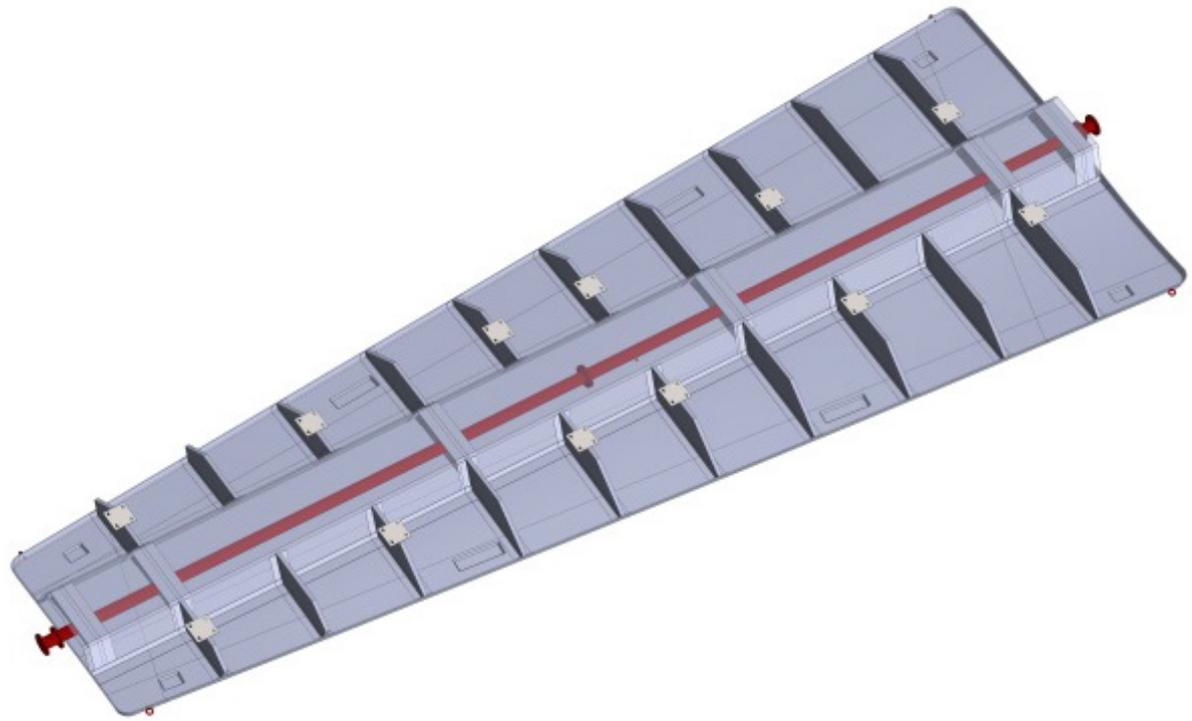


Abbildung 23: Werkzeug von der Unterseite gesehen mit Drehachse und zentraler Hutversteifung [4]

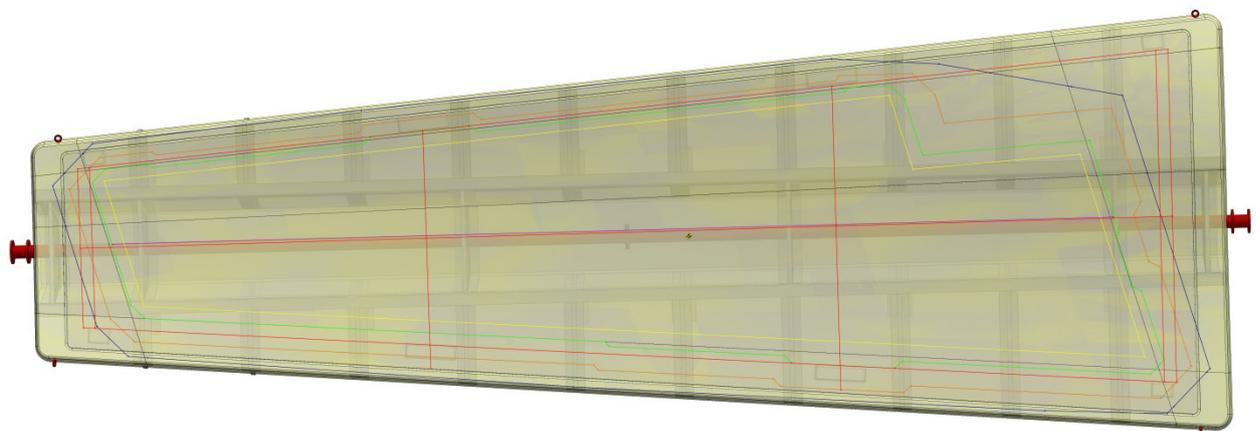


Abbildung 24: Vergleich der Werkzeugkonstruktion mit den notwendigen Belegebereichen (vgl. Bild 18) [4]

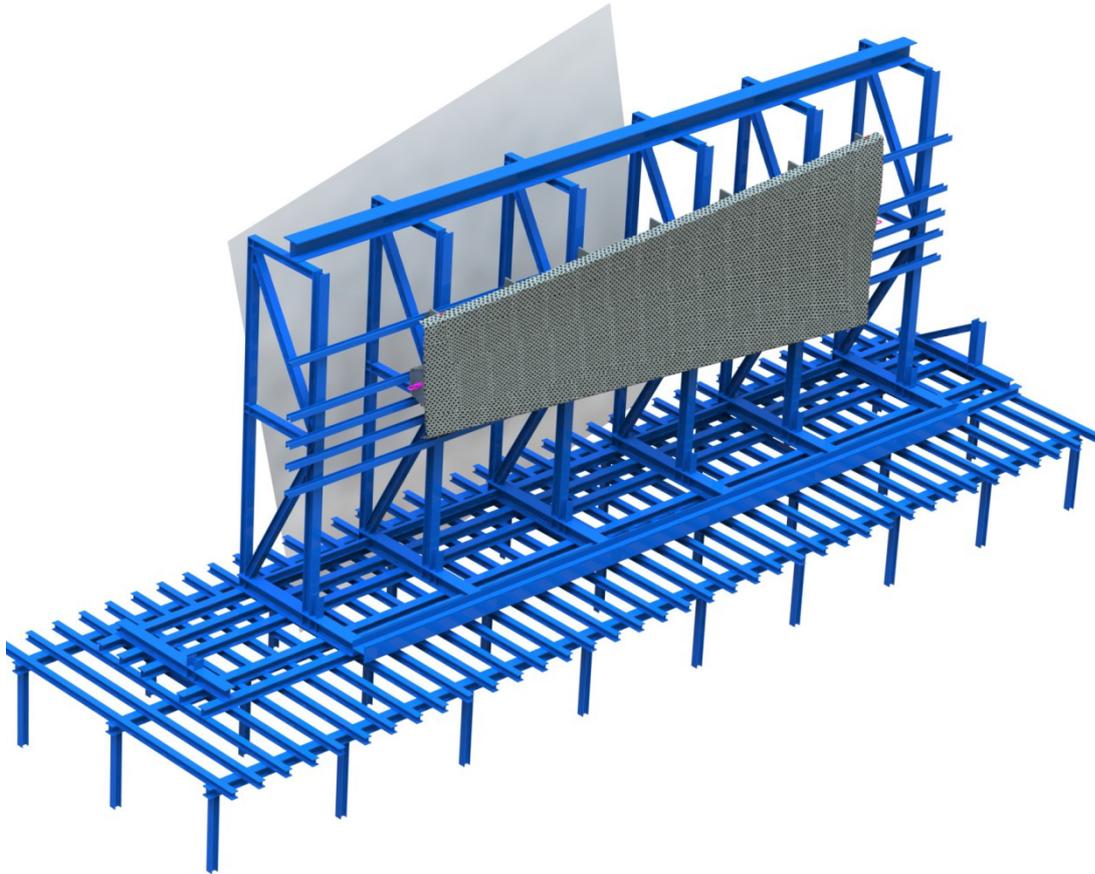


Abbildung 25: Integration des Werkzeuges auf den Montagerahmen der Grofi-Anlage im CAD-System [4]

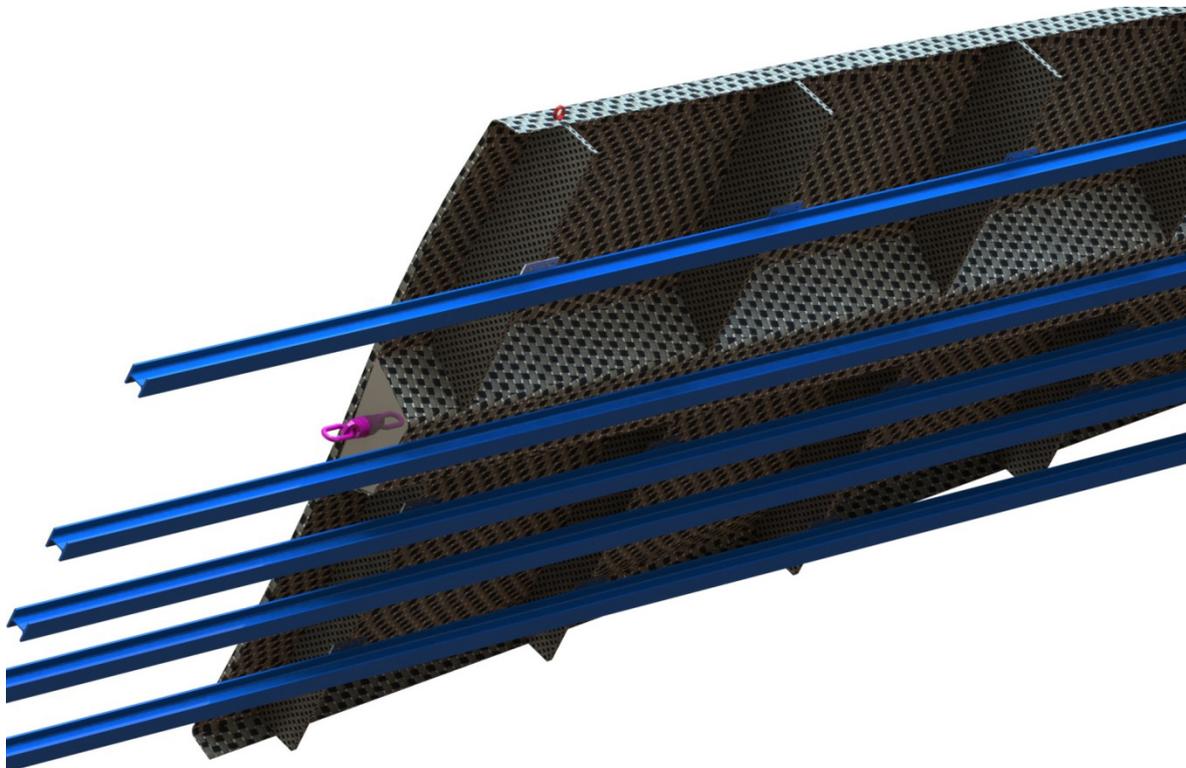


Abbildung 26: Anordnung der Fußplatten im Raster der Halteträger [4]

Für das Demonstrator Werkzeug war der Bau in einem Urmodell vorgesehen. Dieses Urmodell musste für die Infusionsbauweise geeignet gestaltet werden.  
Die Werkzeugfläche wurde hier abgenommen und entsprechend um einen Formenrand erweitert. Das Modell stellt dann ein Negativ der Demonstrator Werkzeug- Oberfläche dar.

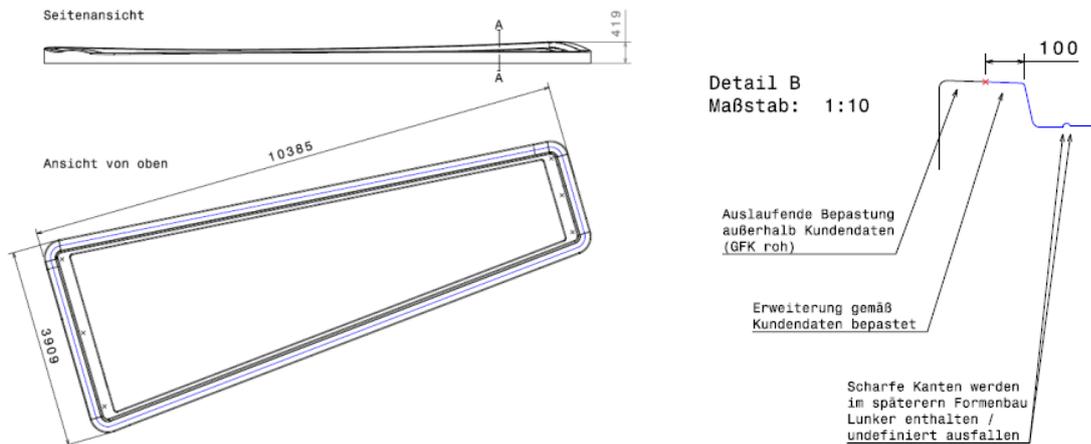


Abbildung 27: Details der Konstruktion des Urmodells [4]

Der Autoklav stellte eine eigene Herausforderung dar. Zwar ist zu diesem Zeitpunkt schon bekannt, dass das Testwerkzeug, wenn auch mit Einschränkungen, den Belastungen im Autoklav grundsätzlich gewachsen waren und sein wird. Jedoch stellte sich immer noch die Frage nach der elektrischen Lasteinleitung und Weiterleitung im Autoklav.

