

„CaroLin“

Carbonfaservliesstoffe optimiert für Lufffahrt Interieurbauteile

ABSCHLUSSBERICHT

Zuwendungsempfänger: fibretech composites GmbH
Förderkennzeichen: 20Q1704A
Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2018 bis 31.12.2020
Erstellungsdatum: 27.06.2021

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	7
1.4.1	Stand der Technik	7
1.4.2	Bisherige Arbeiten des Antragsstellers	10
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	11
2	Technischer Bericht	12
2.1	Erzielte Ergebnisse	12
2.1.1	Verwendung der Zuwendungen	12
2.1.2	Zeitliche Einordnung der Tätigkeiten	12
2.1.3	Gegenüberstellung der Ziele und Ergebnisse	13
2.2	Tätigkeiten im Rückblick	14
AP 1.1:	Festlegung Materialien, Demobauteil	14
2.3	Projektergebnisse	64
2.3.1	Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeit	64
2.3.2	Bewertung und Verwertbarkeit der Ergebnisse	65
2.3.3	Relevante Ergebnisse Dritter	65
2.3.4	Veröffentlichungen und Vorträge	65
3	Abkürzungsverzeichnis	66
	Berichtsblatt	67
	Document Control Sheet	68

1 Zusammenfassung

1.1 Aufgabenstellung und Projektziele

Die Definition der Projektziele ist im Antrag festgeschrieben worden, in Übereinstimmung mit dem Ziel des LuFo V-3 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 umweltfreundlichen, sicheren, nachhaltigen, leistungsfähigen und effizienten Lufttransportsystems der Zukunft leisten.

Das Project CaroLin setzt dazu auf der Seite der Verfahrensentwicklung von hochorientierten Vliesstoffen aus rezyklierten C-Fasern zum Bau von zukunftsweisenden Flugzeuginterieurbauteilen an.

Im Vorhaben werden Produktionsreste des wertvollen Werkstoffs Kohlenstofffaser zu einem homogenen hochorientierten Carbonvlies (HO-rCF-Vlies) aufbereitet, um dieses dann für die Herstellung von Flugzeug- Interieur Bauteilen zu verwenden. Die Substitution der aktuell gebräuchlichen Glasfaserverstärkung durch Carbonfasern reduziert das Gewicht der Bauteile in mehrfacher Hinsicht. Im Ergebnis können dünnere Decklagen mit geringerem spezifischem Materialgewicht realisiert werden. Die Reduzierung der Flugzeugmasse führt zu Einsparungen an Treibstoff und Emissionen.

Da die Kohlenstofffasern, aus denen die Carbonvliese bestehen, elektrisch leitfähig sind, liegt es nahe die Interieur- Oberflächen als Widerstandsheizelemente zu nutzen. Die Widerstandsheizung im Bauteilverbund ist mechanisch voll belastbar. So ergibt sich eine zusätzliche Gewichtsreduktion des Flugzeuges mit den bekannten Vorteilen, die das Hauptziel einer umweltfreundlichen Luftfahrt adressieren.

Die in diesem Vorhaben entwickelten Verfahren 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.

Wesentliche wissenschaftliche und technische Arbeitsziele der fibretech composites GmbH:

1.

Schwerpunkt bzw. technologisches Ziel der Arbeiten ist die Entwicklung von elektrischen Widerstandsheizungen auf Basis der Carbonvliese und Integration der elektrischen Heizelemente in die Interieur Bauteile.

Hierfür sind elektrotechnische Untersuchungen an Mustern, Coupons und Bauteilen Grundvoraussetzung.

2.

Entwicklung einer einfachen sicheren Stromeinleitung in das Faserhalbzeug.

Hierbei ist zu beachten, dass die aktuellen Decklagen der Interieur Bauteile oft unter 1 mm stark sind. Die Kontaktierung muss entsprechend dünn sein und die elektrische Energie zuverlässig mit definiert geringem Übergangswiderstand in das Faserhalbzeug einleiten.

3.

Entwicklung eines Excel- basierenden Programmes, dass es ermöglicht für unterschiedliche Vlies-Grammaturen Heizfeldauslegungen für einfache Geometrien durchzuführen.