Die Firma Scholz war hier nicht im Stande eine Lösung zu bieten und so mussten eigene Wege gefunden werden.



Abbildung 28: Forschungs-Autoklav im DLR Stade [2]



Abbildung 29: Einlass im Deckenbereich [2]

Zu klären waren die Art der Leistungskabel und die Ausführung der Anschlüsse im Autoklav.

Die Kabel haben den Anspruch der elektrischen Leistung, der Umgebungstemperatur von 180°C und dem Überdruck von 6bar genüge zu leisten. Zudem sollten sie silikonfrei sein, was die Suche erheblich erschwerte.

Trotz dieser Randparameter konnten zwei Hersteller gefunden werden. Ein Problem stellte hier auch die geringe benötigte Menge dar. Gebraucht werden später ca. 300m. Die angebotenen Mindestmengen betragen aber 500m bis 1km.

Durch viel Verhandlung konnte letzten Endes ein Hersteller gefunden werden, der ein den Spezifikationen entsprechendes Spezialkabel liefern konnte.



Abbildung 30: Speziell angefertigtes hochtemperaturkabel mit silikonfreier Teflonumantelung [4]

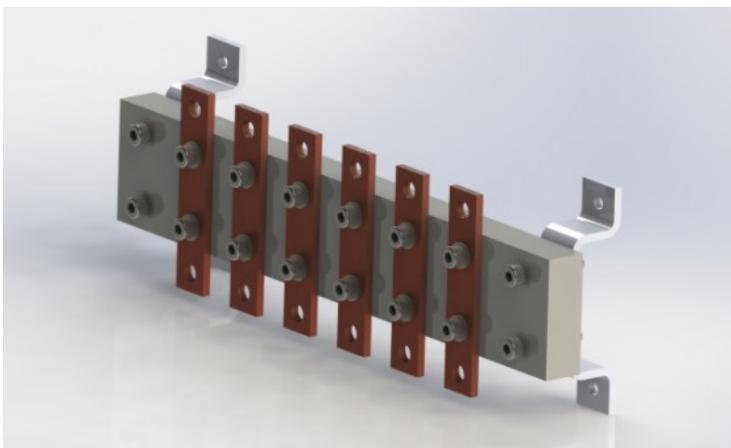


Abbildung 31: Konstruierter Klemmblock[4]

Die Firma Scholz wird dafür die Schottdurchführungen im Autoklav entsprechend mit Volladerleitungsdurchführungen versehen.

Auch hier gab es in der Konzeptionsphase im ersten Halbjahr Probleme. Die Firma Scholz fand lediglich Durchführungen mit maximal 260A Stromlast. So musste seitens fibretech composites GmbH die Kontaktierung auf insgesamt zwei Leitungen pro Anschlussseite jedes Heizfeldes ausgelegt werden. Damit ergeben sich 12 Leitungen (vier pro Heizfeld, je zweimal Plus und zweimal Minus).

Um hier zu einer Lösung zu gelangen, die produktionstechnisch sicher ist, wurde seitens fibretech composites eine Klemmblock entwickelt, auf dem primärseitig die Lastkabel und sekundärseitig die Werkzeugkabel aufgelegt werden.

Der Körper selber besteht aus nicht leitendem SiO<sub>x</sub> und besitzt vernickelte Klemmblöcke. An diesen werden die Kabel mittels Kabelschuhen angeschraubt. Der Klemmblock selbst wurde so konstruiert, dass er auf die Luftleitbleche an der Autoklavwand geschraubt werden kann.

### 2.2.3 Begleitende Tests

Für das Prototypenwerkzeug und das Demonstrator Werkzeug wurde eine ganze Reihe von Vor- und Begleittest durchgeführt.

Getestet wurden Einzelkomponenten, Materialcoupons, aber auch komplette Aufbauten von Heizfeldern.



Abbildung 32: Temperaturbeständigkeitstest der Magnete, die Zertifizierung reichte nur bis 150°C [4]

Vorrangig wurden die Schnittstellen zu Autoklav-Prozessen behandelt. Hieraus resultieren auch die Anforderungen nach Anschluss technik für z. B. hohe Prozesstemperaturen. Es wurden zum Beispiel entsprechende elektrische Steckkontakte ausgewählt und getestet. Die Test warne nicht erfolgreich, weswegen die oben beschriebenen Lösung verfolgt wurde.

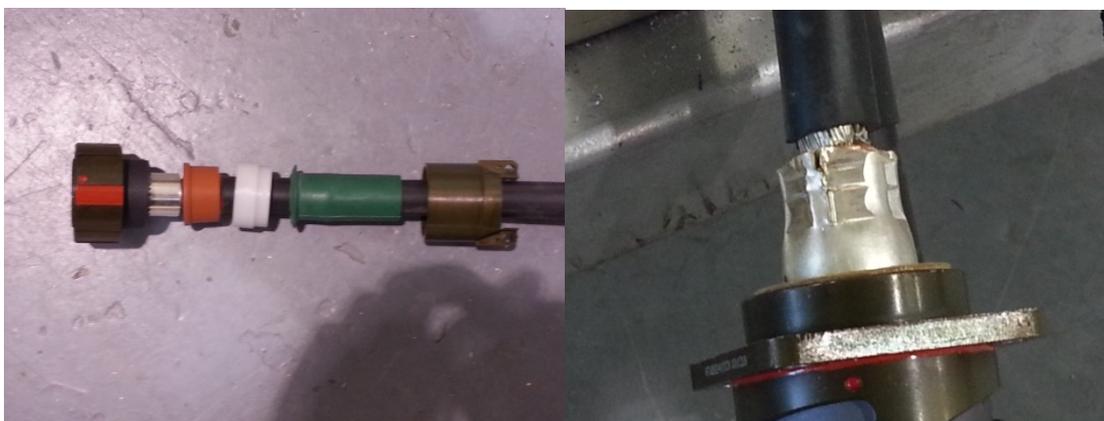


Abbildung 33 a&b: Tests von Hochstromsteckern für hohe Temperaturen und Drücke, Abbildung b zeigt Risse der Crimphüle nach dem Verpressen [4]

Die zu verwendende Matrix für die Basis des Prototypen und Demonstrator-Werkzeuges ist ein zum Verwendungszeitpunkt im Projekt relativ neues Harzsystem. Bevor es eingesetzt wurde studierten wir zuerst das Verhalten während einer Vakuuminfusion und später die Stabilität und Toleranz bei zyklischen Heiztest.

Wichtig ist dafür dass sich das verwendete Harz, wie in diesem Fall, trotz Einsatztemperaturen nahe des TGs als Resistent gegen Versprödung und Mikrorisse zeigt.

Ersteres fielen hier besonders positiv auf, zumal wir über die Jahre immer wieder auf dem Markt Hochtemperaturharze auftauchten, die aber allesamt nicht den Ansprüchen an eine Formenharz gerecht werden konnten, aus diversen Gründen.

Der Versuchsaufbau entstand als eine einfache flache Platte mit integrierter Heizung nach dem fibretemp-System.

Auch die Schadensresistenz bei Überhitzung wurde abgetestet und hier eine gutmütige Toleranz des Harzes festgestellt

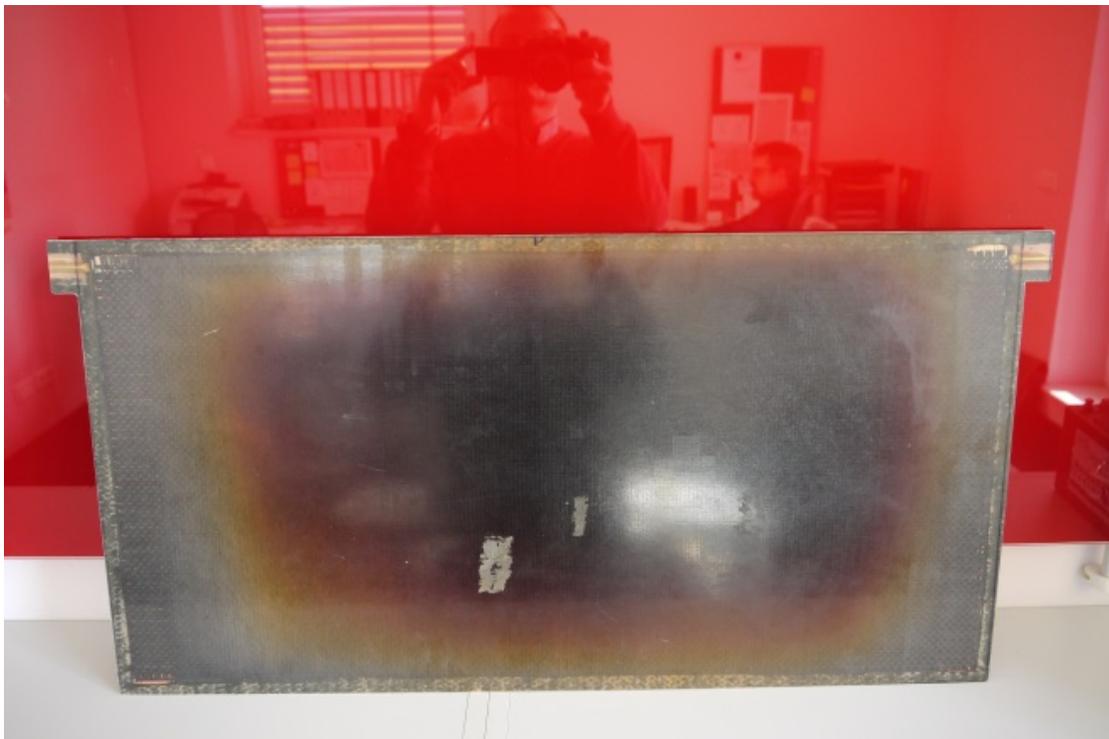


Abbildung 34: Testplatte nach 500 Zyklen (noch mit Glasgewebe als Oberflächenlage [4])

Weitere Tests dienen der Kombination zweier Heizfelder in einem Heizwerkzeug für so hohe Anwendungstemperaturen.

Grundsätzlich sollten die Heizfelder in Reihe angeordnet werden. Jedes Heizfeld das nach dem fibretemp System erstellt wird hat aber einen ca. 10cm breiten Kontaktierungsbereich. Dies kann auch der Webseite entnommen werden. Grundsätzlich hat dieser Bereich einen geringeren elektrischen Widerstand und somit auch eine geringere elektrische Leistung. Fügt man aber zwei Heizfelder aneinander, so soll die möglichst nahtlos geschehen, weshalb man die Kontaktierungsbereiche überlappen lässt. Dies folgt aber in diesem Überlappungsbereich zu doppelter Leistung, so dass selbst wenn man eine geringere Leistung in jedem Kontaktierungsbereich hat, die Addition beider zu einer Überhitzung führen kann.

Darum ist es unabdingbar diesen Stellen so zu gestalten, dass ihre summierte elektrische Heizleistung dem der einzelnen Felder entspricht.

Dies wurde in variierenden Aufbauten erst trocken unter Vakuum und anschließend mit einem kleinen Testwerkzeug überprüft.

Dasselbe Testwerkzeug diente später für Interface-Test der Hextool Oberfläche.

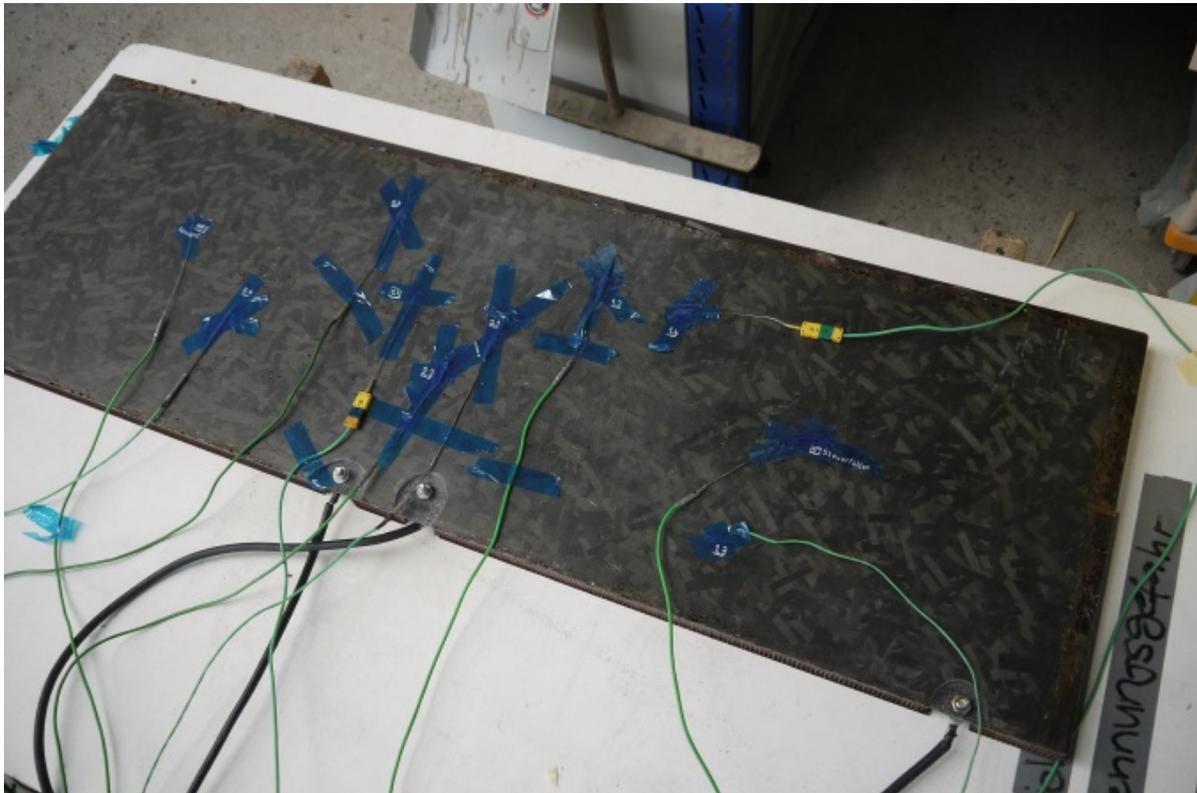


Abbildung 35: Testplatte mit zwei Heizfeldern und überlappender Kontaktierung, sowie einer Hextool Oberfläche [4]



Abbildung 36: Temperatursensoren zur genauen Erfassung der Temperaturen im Überlappungsbereich [4]



Abbildung 37: Infrarotbild des Überlappungsberreiches im Vorversuch unter Vakuum, deutlich ist noch die heißere Überlappung zu erkennen die optimiert wurde [4]

Bevor das Demonstrator Werkzeug seinen ersten Testlauf auf 180°C und den gewünschten Umgebungsdruck antrat, wurde sicherheitshalber noch einmal separat eine Coupon der Wabenstruktur mit dem Autoklavdruck und der maximal Temperatur beaufschlagt. Hier zeigte sich, dass der Wabenkern dem vollen gewünschten Druck von 10 bar nicht standhielt. Daraufhin wurde ein Grenzdruck von 5bar statt maximal 10bar festgelegt. Betrachtet man den im Projekt spezifizierten Arbeitsdruck von 6bar, ist die Reduzierung jedoch, bei einer sorgfältigen Ablegweise der Faserhalbzeuge für die Flügelschale vertretbar.



Abbildung 38 a & b: Couponstest zur Druckstabilität des Wabenkerns im Autoklaven [4]

Die Belegung einer Flügelschale ist sehr Zeitaufwendig und Material intensiv. Aus diesem Grund ist der Einsatz für Langzeitstudien schwierig.

Nach den erfolgreichen Inbetriebnahme und ersten sehr zufrieden stellenden Test des Demonstrator Werkzeuges bestand von Seiten fibretech composites wie auch von den Projektpartnern der Wunsch erweiterte Zyklustests durchzuführen. Hiermit soll eine bessere Aussage über die Lebensdauer eines fibretemp®-Werkzeuges in Zusammenwirken mit dem Autoklaven ermöglicht werden.

Für die Test wird ein neues kleines Testwerkzeug gebaut werden. Dieses wird dann auch mit einer Hextool Oberfläche ausgerüstet. Nach Fertigstellung wird es dann erweiterten Zyklus Versuchen im Autoklaven unterworfen werden.

Zusätzlich wird dieses Werkzeug als Besonderheiten die Möglichkeit der Durchbrüche direkt durch das Heizfeld enthalten, was eine weitere Verfeinerung der Anordnung darstellt



Abbildung 39: Infusion einer Probeplatte für Zyklustests [4]

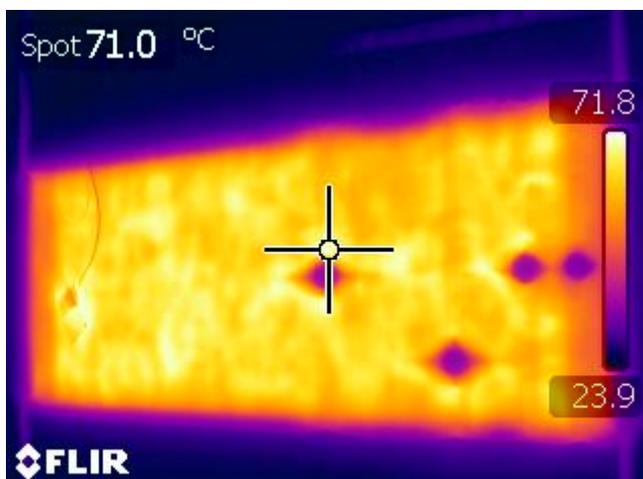


Abbildung 40: Infrarotbild der Platte, erkennbar sind Durchbrüche für Anschlüsse [4]

#### 2.2.4 Testwerkzeug

Der Bau des 1m<sup>2</sup> Werkzeugs wurde begonnen und ist voraussichtlich in KW2 2016 abgeschlossen.

Es wurde eine Negativform der Formseite des Werkzeugs erstellt. Hierfür wurde ein Beheizter Werkboden verwendet und die notwendigen Seitenteile und Einleger für Arbeitsflächenrecess und Vakuumkanal mit eingebracht.

In die so entstandene Form wurden zugeschnittene Gewebelagen entsprechend dem vorher erarbeiteten Laminatplan drapiert.

In diesem Prozess wurde das Heizfeld mit eingebracht und elektrisch mittels eingelegter Glasfaserlagen gegen alle sonstig leitenden Bereiche des Testwerkzeuges isoliert.

Vor der Infusion wurde ein Heiztest durchgeführt, der Funktionsfähigkeit und Gleichmäßigkeit des Feldes validiert hat.

Dazu wurde die Heizfläche mit den Verstärkungslagen versehen. Anschließend erfolgte eine Infusion mit dem aus Vortests bestimmten Hochtemperatur Epoxidharzsystem Epolam 2092 von Axson.

Nach der Infusion fand ein Vortempern der Fläche bei 40°C über 24h statt. Anschließend wurde der durchlüftete Sandwichaufbau und der Hinterbau aufgebracht. Dazu wurde die infusierte Fläche mit einem gelochte Aluminium Wabenkern und eine druckfester Hochtemperaturschaum versehen und mit zwei CFK-Prepreg Lagen verschlossen.

Anschließend wurden Sandwich Schaumstege und die Halteplatten für die Grofi-Anlage aufgebracht. Das Testwerkzeug wurde danach entformt und freistehend endgetempert. Was in diesem Fall nur das tragende System umfasst. Die Funktionsschicht war hier noch nicht aufgebracht.

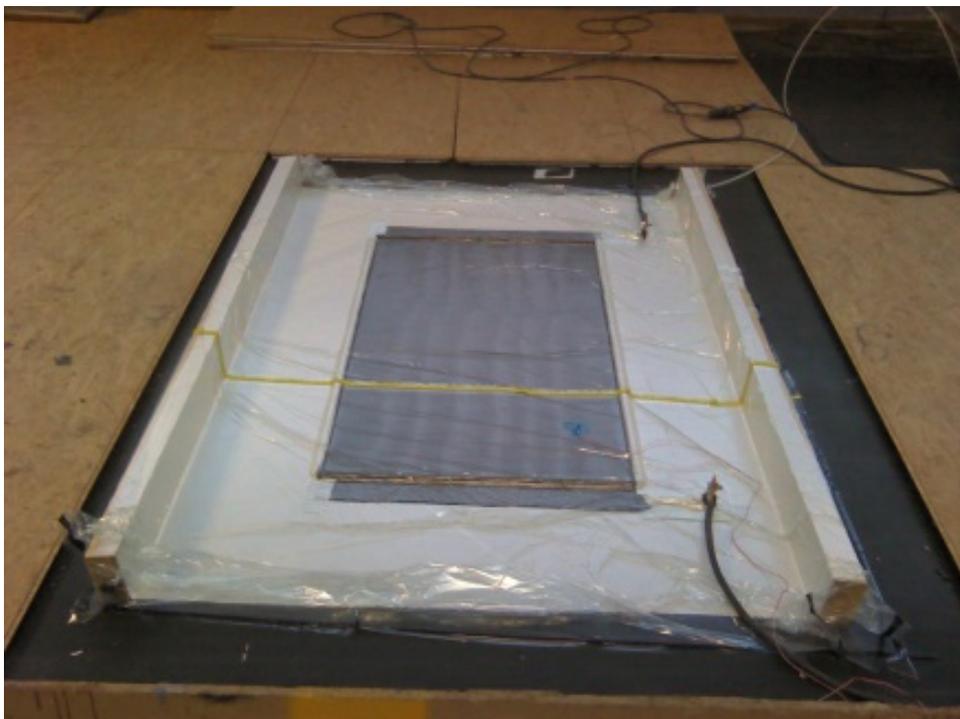


Abbildung 41: Test der trockenen Heizung unter Vakuum [4]



Abbildung 42: Infusion der Oberseite des Test-Werkzeuges [4]

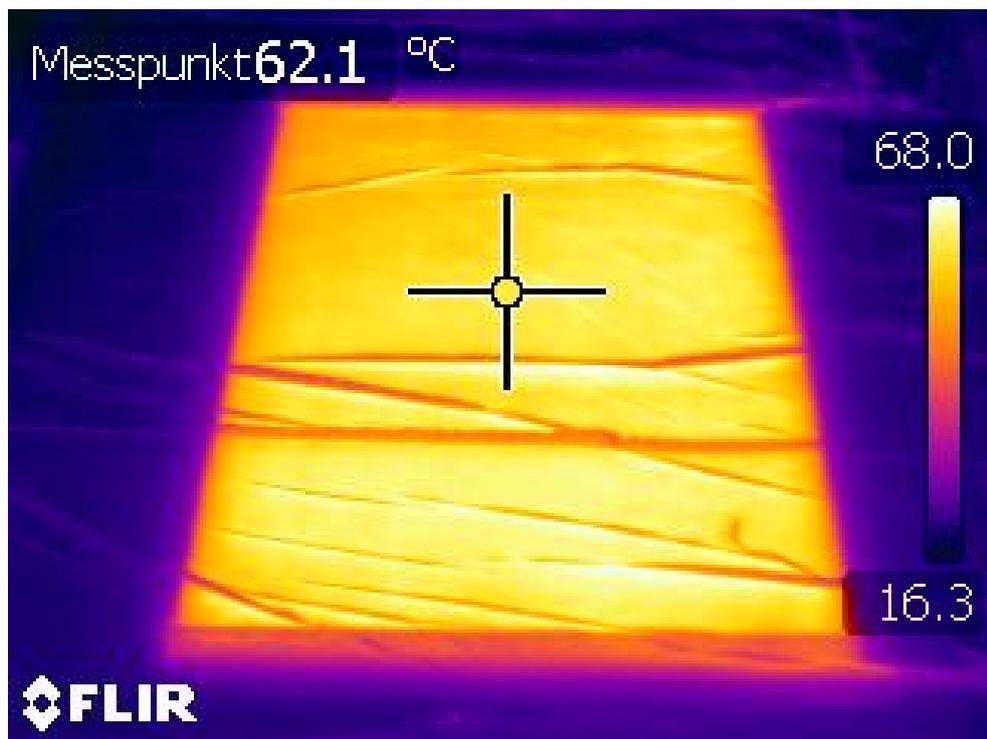


Abbildung 43: Heizungstest nach erfolgter Infusion [4]