1.2 Vorhaben und Verbund

Ziel des Gesamtvorhabens ist die Entwicklung eines Verfahrens, um aus rezyklierten Carbonfasern, wie sie bei der Herstellung von Flugzeugbauteilen anfallen, hochorientierte Vliesstoffe herstellen zu können, die wiederum für die Herstellung von Flugzeuginterieurbauteilen genutzt werden. Die Verfahrensentwicklung erfolgt im Rahmen des Projektes in einem zweistufigen Prozess, beginnend im Labormaßstab und einer anschließenden Übertragung auf eine Technikumsanlage. Motivation für das Vorhaben ist zum einen die zukünftig vermehrt anfallende Menge an Verschnittresten von Verstärkungstextilien aus Carbonfasern, die eine wertvolle Ressource für neue Bauteile darstellen können. Weiterhin können die rCF-Vliesstoffe perspektivisch die heute gebräuchlichen Glasfasergewebe von Interieurbauteilen substituieren und die Herstellung von leichteren Bauteilen ermöglichen, die wiederum zur Kraftstoffeinsparung beim Betrieb des Flugzeugs führen. Die Vliesstoffe sind darüber hinaus geeignet, die entstehenden Interieurbauteile so zu funktionalisieren, dass sie durch eine elektrische Kontaktierung als Strahlungsheizung benutzt werden können: Durch die Funktionsintegration können die Komponentenanzahl, der Montageaufwand, Bauraum und schließlich auch das Gewicht reduziert werden. Ergebnis des Projektes ist daher auch, anhand der Neukonstruktion und Fertigung eines komplexen Interieurbauteils den Nachweis dieser Einsatzfähigkeit zu erbringen. Darüber hinaus wird ein entsprechendes Heizmodul entwickelt und als Demonstrator hergestellt, um die Realisierbarkeit der Funktionsintegration nachzuweisen und die vielfältigen Integrationsmöglichkeiten eines solchen Systems aufzuzeigen.

1.3 Arbeitsplan und Projektaktivitäten

Das Projekt wurde in insgesamt sieben Hauptarbeitspakete und das begleitende Projektmanagement und den Projektabschluss aufgeschlüsselt. Die fibretech composites ist in den folgenden Arbeitspaketen engagiert:

AP 1.1 Festlegung der Materialien & Demobauteil

1.1.1 Sichtung der für Flugzeug- Interieur Bauteile geltenden Regelungen und Zulassungsvorschriften
in Bezug auf elektrische Komponenten

1.1.2 Aufbereitung der Daten und Vorstellung der Ergebnisse

1.1.3 Recherche Kontaktierungsmaterial und Vorrichtungen

1.1.4 Diskussion und Auswahl

AP 1.2 Qualitätssicherung und Dokumentation

1.2.1 Vorbereitung und Abstimmung der qualitätssichernden Maßnahmen und des
Projektmanagements

AP 6.3 Herstellung Prüfung und Optimierung von Coupons

6.3.1 Herstellen von Heizelementen diverser Ausprägungen

6.3.2 Untersuchung des elektrischen Verhaltens der trockenen Vliese unter Vakuumdruck und im Matrixverbund. Tests zur Optimierung des thermischen Verhaltens.

6.3.3 Analyse der Ergebnisse, Entwicklung eines Berechnungstools und Ergebnisdarstellung

AP 6.4 Entwicklung der Bauteilheizung

6.4.1 Entwicklung der Heizelemente für die Interieurbauteile

6.4.2 Entwicklung der Stromeinleitung in das C-Faser Vlies

6.4.3 Entwicklung der Kontaktierung

AP 6.5 Herstellung eines Integrierten Heizmoduls

6.5.1 Herstellung der Heizmodule

6.5.2 Testen der Module auf Funktion und Homogenität der Heizung

6.5.3 Begleitung bei der Verarbeitung bei 3D-Icom

AP 6.8 Bauteil und Prozessverbesserung

6.8.1 Optimierungen bei der Heizungsmodul Herstellung analysieren und umsetzen

6.8.2 Optimierungen bei der Bauteilherstellung bewerten und umsetzen

AP 7.3 Wirtschaftlichkeitsbewertung

7.3 Überprüfung ob die Interieurbauteile mit Funktionalitätszuwachs durch die integrierte Heizung zu Marktpreisen hergestellt werden können

Innerhalb der Arbeitspakete wird die fibretech composites GmbH mit den Erfahrungen aus anderen Industriezweigen Konzepte und Demonstratoren aus beheizten C-Faser Vliesen entwickeln um die Einsatzfähigkeit in Interieurbereich zu prüfen. Im Wesentlichen gliedert sich die Arbeit in drei Schwerpunkte:

- Im ersten Abschnitt wird die Verwendbarkeit von C-Faser Vliesen als integrierte Heizelemente an Coupons getestet und validiert.