Abbildung 44: Einbringung des durchlüfteten Wabenkerns [4]

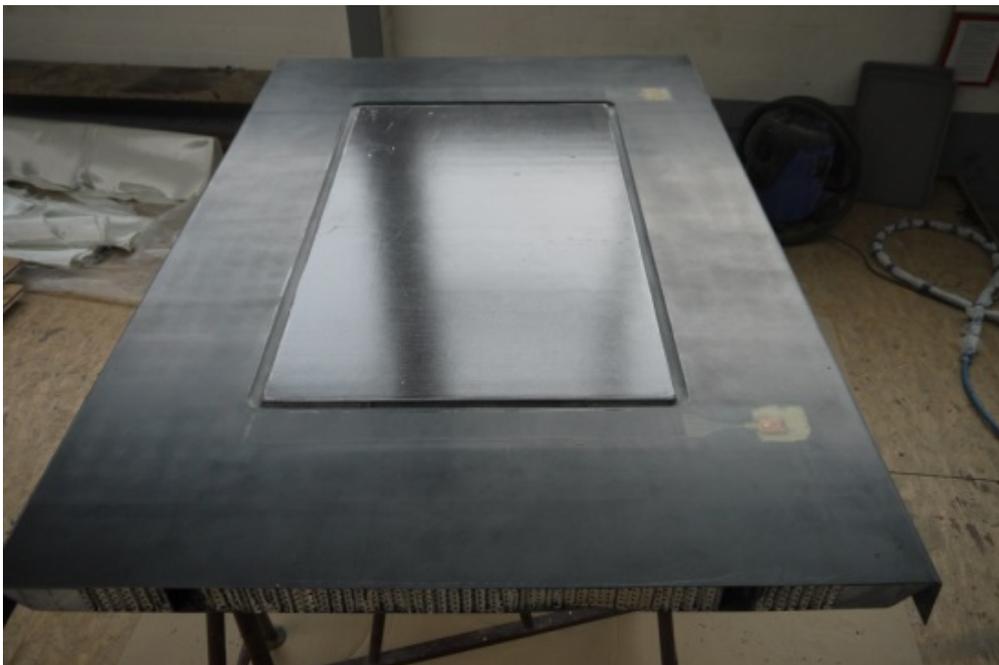


Abbildung 45: Das Werkzeug ist fertig zur Abbringung der Hextool Oberfläche [4]

### Hextool Oberfläche

Der Funktionsbereich auf dem das eigentliche Bauteil entsteht soll aus einer 1-3mm starken Hextool Lage bestehen. Bei Hextool handelt es sich um ein CFK-Tooling Prepreg das aus wild verteilten und orientierten 30-40mm langen und 10-20mm breiten CFK UD-Streifen mit einem BMI-Harzsystem besteht.

Dieses Material soll eine verschleißfeste Oberfläche ergeben, welche über den gesamten Fertigungszeitraum eine gleichbleibende Güte gewährleistet. Durch die Frästechnische Bearbeitung soll die Genauigkeit erst im letzten Schritt erfolgen, so dass sie nicht komplett über das Urmodell und beim Formenbau eingestellt und gewährleistet werden muss.

Von fibretch composites GmbH wurde auf dem Testtool in dem dafür vorgesehenen Bereich vier Lagen Hextool aufgebracht und mit einem Vakuumaufbau versehen.

Anschließend wurde das Werkzeug nach Stade verbracht, wo es im Airbus Autoklaven unter Druck bei 190°C vorgetempert und im Ofen des CTC bei 216°C über 16h nachgetempert.

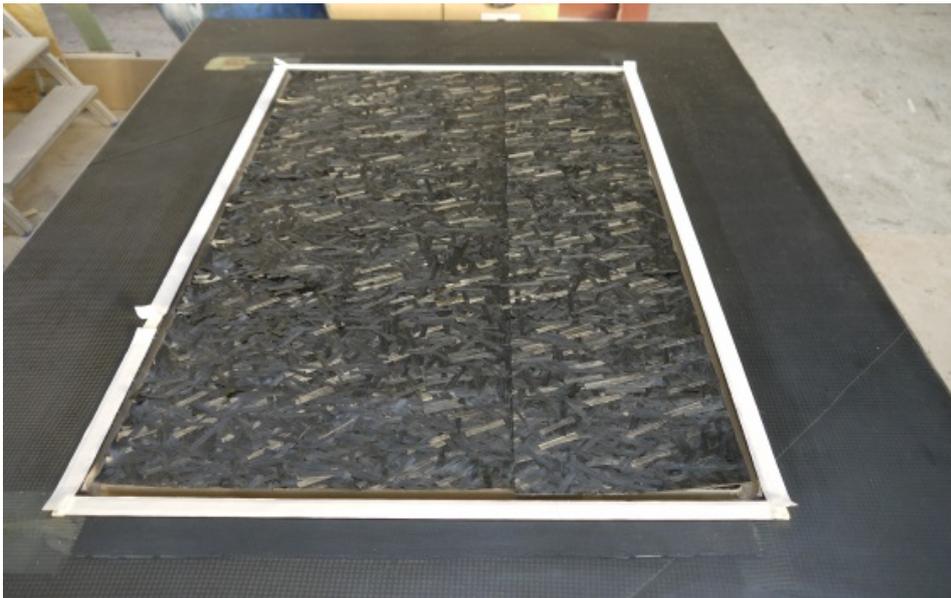


Abbildung 46: Aufbringen des Hextool Prepregs auf der vorgesehenen Belegefläche [4]

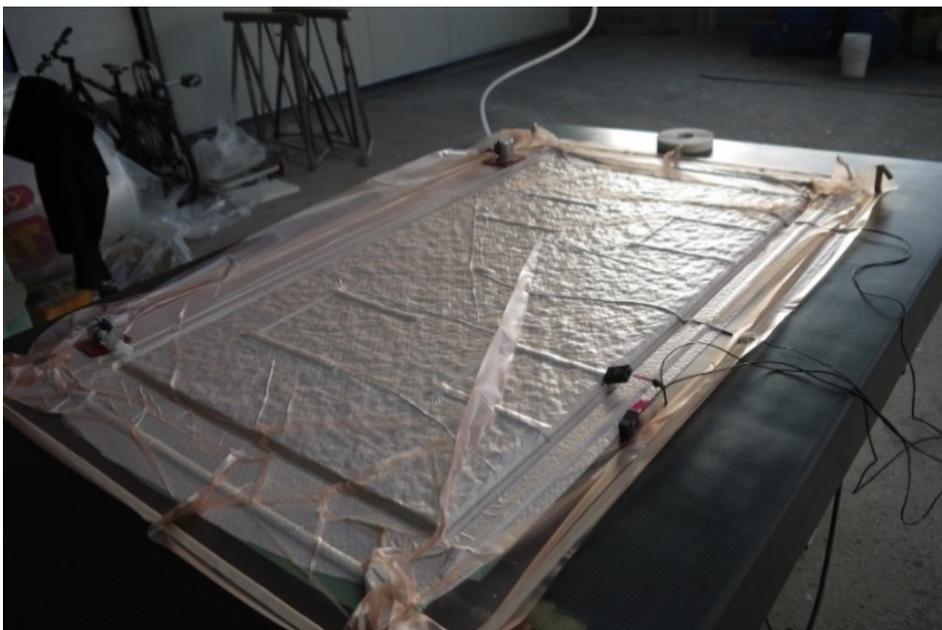


Abbildung 47: Vakuumaufbau über der Belegefläche vor der Einbringung in den Autoklaven [4]

Das Testwerkzeug wurde mit dem neuen Aufbau nach Stade verbracht und dort zuerst im Autoklav bei 190°C und 6bar Druck über 12h normal getempert.

Anschließend zeigten sich die zu erwartenden Verfärbungen der offen liegenden Epoxidharzbereiche die durch Oxidation entstehen. Zudem war der Schaumkern zusammengeschmolzen und eingefallen. Die Oberfläche war aber zu diesem Zeitpunkt in einem guten und fehlerfreien Zustand.

Im Anschluss folgte eine Nachtemperung bei 210°C über 16h bei Umgebungsdruck im Ofen des CTC.

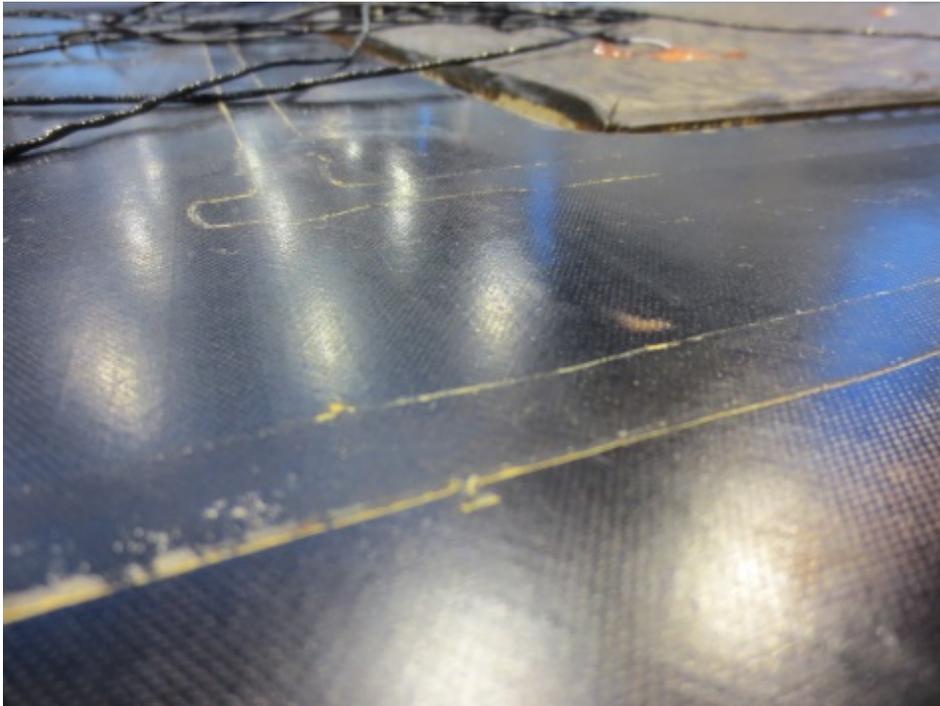


Abbildung 48: Werkzeugoberfläche nach dem Autoklavzyklus und anschließender Temperung im Ofen [4]



Abbildung 49: Rückseite des Werkzeuges, die Fußkonstruktion erwies sich noch nicht als ideal [4]

Zur Begutachtung und für Funktionstests wurde das Testwerkzeug zu fibretech composites zurückgebracht und dort eingehend untersucht. Hier wurden auch kleine Reparaturen der Oberfläche durchgeführt.

Nach weiteren Funktionstests bei maximaler Betriebstemperatur von 180°C wurde das Werkzeug zur FA. Grunewald zu Fräsen transportiert.

Beim Fräsen ergaben sich beim Testwerkzeug Probleme. So war die Verbindung zum Wabenkern den Belastungen der spanenden Bearbeitung nicht gewachsen. Sie löste sich teilweise.

Auch die Güte der gefrästen Oberfläche war nicht zufriedenstellend und bedurfte händischer Nacharbeit.

Das Test Werkzeug wurde erneut nach dem Fräsen zurück zu fibretech composites GmbH zur Wiederherstellung der Anbindung des Wabenkerns und zur Endausrüstung transportiert. Die Begutachtung zeigte, dass auch die Funktionsfläche einer nicht unerheblichen Nacharbeit bedurfte.

Zur Anbindung des Wabenkerns wurde auf der Rückseite im 10cm Abstand Löcher gebohrt und durch sie Harz eingespritzt. Anschließend wurde der Wabenkern auf einem Tisch verpresst. Dies brachte eine deutliche Verbesserung der Steifigkeit.

Es erfolgte noch eine händisch Bearbeitung der Oberfläche um sie von den größten Unebenheiten zu befreien.



Abbildung 50: Oberfläche nach der frästechnischen Bearbeitung [4]

Das Werkzeug wurde am 30.05.2016 zum DLR Stade für die weiterführenden Belegeversuche und Autoklavtests überstellt. Für die ersten Versuche wurde eine mobile Heizeinheit bereitgestellt. Die Mitarbeiter des DLR wurden in die Funktion derselben unterwiesen.



Abbildung 51: vakuumtest der Anschlüsse im umlaufenden Kanal [4]

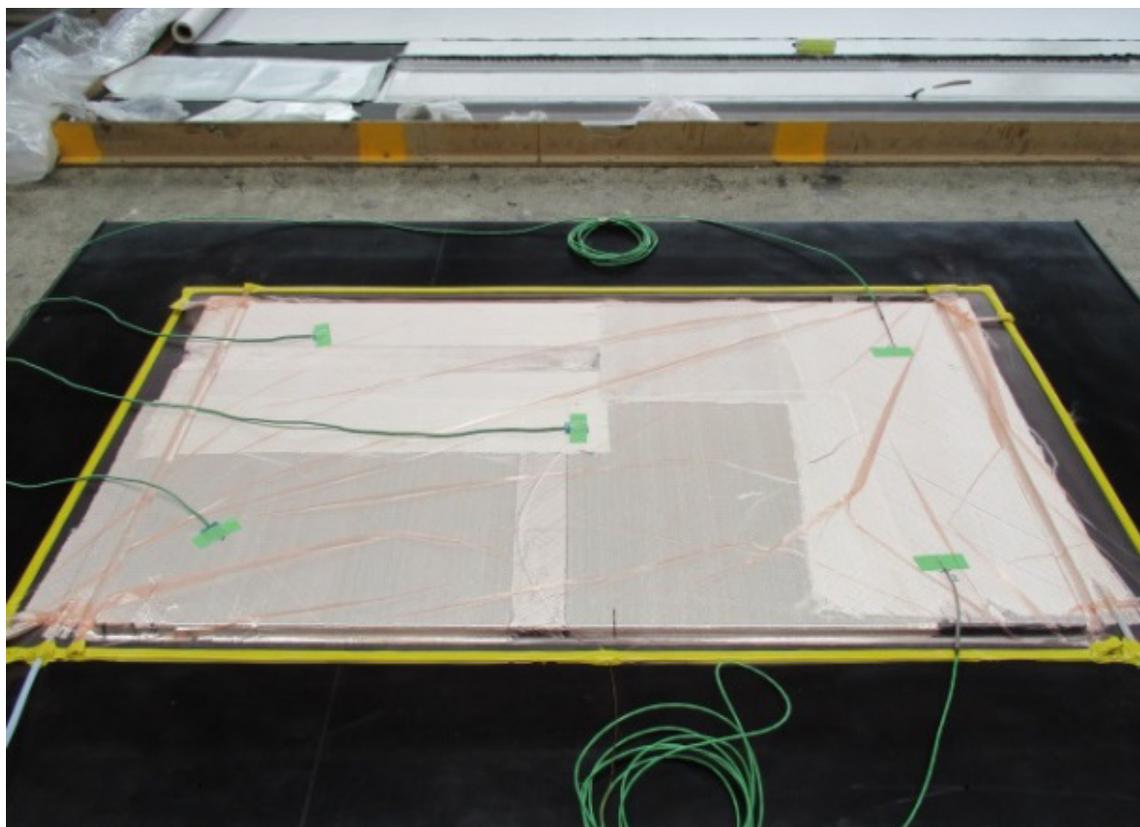


Abbildung 52: Vakuumtest und bestimmen der Temperaturdifferenz Oberfläche zu Messstelle [4]

## 2.2.5 Demonstratorwerkzeug

### Urmodell

Das Urmodell wurde in bekannter Bauweise mit einem bepasteten Kern ausgeführt. Hierzu wurde zunächst auf einem Tragrahmen eine Konstruktion aus Balsaholz aufgebracht und mit einem Offset zur Originalkontur von ca. 20mm frästechnisch mit einer 3-Achs CNC Fräse bearbeitet. Anschließend erfolgte die Applikation von zwei 1200g/m<sup>2</sup> E-Glas Quadraxial Gelege Lagen im Handlaminierverfahren. Sie stellen die Vakuumdichtigkeit zur Rückseite her.

Danach erfolgte die Aufbringung einer Toolingpaste die abschließend auf Endkontur gefräst wurde. Danach erfolgte das Versiegeln und Eintrennen der Oberfläche für den Bau.

Die Versiegelung schließt dabei die Poren der Oberfläche in der Tooling Paste. Das Trennmittel gewährleistet eine sichere Entformung des infusierten Demonstrator Werkzeug Bauteils.



Abbildung 53: Urmodell für das Demonstrator-Werkzeug [4]



Abbildung 54: Detailansicht des Vakuumkanals im negativ [4]

## Bau

Der Bau erfolgte gemäß der erstellten Fertigungsunterlagen. Auf Grund der Erfahrungen mit der Glasfaseroberfläche beim Test Werkzeug erfolgte die Ausführung der Oberfläche mit Basaltfasern um weniger Spannungen durch unterschiedliche Wärmeausdehnungen in den Laminataufbau einzubringen.

### Der Aufbau erfolgte in Schritten:

- Belegen des Urmodells mit Deckschichtlagen, Heizfeldern, Isolations und Verstärkungslagen
- Prüfen der Heizfelder in trockenem Zustand unter Vakuum
- In Form Infusion der Werkzeugoberfläche mit samt Isolations- und Verstärkungslagen
- Anschließend die Aufbringung des Wabenkerns mittels Prepreg
- Das Verschließen des Wabenkerns mittels Prepreg
- Der Bau des Omega Trägers
- Der Bau der Spanten
- Bau des Tragrohres
- Einpassen des Omega Trägers und Anbindung an die Rückseite der Werkzeugoberfläche
- Einpassen der Spanten und Anbindung an die Rückseite und die Seiten des Omega Trägers
- Verschließen der offenen Wabenkerne nach dem Besäumen der Spanten
- Produktion der Fußstücke
- Anschluss der Fußstücke
- Entformen des gesamten Werkzeuges
- Prüfen der Oberfläche
- Prüfen der Heizung



Abbildung 55: Basaltvliesoberfläche [4]

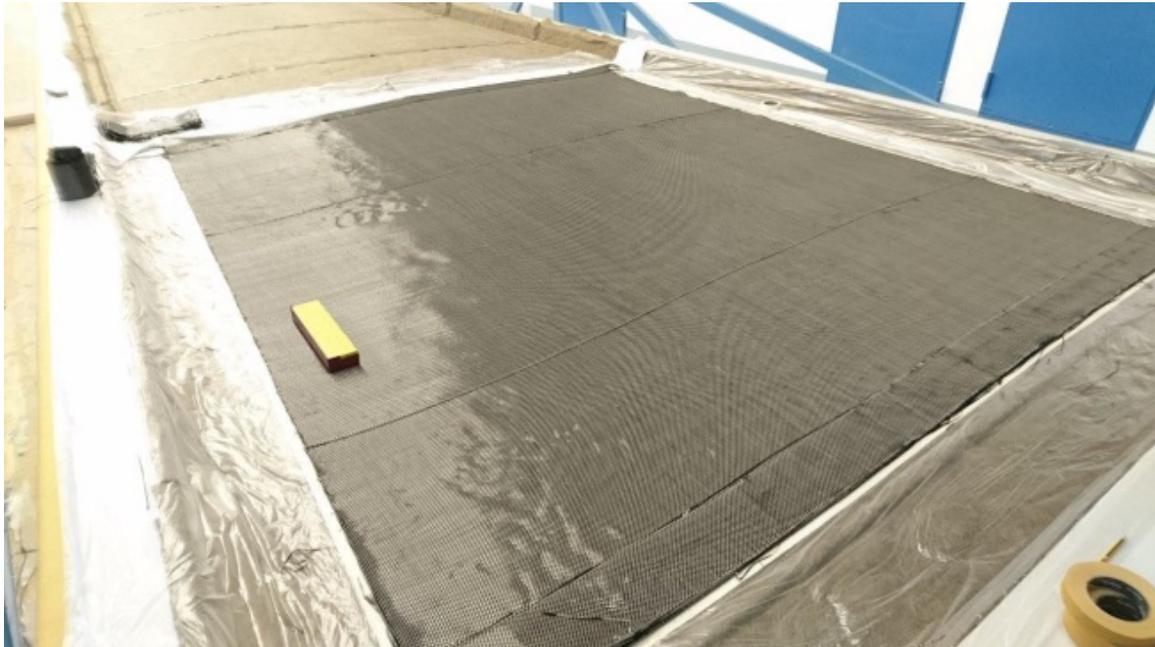


Abbildung 56: Belgen der Heizfelder, hier Heizfeld 1 [4]

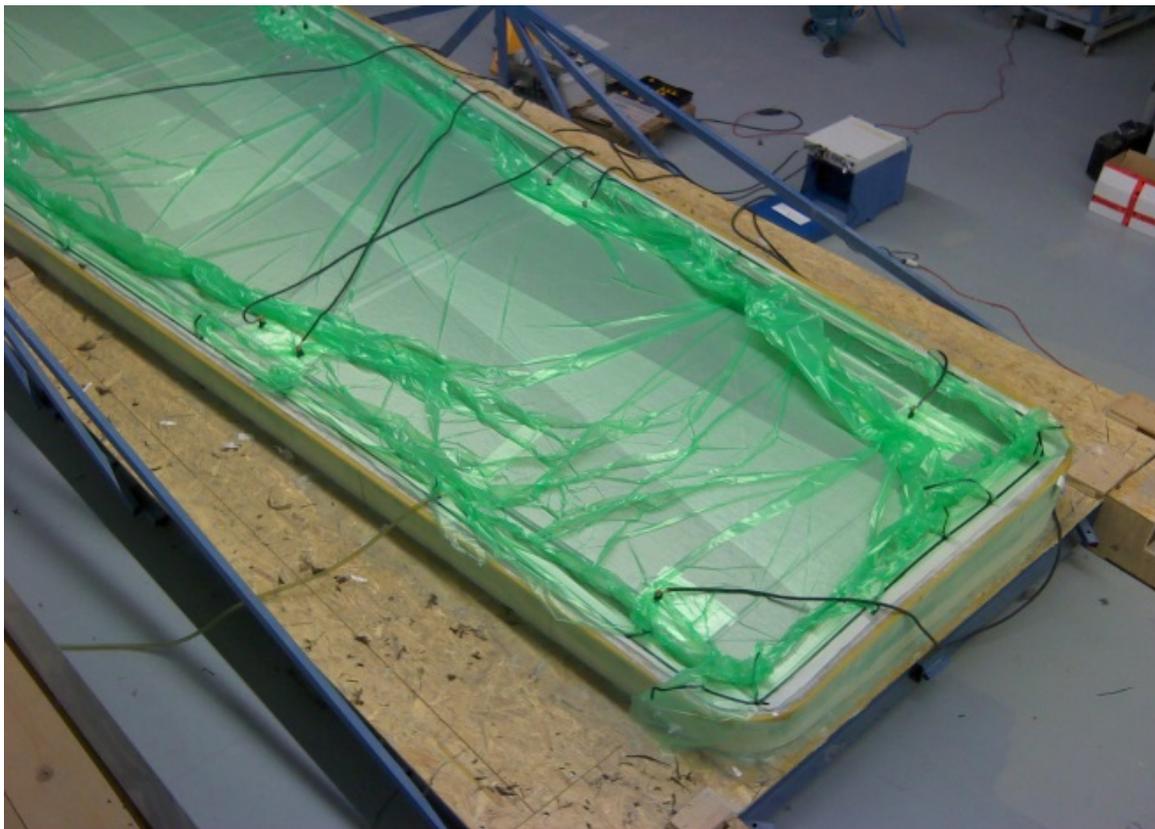


Abbildung 57: Test der Heizfelder unter Vakuum, das Bauteil ist zu diesem Zeitpunkt noch nicht infusiert v