- Im zweiten Teil wird ein Bauteilgkonzept mit Heizfunktionen entwickelt. Die Weiterentwicklung und Implementierung der neuen, funktionalen Erweiterungen ist hier maßgebendes Ziel. Insbesondere aus der Kombination von belastungsgerechten Oberflächen und integrierten Heizfunktionen ist eine Konzeptvalidierung erforderlich. Es wird dazu ein Prototyp umgesetzt und mechanisch und elektrisch getestet. 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 gefertigt. Dieser Funktionsträger wird allen Projektpartnern für weitergehende Versuche und als Ausstellungsstück für Messen, Kongresse etc. zur Verfügung stehen.

Der Hauptanteil der fibrettech composites GmbH fällt in die Arbeitspakete AP1, AP6, und AP7. In den weiteren AP's ist die fibrettech composites GmbH primär beratend und unterstützend tätig.

1.4 Grundlagen und Möglichkeiten zu Projektbeginn

1.4.1 Stand der Technik

Elektrische Widerstandsheizungen auf Basis von Kohlenstofffasern gibt es seit ca. 1980. In den 90er Jahren haben sich in Deutschland und Europa diverse Institute mit der Möglichkeit beschäftigt Kohlefaserheizungen zu entwickeln. In vielen Fällen scheiterten die Bemühungen an den Punkten:

- Einleitung der elektrischen Energie in die Fasern
- Erreichen einer homogenen Heizleistung (Gleichmäßigkeit der Wärmeabgabe).
- Dimensionsstabilität der Heizfelder (Verzug durch notwendige elektrische Isolation mit abweichenden Wärmeausdehnungskoeffizienten zur Kohlefaser).
- Langzeitstabilität und Sicherheit der Heizung über viele Heizzyklen.

Elektrische Heizungen basieren oft auf einem Heizdraht oder Kohlefaserroving der meanderförmig auf einem Trägergewebe oder einem GFK-Laminat aufgebracht wird.