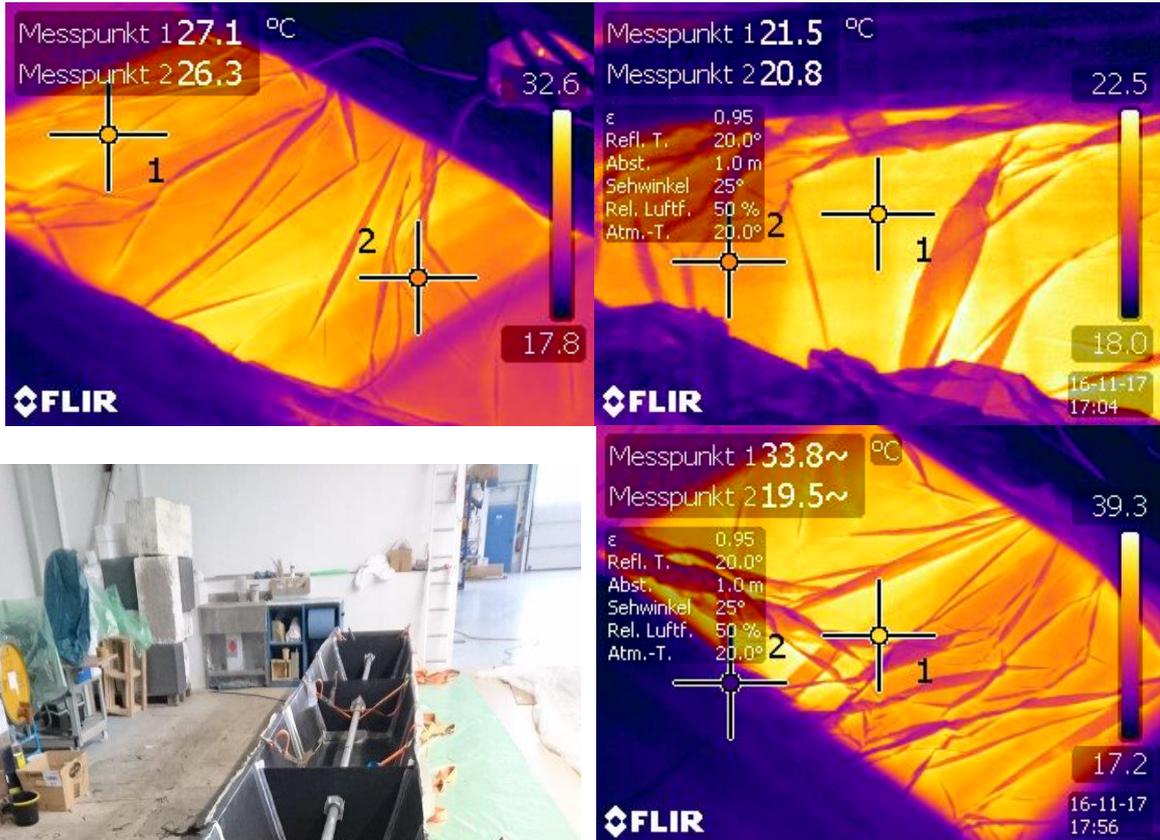


Abbildung 58 a, b, c: Infrarotbilder des Heizungstests [4]



Abbildung 59: Zentrale Hut-Profil Versteifung im Bau [4]



Abbildung 60: Abnahme des fertigen Werkzeuges vor der Auslieferung [4]



Abbildung 61: Heizungstest mit mobilen 8kVA Netzgeräten [4]



Abbildung 62: Infrarotbild des Heizungstestes, Die Leistung ließ keine höheren Temperaturen zu [4]

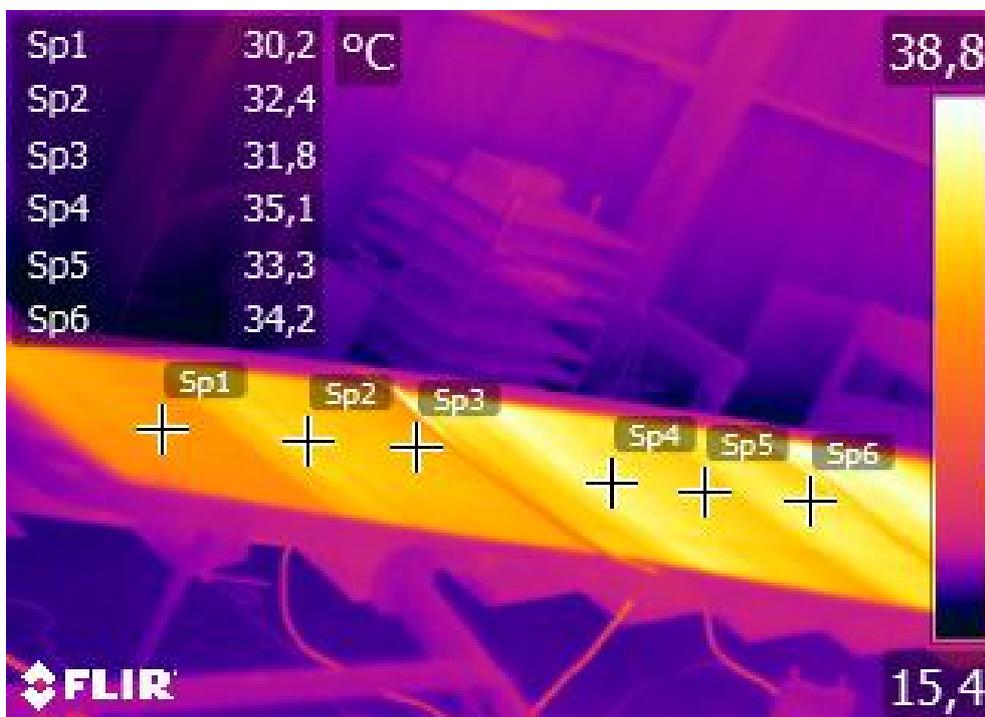


Abbildung 63: Auswertung über die Fläche, SP1 liegt Richtung Hallentor, trotzdem beträgt die Abweichung nur 4K auf 9m [4]

Für die elektrische Lastübergabe im Autoklav eine Sonderlösung erarbeitet werden.  
Hierfür wurden Klemmblöcke konstruiert. Sie bestehen aus Halteklammern, einer speziellen sehr festen isolierenden SiO<sub>x</sub>-Platte der Firma Promat (Handelsname Duratec) und Klemmstücken.  
Das Fräsen der Duratec- Platten erfolgte bei der Firma Promat. Sie verfügt über spezielle Fräsen, die auf die enorme Staubentwicklung beim Bearbeitungsprozess ausgelegt sind. Die Stahl und Kupferteile wurde lokal angefertigt. Das Kupfer wurde vernickelt.

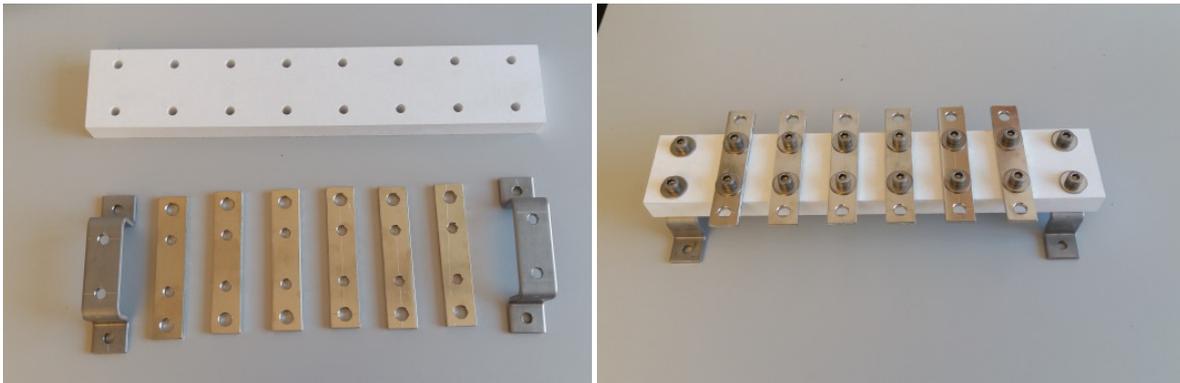


Abbildung 64 a & b: Klemmblock für den Autoklaven [4]

Die Klemmböcke wurden in der Zwischenzeit im Autoklaven installiert, ebenso das Spezialkabel mit hoher Wärmebeständigkeit.



Abbildung 65: Installierter Klemmbock mit Spezialkabel [4]

Die Installation und Inbetriebnahme der Hardware zur Beheizung und Regelung im Autoklaven erfolgte im Berichtszeitraum.

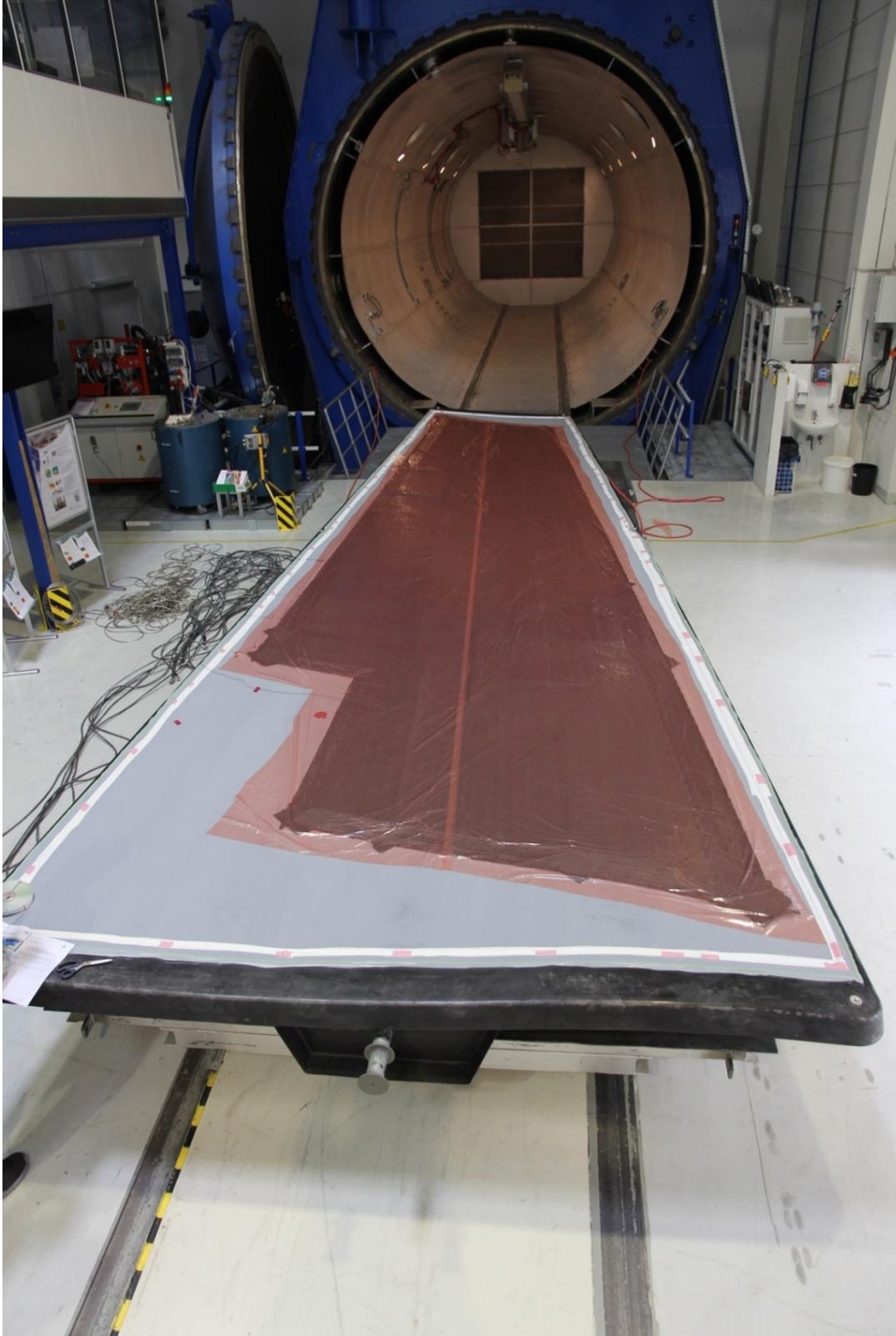


Abbildung 66: Belegtes Werkzeug vor dem Autoklav



Abbildung 67 a & b: Schaltschrank für die Heizungsregelung [3]



Abbildung 68: Schottdurchführungen für die elektrische Last [3]

Das Werkzeug wurde in der KW4 in Stade angeliefert und beim CTC entladen. Anschließend erfolgten eine Begutachtung und eine Reinigung nach dem Transport.

Die Begutachtung erbrachte, dass das Werkzeug noch nicht vollständig eben auf seinen Füßen lag. Die Originalkonstruktion sah vor, die Füße noch einmal einzurichten. Entsprechend den Vorstellungen der Projektpartner wurde aber beschlossen die Position nicht direkt über ein Verschieben der Füße zu korrigiert, sondern über vom CTC hergestellte Adapter.

Anschließend wurde das Werkzeug vermessen. Dieser Schritt erfolgte und erfolgt weiter in dem Testprogramm um Verzüge im Werkzeug zu überwachen und deren Entstehen einem Prozessschritt zuordnen zu können.

Die Temperung erfolgt drucklos mit Hilfe der Autoklavheizung. Die Eigenheizung war zu diesem Zeitpunkt noch nicht in Betrieb genommen worden.

Die Temperung verlief problemlos. Eine Überprüfung der Heizfelder, optisch sowie mittels der IR-Kamera, brachte keine Beschädigung während der Temperung zu Tage.

Fehlstellen, Delaminationen oder Kurzschlüsse, die sich als diskrete heiße Punkte bemerkbar machen wurden nicht erkannt.

Es konnte somit mit der Endausrüstung des Werkzeuges begonnen werden. Hierzu zählte der Einbau der Temperatursensoren sowie der Clixon Bimetallschalter als Sicherung gegen Überlastung.

Die Anschlusskabel mussten ebenso passend konfektioniert werden. Bei Heizwerkzeugen mit beidseitiger Lasteinleitung ist hier auf gleichmäßige Kabellängen zu achten, da die hohen Ströme bereits einen Einfluss auf das Heizfeld über den Kabelwiderstand der Anschlusskabel ausüben und dann zu ungleichmäßiger Lastverteilung im Heizfeld führen können.

Als Kabel wurde das speziell angefertigte hochtemperaturbeständige Kabel mit PTFE-Ummantelung, welches auch für die im Autoklav fest installierten Leitungen verwendet wird, eingesetzt.

Weiterhin wurden noch die Vakuumanschlüsse im Werkzeug installiert.

Über Sie wird die Luft unter der plasmabeschichteten Trennfolie evakuiert. bei dem Typ handelt es sich um den im Testwerkzeug bewährten Anschluss mit ISO Schnellkupplung.

Mit dem angeschlossenen Werkzeug und der installierten Hardware konnte nun in Zusammenarbeit mit der Fa. Elektro Eggers das von ihr entwickelte Steuerprogramm aufgespielt und getestet werden.

Um das Werkzeug richtig einsetzen zu können wurden zunächst erneut die Heizfelder getestet, diesmal allerdings mit der dafür vorgesehenen Hardware. Bei diesem Test wurden wichtige werkzeugeigene Parameter bestimmt. Etwa die Offsets der Temperatursensoren. Durch den Einbau der Sensoren von der Rückseite entsteht eine Differenz in der gemessenen zu der tatsächlich an der Oberfläche herrschenden Temperatur, die je nach schelle des Aufheizens und der Länge der Temperatureinwirkung variiert. Diese Parameter mussten für jeden eingesetzten Sensor für definierte Zeitschritte und Temperaturen bestimmt werden.

Für die thermische Referenzmessung der Oberfläche diente die im Autoklav installierte Infrarot-Optik.

Zusammen mit dem DLR und der Fa. Elektro Eggers erfolgte auch die Einbindung der Steuerung in die übergeordnete Autoklav Regelung. Die Feinheiten wurden und werden in weiteren Versuchen in AP50 optimiert.

Mit diesem Schritt waren das Werkzeug, die zugehörige Hard und Software einsatzfähig und das Werkzeug wurde einem ersten Testlauf unterzogen.

Bei dem Testlauf wurde eine homogene Verteilung der Heizleistung beobachtet. Die Heizraten und das Regelverhalten entsprachen den gewünschten Prozessparametern. Auch den Druck im Autoklav überstand das Werkzeug anstandslos.



Abbildung 69: Das fertige Tool mit Oberflächenbeschichtung im Autoklav [2]

### 2.2.6 Herstellung von Versuchsbauteilen

An der Herstellung der Versuchsbauteile war die fibretech composites GmbH hauptsächlich im Hinblick auf das Werkzeug und die Steuerung beratend tätig.

Natürlich wurden unserer Seitz das Verhalten und die Beständigkeit des Werkzeuges genau verfolgt.

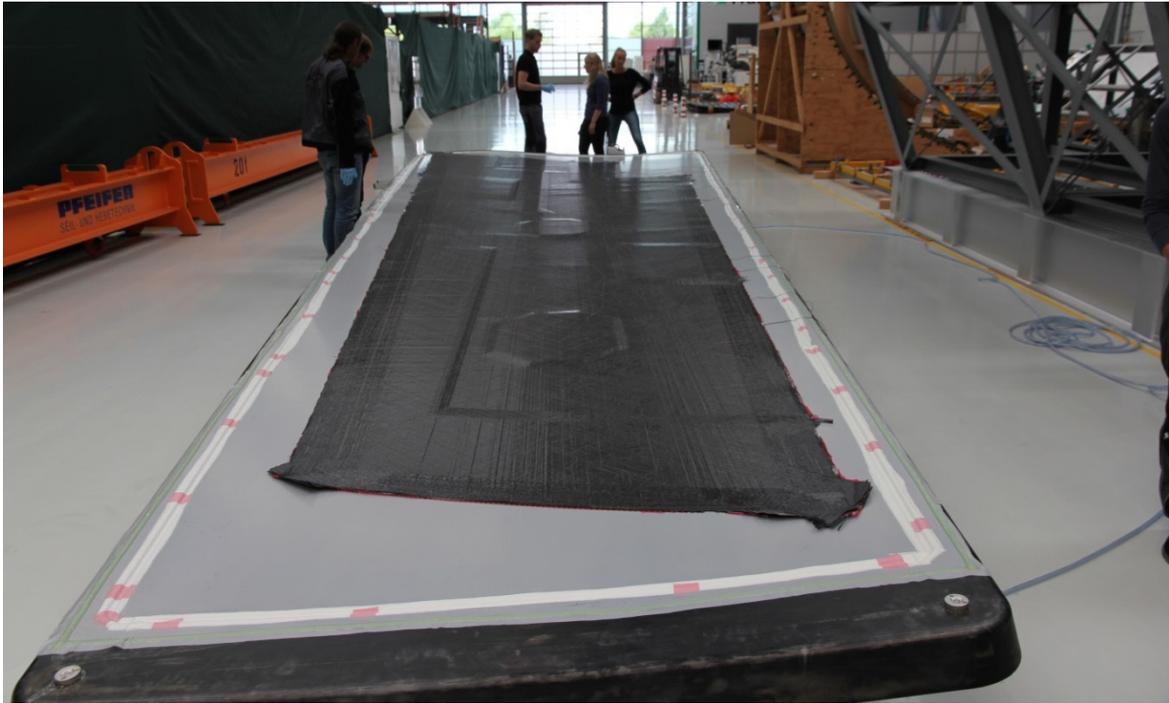


Abbildung 70: Werkzeug mit Bauteilbelegung [2]



Abbildung 71: Werkzeug und Bauteil nach Autoklavgang [2]

## 2.3 Projektergebnisse

### 2.3.1 Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeit

Die erfolgten Arbeiten haben wesentlich dazu beigetragen das fibretemp-System weiterzuentwickeln. Durch die Arbeiten wurde eine bisher einzigartige Möglichkeit geschaffen ein beheiztes Faser-Kunststoff-Verbund-Werkzeug in eine automatisierte Fertigungskette zu integrieren und die Vorteile dieses Werkzeuges zu nutzen. Im Vorhaben ist dies nicht nur erfolgreich umgesetzt worden, es wurden auch Erkenntnisse über die Grenzen der Werkstoffe in einer heißen Überdruck-Umgebung erlangt.

Im Hinblick auf die im Antrag zum Vorhaben beschriebenen und unter Kap. 1 wiederholten produktions- und qualitätstechnisch Notwendigkeiten in der Zukunft der Luftfahrt in Deutschland sind die erlangten Erkenntnisse von unschätzbare Bedeutung.

Im Projekt wurden hierfür wie unter 2.2 beschreiben von Begleittests über ein Test hin zu einem Demonstrator Werkzeug alle Bauschritte umgesetzt. Der Aufwand der dafür betrieben wurde scheint angesichts der erreichten Ziele mehr als angemessen.

### 2.3.2 Bewertung und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Aus den Beschriebenen Arbeiten innerhalb des Projektes sind konkrete Ergebnisse für die Produktion von fibretemp-Werkzeugen für hohe Aushärtetemperaturen gefunden worden. Sie betreffen das Werkzeug selber, als auch den Anschluss der Heizungen.

Für das Werkzeug ergaben sich:

- ein geeignetes Infusionsharzsystem zum Formenbau von Hochtemperaturformen
- eine einfach herzustellende aber sehr homogene und verschleißfeste Oberflächen mit Basaltvlies
- das eine Beschichtungen mit Hextool und deren Bearbeitung ist möglich ist und somit die Oberflächenkontur wahlweise später hergestellt oder überarbeitet werden kann.
- das Kernmaterialien, sowohl Schaum als auch Wabe immer noch Probleme haben Druck und hohen Temperaturen standzuhalten und dies beim Werkzeugbau Berücksichtigung finden muss

Betrachtet man den Anschluss der fibretemp-Heizung, so konnte:

- eine silikonfreie Kabellösung für Hochtemperaturanwendungen entwickelt werden
- ein System zum Anschluss elektrischer Lasten unter hohen Temperaturen und Drücken entworfen und umgesetzt werden

Aus dem Projekt sind Ergebnisse direkt in die Bauweise der fibretemp Heizwerkzeuge übernommen worden, bzw. erweitern das Produktportfolio in anderen Anwendungsbereichen abseits der Luftfahrt. Es gibt nun:

- Konzepte und Lösungen zum Bau von Heizwerkzeugen für die Luft- und Raumfahrtindustrie für erhöhte Temperatur- und Druckanwendungen
- Lösungen für Oberflächenmaterialien
- Konzepte und Lösungen für die Herstellung von geometrietreuen und verschleißfesten Werkzeugoberflächen
- Alternativen zu Trennmitteln zur Erhöhung der Standzeiten (Flexpas)
- Möglichkeiten zur Einbindung von Heizwerkzeugen in einen automatisierten Prozess
- Alternative Methoden der Prozessregelung

Betrachtet man zum jetzigen Zeitpunkt die wirtschaftlichen Aussichten lassen sich aus dem Projekt für den Vertrieb direkte Erweiterungen der Marktbereiche ableiten:

- Größere Bekanntheit im wichtigen Luft- und Raumfahrtmarkt
- Anbieten von alternativen Fertigungskonzepten zur Fertigung von FKV bei hohen Temperaturen
- Bessere Möglichkeiten am Markt für Mitteltemperaturformen mit größeren Temperaturtoleranzen
- Erweitern des Portfolios für andere Industriebereiche (Automotive)

### 2.3.3 Relevante Ergebnisse Dritter

Relevante Ergebnisse Dritter sind uns zum weder zum Projektzeitpunkt noch danach zur Kenntnis gelangt. Wenngleich im Rahmen des Projektes eine echte Belastung über die vollständige Lebensdauer eines so großen Werkzeuges wie des Demonstrator-Werkzeuges ausbleiben musste.

### 2.3.4 Veröffentlichungen und Vorträge

Vorträge erfolgten zu diesem Zeitpunkt nur innerhalb des Projektes.