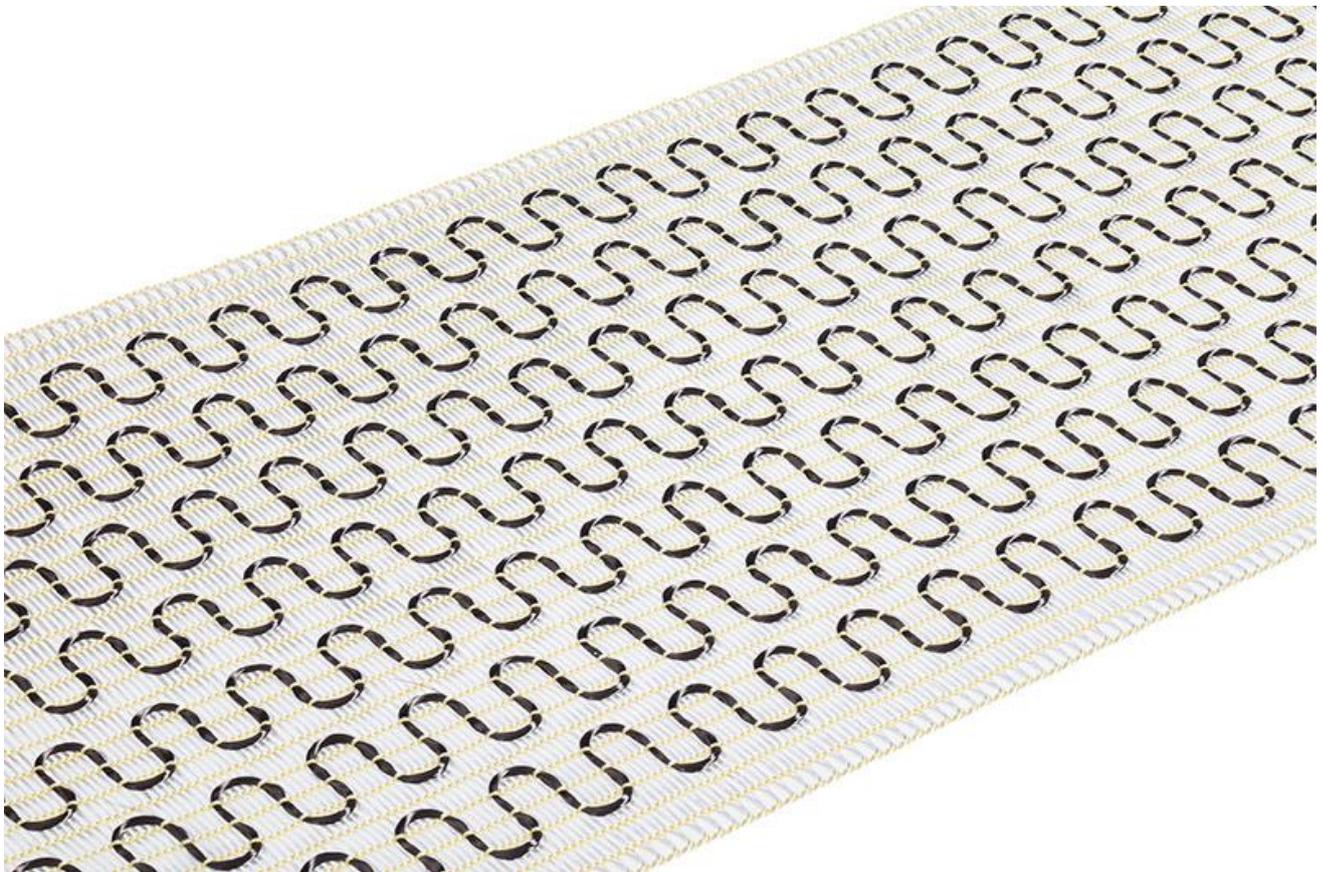


Abb. 1: Heiztextil

Die verwendeten Kohlefaserrovings bestehen aus einer Vielzahl von einzelnen Filamenten und variieren herstellungsbedingt in der Anzahl der Filamente. Faserbrüche bei der Ablage und Fixierung der Rovings auf dem Trägergewebe führen zusätzlich zu ungleichmäßigen Widerständen über die Rovinglänge und entsprechend zu ungleichmäßiger Wärmeentwicklung. Ein weiterer Nachteil ergibt sich durch die Reihenschaltung der Rovings. Stromführende Rovings mit unterschiedlichem Spannungspotential liegen sehr nah beieinander um eine gewisse Homogenität der Flächenheizung zu

erreichen. Bei der Verarbeitung der Halbzeuge lösen sich einzelne Filamente aus dem Rovingstrang und bilden einen Kurzschluss mit benachbarten Kohlefasern.

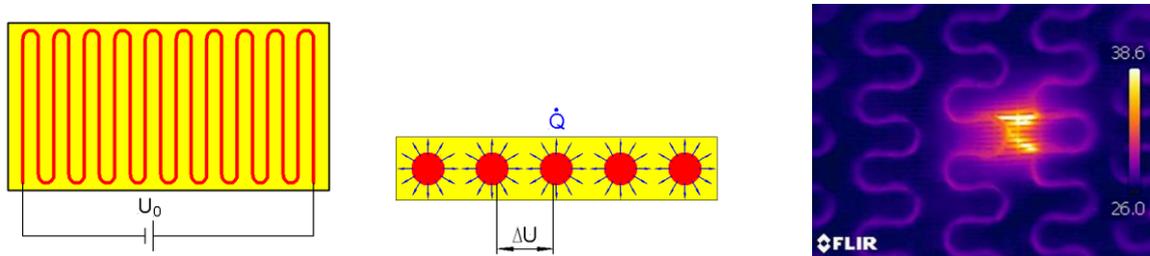


Abb. 2-4: Meanderförmiger Verlauf eines Kohlefaserroving mit unterschiedlichem Spannungspotential und Ausbildung eines Kurzschlusses.

Das fibretemp System nutzt Kohlefasergewebe um Flächenheizungen zu generieren. Die Einleitung der elektrischen Energie erfolgt als Parallelschaltung aller in Stromflussrichtung verlaufenden Fasern. Die um 90° verdrehten Fasern der Gewebe sorgen für einen Potentialausgleich. Auf diese Weise werden unterschiedliche Spannungspotentiale verhindert und Kurzschlüsse vermieden.

Aufgrund der vielen einzelnen parallelen Rovings ist die Wärmeentwicklung sehr gleichmäßig. Makroskopisch entsteht eine Flächenheizung. Durch Variation der bestromten C-Gewebelegungen können individuelle Heizleistungen realisiert werden, es entstehen maßgeschneiderte Heiz-elemente.

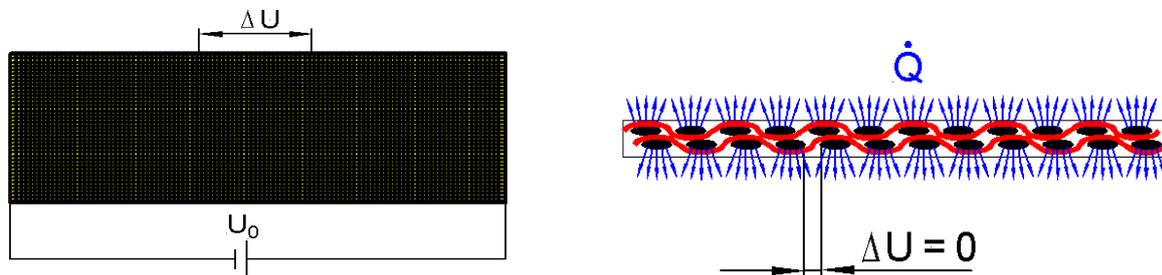


Abb. 5-6: Potentialausgleich bei Kohlefasergewebeheizungen

Das spezielle fibretemp-Kontaktierungsband bringt die elektrische Leistung verlustfrei und mit geringem baulichen Aufwand in die Kohlefasergewebe.

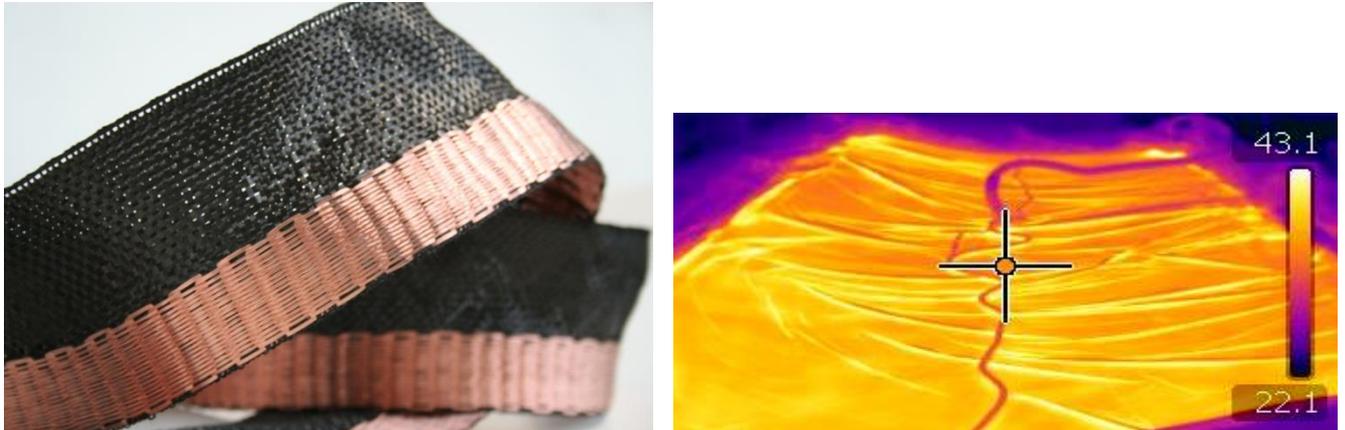


Abb. 7-8: Kontaktierungsband und gleichmäßige Wärmeverteilung einer Gewebeheizung.

Grundsätzlich eignen sich auch Kolefaservliesstoffe zur Herstellung einer elektrischen Widerstandsheizung. Häufig finden sie Anwendung als Sitzheizungen in Fahrzeugen oder als Wandheizung in Gebäuden und um Rampen oder Gehwege eisfrei zu halten. Aufgrund der inhomogenen Faserverteilung der aktuell verfügbaren Carbon Vliese ist auch die Wärmeentwicklung der Vliesheizungen inhomogen. Für viele Anwendungsfälle sind Temperaturunterschiede von 15°K innerhalb eines Heizfeldes akzeptabel, in anderen Anwendungsfällen ist die Wärmekapazität auf die die Heizung wirkt so groß (Zimmerwand, Gehwegplatten) dass das zu erwärmende Bauteil für eine Homogenisierung der Wärmeverteilung sorgt. Alternativ wird die Vliesheizung in einiger Entfernung von der zu beheizenden Oberfläche platziert, so dass im Zuge der Wärmeleitung durch das Bauteil die Temperatur vereinheitlicht wird. Beide Maßnahmen haben einen negativen Einfluss auf die Energieeffizienz und die Masse der Heizung.