- /A/ Auslegung der Heizfelder der fibretemp Heizung, Präsentation Heizung-2016-02-16.ppt im Rahmen des ‚Workshop CFK Tooling‘
- /B/ Präsentation zum Projektstand im Rahmen des Status Review, Präsentation EWIMA-2016-06-09, in Stade
- /C/ Präsentation zum Projektstand im Rahmen des Status Review, Präsentation EWIMA-2017-04-26, in Stade
- /D/ Vorstellungen auf der JEC 2018 im Rahmen des Gemeinschaftsstandes CFK Valley und Vorträge bei potentiellen Kunden durch fibretech composites, in Paris
- /E/ Vorstellung der Formenheizung mit erhöhten Einsatztemperaturen bei Volkswagen, in Wolfsburg
- /F/ Vorstellung der Formenheizung mit erhöhten Einsatztemperaturen bei Porsche, in Stuttgart
- /G/ Hakan Ucan, Jan-Timo Hesse, Michael Kantelberg  
Toasting CFRP parts - Cellular heatable tooling and infrared thermography assisted process time stabilisation of full scale CFRP-parts in curing processes  
Lightweight Design in Product Development 2018 - ETH Zürich Symposium  
14.- 15. Juni 2018  
Zürich, Schweiz

[2] *DLR-Stade 2017 – 2018*

[3] *DLR-Stade 2015 – 2016*

[4] *fibretech composites GmbH 2015 - 2016*

### 3 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Meanderförmiges CFK-Heizbahnen [2].....	6
Abbildung 2: Wärmebild der Heizung [2].....	6
Abbildung 3: Großwerkzeug in fibretemp®-Technologie für die Rotorblattfertigung bis 110°C maximal.....	7
Abbildung 4: Demonstrator-Werkzeug im Autoklaven des DLR [2].....	11
Abbildung 5: Kommunikationsskizze für das installationskonzept EWiMa - Aktiv beheiztes Werkzeug im Autoklaven [3] .....	12
Abbildung 6: Erste Konzeptskizze zur Installationssituation im und am Forschungsautoklav [4].....	13
Abbildung 7: Heizfeldauslegung für das Test-Werkzeug [4] .....	14
Abbildung 8: CAD-Modell des Test-Werkzeuges mit Hextool im Belegebereich und Auslauflächen für den Tape-Leger [4].....	15
Abbildung 9: gelochter Aluminium-Wabenkern für die Durchlüftung [4] .....	15
Abbildung 10: Ansicht der Rückseite des Test-Werkzeuges im CAD [4] .....	16
Abbildung 11: Fetigungszeichnungen für das Testwerkzeug [4].....	16
Abbildung 12: Referenzen für die Gestaltung der Flächen des Demonstrator-Werkzeuges [3].....	17
Abbildung 13: Netz und Flächenabwicklung der Schalenoberfläche [4].....	18
Abbildung 14: mindest zu beheizende Oberfläche in blau und abgeleitete Kontur der Heizung in rot [4] .....	18
Abbildung 15: Auslegung der Flächenheizung als Trapezheizfeld [4] .....	19
Abbildung 16: Kenndaten der drei Heizfelder [4] .....	19
Abbildung 17 a & b: Vorschläge für die Anordnung der Heizfelder, Variante a wurde umgesetzt [4] .....	19
Abbildung 18: finale optimierte minimale Belegebereiche für das Werkzeug [3] .....	20
Abbildung 19: erste Skizzen zur Ausführung des Werkzeuges [4] .....	20
Abbildung 20: Konzept des Demonstrator-Werkzeuges von unten gesehen [4].....	21
Abbildung 21: Konzept für die Drehaufnahme [4] .....	21
Abbildung 22: fertig konstruiertes Werkzeug mit Drehachse [4] .....	22
Abbildung 23: Werkzeug von der Unterseite gesehen mit Drehachse und zentraler Hutversteifung [4] .....	23
Abbildung 24: Vergleich der Werkzeugkonstruktion mit den notwendigen Belegebereichen (vgl. Bild 18) [4]...	23
Abbildung 25: Integration des Werkzeuges auf den Montagerahmen der Grofi-Anlage im CAD-System [4] .....	24
Abbildung 26: Anordnung der Fußplatten im Raster der Halteträger [4] .....	24
Abbildung 27: Details der Konstruktion des Urmodells [4].....	25
Abbildung 28: Forschungs-Autoklav im DLR Stade [2] .....	25
Abbildung 29: Einlass im Deckenbereich [2] .....	26
Abbildung 30: Speziell angefertigtes hochtemperaturkabel mit silikonfreier Teflonumantelung [4] .....	26
Abbildung 31: Konstruierter Klemmblock[4] .....	26
Abbildung 32: Temperaturbeständigkeitstest der Magnete, die Zertifizierung reichte nur bis 150°C [4].....	27
Abbildung 33 a&b: Tests von Hochstromsteckern für hohe Temperaturen und Drücke, Abbildung b zeigt Risse der Crimphüle nach dem Verpressen [4] .....	27
Abbildung 34: Testplatte nach 500 Zyklen (noch mit Glasgewebe als Oberflächenlage [4] .....	28
Abbildung 35: Testplatte mit zwei Heizfeldern und überlappender Kontaktierung, sowie einer Hextool Oberfläche [4].....	29
Abbildung 36: Temperatursensoren zur genauen Erfassung der Temperaturen im Überlappungsbereich [4]....	29
Abbildung 37: Infrarotbild des Überlappungsberiches im Vorversuch unter Vakuum, deutlich ist noch die heißere Überlappung zu erkennen die optimiert wurde [4].....	30
Abbildung 38 a & b: Coupontest zur Druckstabilität des Wabenkerns im Autoklaven [4] .....	30
Abbildung 39: Infusion einer Probeplatte für Zyklustests [4] .....	31
Abbildung 40: Infrarotbild der Platte, erkennbar sind Durchbrüche für Anschlüsse [4].....	31
Abbildung 41: Test der trockenen Heizung unter Vakuum [4].....	32
Abbildung 42: Infusion der Oberseite des Test-Werkzeuges [4].....	33
Abbildung 43: Heizungstest nach erfolgter Infusion [4].....	33
Abbildung 44: Einbringung des durchlüfteten Wabenkerns [4].....	34
Abbildung 45: Das Werkzeug ist fertig zur Abbringung der Hextool Oberfläche [4] .....	34
Abbildung 46: Aufbringen des Hextool Prepregs auf der vorgesehenen Belegefläche [4] .....	35
Abbildung 47: Vakuumaufbau über der Belegefläche vor der Einbringung in den Autoklaven [4] .....	35

Abbildung 48: Werkzeugoberfläche nach dem Autoklavzyklus und anschließender Temperung im Ofen [4]..... 36  
 Abbildung 49: Ruckseite des Werkzeuges, die Fußkonstruktion erwies sich noch nicht als ideal [4]..... 36  
 Abbildung 50: Oberfläche nach der frästechnischen Bearbeitung [4] ..... 37  
 Abbildung 51: vakuumtest der Anschlüsse im umlaufenden Kanal [4]..... 38  
 Abbildung 52: Vakuumtest und bestimmen der Temperaturdifferenz Oberfläche zu Messstelle [4]..... 38  
 Abbildung 53: Urmodell für das Demonstrator-Werkzeug [4]..... 39  
 Abbildung 54: Detailansicht des Vakuumkanals im negativ [4] ..... 39  
 Abbildung 55: Baslatvlie Oberfläche [4] ..... 40  
 Abbildung 56: Belgen der Heizfelder, hier Heizfeld 1 [4] ..... 41  
 Abbildung 57: Test der Heizfelder unter Vakuum, das Bauteil ist zu diesem Zeitpunkt noch nicht infusiert v .... 41  
 Abbildung 58 a, b, c: Infrarotbilder des Heizungstests [4] ..... 42  
 Abbildung 59: Zentrale Hut-Profil Versteifung im Bau [4] ..... 42  
 Abbildung 60: Abnahme des fertigen Werkzeuges vor der Auslieferung [4]..... 43  
 Abbildung 61: Heizungstest mit mobilen 8kVA Netzgeräten [4]..... 43  
 Abbildung 62: Infrarotbild des Heizungstestes, Die Leistung ließ keine höheren Temperaturen zu [4] ..... 44  
 Abbildung 63: Auswertung über die Fläche, SP1 liegt Richtung Hallentor, trotzdem beträgt die Abweichung nur 4K auf 9m [4] ..... 44  
 Abbildung 64 a & b: Klemmblock für den Autoklaven [4] ..... 45  
 Abbildung 65: Installierter Klemmblock mit Spezialkabel [4] ..... 45  
 Abbildung 66: Belegtes Werkzeug vor dem Autoklav ..... 46  
 Abbildung 67 a & b: Schaltschrank für die Heizungsregelung [3] ..... 47  
 Abbildung 68: Schottdurchführungen für die elektrische Last [3] ..... 47  
 Abbildung 69: Das fertige Tool mit Oberflächenbeschichtung im Autoklav [2] ..... 49  
 Abbildung 70: Werkzeug mit Bauteilbelegung [2] ..... 50  
 Abbildung 71: Werkzeug und Bauteil nach Autoklavgang [2] ..... 50

## 4 Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
AKL	Autoklav(en)
AP	Arbeitspaket
CFK	Kohlenstofffaser verstärkter Kunststoff
FuE	Forschung und Entwicklung
FVK	Faserverbundkunststoff
GroFi	Großbauteile in Fibre Placement Technologie
u. a.	unter anderen
UD	Unidirektional
UP	Unterarbeitspaket
z. B.	zum Beispiel

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht		
3. Titel <div style="text-align: center;"><b>EWiMa</b> <b>Efficient Wing Cover Manufacturing</b> <b>Abschlussbericht</b></div>			
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]  Kantelberg, Michael Brandes, Jens		5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2017	6. Veröffentlichungsdatum 29.06.2018
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)  fibretech compsores GmbH Am Lesumdeich 2 28719 Bremen		7. Form der Publikation digital	
9. Ber. Nr. Durchführende Institution -		10. Förderkennzeichen 20W1309C	
11. Seitenzahl 54 +2		12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	
13. Literaturangaben 7		14. Tabellen -	
15. Abbildungen 71		16. Zusätzliche Angaben -	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) -			
18. Kurzfassung  Für wettbewerbsfähige und effiziente Luftfahrzeuge ist eine Reduktion der Produktionskosten notwendig. Dies kann durch neue hochindustrialisierte Ablegetechnologien, verbesserte Formwerkzeuge und Produktionsstrategien sowie durch höhere Integrationsgrade der Verbundstrukturen realisiert werden. Durch einen erhöhten Integrationsgrad der Einzelteile können gleichzeitig die Montagekosten und Durchlaufzeiten reduziert werden. Die in diesem Vorhaben entwickelten Technologien und Methoden sollen dazu beitragen, die nationale Luftfahrtindustrie im weltweiten Wettbewerb nachhaltig zu stärken. Im Projekt wurden hierfür von Begleittests über ein Test- hin zu einem Demonstrator-Werkzeug alle Bauschritte umgesetzt. Die erfolgten Arbeiten haben wesentlich dazu beigetragen das fibretemp®-System weiterzuentwickeln. Durch die Arbeiten wurde eine bisher einzigartige Möglichkeit geschaffen ein beheiztes Faser-Kunststoff-Verbund-Werkzeug in eine automatisierte Fertigungskette zu integrieren und die Vorteile dieses Werkzeuges zu nutzen. Dabei wurde die Durchlaufzeit im Autoklaven um 33% reduziert. Mit dem Vorhaben werden neue Möglichkeiten für energieeffiziente und zeitsparende Produktionsmittel geschaffen.			
19. Schlagwörter fibretemp® - die integrierte Temperierung, Heizwerkzeug, Lightweight, CFRP, Efficient Wing Manufacturing, Cellular Heatable Tooling, Infrared Thermography			
20. Verlag -			21. Preis -

## Document Control Sheet

1. ISBN oder ISSN planned	2. type of document (e.g. report, publication) final report		
<b>3. title</b>  <div style="font-size: 1.2em; font-weight: bold; margin: 10px 0;">EWiMa</div> <div style="font-size: 1.1em; font-weight: bold; margin: 0 0 10px 0;">Efficient Wing Cover Manufacturing</div>			
4. author(s) (family name, first name(s))	5. end of project 31.12.2017		
Kantelberg, Michael Brandes, Jens	6. publication date 29.06.2018		
	7. form of publication digital		
8. performing organization(s) (name, address)	9. originator's report no. -		
fibretech compsotes GmbH Am Lesumdeich 2 28719 Bremen	10. reference no. 20W1309C		
	11. no. of pages 54 +2		
12. Sponsoring agency (name, address)	13. no. of references 7		
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	14. no. of tables -		
	15. no. of figures 71		
16. supplementary notes -			
17. presented at (title, place, date) -			
<b>18. abstract</b>  <p>The competitiveness of fuel efficient fibre composite aero planes directly relates to the production costs. Highly automated fibre placement technology, improved mould tools and production strategies in combination with an increased degree of structural integration (reduction of assembly effort) may achieve a significant reduction in production costs and shorter lead times. The processes and technologies that were developed in the context of this project aim to strengthen the national aeronautic industry effectively.</p> <p>The activities of this project significantly added to advancing the fibretemp® technology. The integration of a carbon fibre heated mould tool into an automated production chain showed great benefits for the entire manufacturing process and resembles a new stage of fibretemp® technology development. Within this project, several stages of advancement were tested, new knowledge about the effects of operating heated tooling within an autoclave was gained and concluded in a demonstration tool. The funded project opened up new possibilities for energy efficient and time saving tooling technology to be used in the aerospace industry.</p>			
<b>19. keywords</b> fibretemp® - the integrated temperature control, <b>heates tool</b> , Lightweight, CFRP, Efficient Wing Manufacturing, Cellular Heatable Tooling, Infrared Thermography			
20. publisher -			21. price -