Durch die Entwicklung eines Herstellverfahrens das die Kohlenstofffasern zu homogenen und hochorientierten Vliesstoffen aufbereitet, wird die Gleichmäßigkeit der Wärmeentwicklung stark verbessert. Ein oberflächennaher Einsatz in Interieur Bauteile der die Vorteile der Strahlungswärme ausnutzt wird gefahrlos möglich.

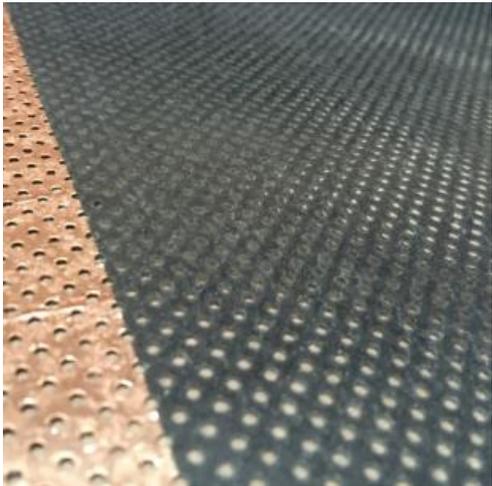


Abb. 9: Kohlefaservliesheizung

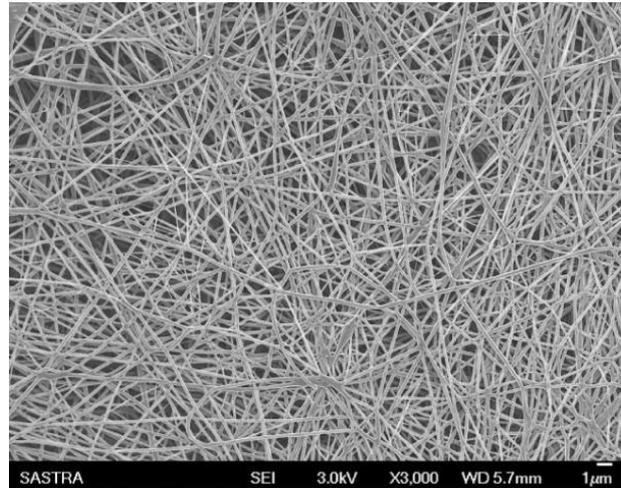


Abb. 10: Inhomogene unorientierte Verteilung der Kohlenstofffilamente im Vliesstoff.

Patentsituation

(1) Schutzrecht DE102006058198B42013.04.18. Fibretemp GmbH & Co KG. 18.04.2013.

Schutzrecht bezieht sich auf Kohlefasergewebe und den Einsatz der Heizung in Formenwerkzeugen.

(2) www.gpoint-composite.de, Internetzugriff, 31.05.2020

Schutzrecht bezieht sich auf Kohlefaserrovings die auf ein Trägergewebe aufgenäht werden.

Das fibretemp©-Verfahren ist durch ein eigenes Schutzrecht abgesichert.

Nach Recherche und aktuellem Kenntnisstand stehen der Durchführung des Vorhabens keine fremden Schutzrechte entgegen. Dies gilt entsprechend auch für eine potentielle Verwertung der späteren Ergebnisse.

1.4.2 Bisherige Arbeiten des Antragsstellers

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 Preforming- und autoklavfreie Infusionsprozesse insbesondere in der Windenergiebranche und der Luftfahrtbranche umgesetzt.

Luftfahrtforschungsprogramm LuFo V- 1 Projekt EWiMa

Im Zuge des Projektes hat fibretech ein CFK-beheiztes Formenwerkzeug entwickelt, das im Autoklaven betrieben wird um einen homogenen Wärmeeintrag in die auszuhärtenden FVK Strukturen zu realisieren. Ein weiterer Vorteil ist der Einsatz der Formenheizung im Zuge der automatischen Belegung des Tools. Durch die Temperierung wird die Viskosität der Prepregs und damit auch der Tack der vorgetränkten Gewebe beeinflusst.

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.

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:

- 6.3 Herstellung Prüfung und Optimierung von Coupons - 30%
- 6.4 Entwicklung der Bauteilheizung, Software Entwicklung - 35%
- 6.5 Herstellung eines Integrierten Heizmoduls - 15%
- 6.8 Bauteil und Prozessverbesserung - 15%
- Projektmanagement und –Abschluss - 5%

2.1.2 Zeitliche Einordnung der Tätigkeiten

Das LuFo-V3 Verbundvorhaben Carolin erstreckte sich insgesamt über den Zeitraum von 3 Jahren mit dem Ende des Projektes am 31.12.2020. In diesem Zeitraum wurden alle im Antrag festgeschriebenen Arbeiten und Tätigkeiten ausgeführt die in Kapitel 2.2 ausführlich beschrieben und deren Ergebnisse in Kapitel 2.3 Bewertet werden.

Die Tätigkeiten im Bereich der Prüfung und Optimierung von C-Faservliesen als Widerstandsheizelement und der Entwicklung eines beheizten Interieurbauteils wurden nahezu über den gesamten Projektzeitraum mit Beginn des Kickoff Meetings geführt. Erkenntnisse aus Vortests und den gebauten Heizfeldern flossen hier immer wieder mit ein.

Für die fibretech composites GmbH standen im Projektverlauf noch die Entwicklung eines Software Tools zur Auslegung von C-Faser Vlies Heizungen und die Untersuchung des Heizverhaltens mittels FE-Simulationen in der Agenda. Beide Ergebnisse sind wichtige Teile des Projektes, um Erkenntnisse über das Verhalten der C-Faser Vliese zu erlangen.

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

- Januar 2018 - Treffen beim Projektpartner fibre um das Projekt zu starten, Festlegung der Demonstrator Ausprägung
- Juni 2018 - Treffen beim Projektpartner Suchy Maschinenbau in Korbußen, Vorstellung der ersten Ergebnisse zu Kontaktierungen und elektrischen Kennwerten der ersten getesteten C-Faser Vliese
- Oktober 2018 - Treffen beim Partner 3D Icom in Hamburg, Bericht über die Versuche mit einem ersten Flammenschutzharz als Matrix und weitere Ergebnisse zum elektrischen Verhalten diverser C-Faser Vliese
- Mai 2019 - Treffen bei fibretech composites und Vorstellung des ersten beheizten Demonstrators aus C-Faser Vliesen
- April 2020 - Partnertreffen als Video Konferenz, Info über ein weiteres Flammhemmendes Harzsystem, Arbeiten am Berechnungs- Tool für die Vlies Heizungen und Tests an der brandhemmenden Gummi Beschichtung für das Bodenpanel
- Oktober 2020 - Partnertreffen als Video Konferenz, Info zur Herstellung von Heizungskits aus C-Faser Vliesen, Stand der Arbeiten zur FE- Simulation der C-Faser Heizung
- März 2021 - Partnertreffen als Video Konferenz, Info zu den Tests am zweiten flammhemmend eingestellten Matrixsystem, Info zu den Arbeiten Anschlusstechnik und Kit Herstellung, final review mit den Partnern

2.1.3 Gegenüberstellung der Ziele und Ergebnisse

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

Schwerpunkt bzw. technologisches Ziel der Arbeiten der fibretech composites GmbH (FTC) war die Entwicklung von elektrischen Widerstandsheizungen auf Basis der Carbonvliese und Integration der elektrischen Heizelemente in die Interieur Bauteile.

Es wurden:

- a. Ein energieeffizientes funktionsintegriertes Interieur-Bauteil in Wabensandwich Bauweise gefertigt das eine hohe Steifigkeit bei geringer eigener Masse aufweist. Integriert wurden ein C-Faservlies-Heizsystem, sowie eine flammhemmende verschleißfeste Oberflächenbeschichtung.
- b. Elektrische- und Wärmekennwerte für diverse recycelte C-Faser Vliese ermittelt und auf Basis dieser Daten ein Berechnungstool entwickelt, das die Auslegung von Widerstandsheizfeldern aus Vliesen ermöglicht.
- c. die Möglichkeiten der elektrischen Stromeinleitung in die C-Faser Vliese untersucht und demonstriert und dabei verfahrenstechnisch sinnvolle und sichere Möglichkeiten gefunden.
- d. Ein Matrixsystem mit flammhemmenden Eigenschaften für den Interieur Bereich identifiziert, die Verarbeitung erprobt und das geforderte Brandverhalten abgetestet und bestätigt.

Das fibretech composites GmbH eigene Ziel der Erweiterung der fibreemp®-Basistechnologie hin zur möglichen Verwendung von recyklierten C-Faser Vliesen muss nach dem Projekt ebenfalls als positiv angesehen werden. Die Möglichkeiten zu den ausführlichen Tests und den Zugang zu Material und Fertigungsmöglichkeiten 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 am Markt. Die direkten Erkenntnisse um das Materialverhalten selbst aber auch die Peripherie wie Kontaktierung und elektrische Anschlüsse, die getestet werden konnten, sind für die wahrscheinlich größte Gewinn.

2.2 Tätigkeiten im Rückblick

Die Haupttätigkeiten im Projekt lagen für fibretech composites in den Arbeitspaketen AP1 und AP6. Die Arbeiten werden im Folgenden in den Unterkapiteln nach Tätigkeitsfeldern geordnet dargestellt.

AP 1.1: Festlegung Materialien, Demobauteil

AP 1.1 dient der Spezifikation der verwendeten Rohstoffe in Form von rCF, der angestrebten Vliesstoffqualitäten inkl. Flächengewicht, MD/CD-Verhältnis und Faserlänge, dem Harzsystem inklusive der für die gewählten Fertigungsprozesse erforderlichen Aufmachungen sowie den für die iterative Bauteilauslegung im ersten Schritt zu erwartenden Eigenschaften des Halbzeugs. Das beinhaltet sowohl strukturmechanische, elektrische und auch zulassungsrelevante Eigenschaften. Ggf. müssen hierfür Versuche für die Ermittlung dieser Eigenschaften im Rahmen des Projektes verabredet und eingeplant werden. Weiterhin werden die erforderlichen Couponversuche geplant und die Demonstratorbauteile sowie ihre Eigenschaften spezifiziert.

Im Arbeitspaket 1.1 wurde im Zuge des ersten Projekttreffens am 31.01.2018 beim Faserinstitut in Bremen gemeinschaftlich festgelegt, dass das erste Interieur- Bauteil zur Erprobung ein Fußboden Panel sein soll. Diese Wabensandwich Panels kommen in großer Stückzahl und einem hohen Flächenanteil im Interieur aller Verkehrsflugzeuge zum Einsatz.

Die Panels werden mechanisch hoch belastet durch beispielsweise Laufrollen von Catering- Wagen und Fluggästen mit „Pfennig Absätzen“. Wenn es gelingt ein solches hoch belastetes Panel aus recyklierten C-Faservliesen mit integrierter Widerstandsheizung auf C-Faser Basis herzustellen und zu erproben, ist ein Einsatz an jeder anderen Stelle im Interieurbereich möglich.

In Bezug auf die Materialien ist das hochorientierte C-Faservlies natürlich gesetzt. Weiter Materialien für die Panels sind Nomex Wabenkerne, Epoxyd- und Phenolharze zur Tränkung der Faserhalbzeuge und Anbindung an den Wabenkern.

Als erstes Matrixsystem wurde ein epoxidbasiertes Vakuuminfusionsharzsystem erprobt, dass die FAR-Anforderungen im Hinblick auf das Brandverhalten laut Hersteller erfüllen soll. Es wurden Coupons für Brandtests und eine Deckhaut hergestellt die in Kombination mit einem Nomex Wabenkern und einer weiteren Deckhaut zu einem beheizbaren Sandwichpanel komplettiert wurde.



Bild 11:
Vorbereitungen zur Vakuuminfusion von C-Faser Vliesen. Im Ausgangszustand bauen die Vliese recht stark auf, erst mit dem Etablieren eines Vakuums werden die Fasern soweit kompaktiert, das die Infiltration mit Harz zu einer verwertbaren Deckhaut führt.

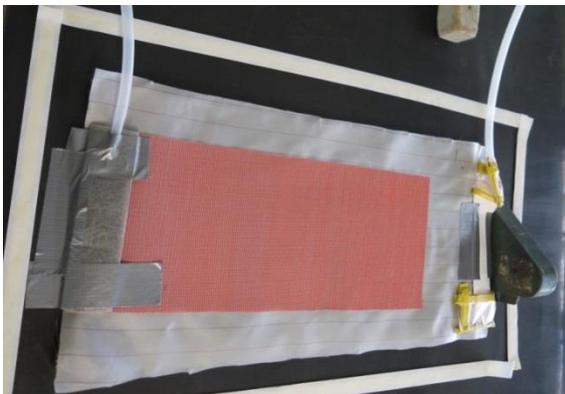


Bild 12:
Auf der linken Seite befindet sich der Harzzulauf, auf der rechten Seite wird die Luft abgesaugt. Das weiße Material ist ein Abreißgewebe, das rote Material ist eine Fließhilfe für die Harzfront.

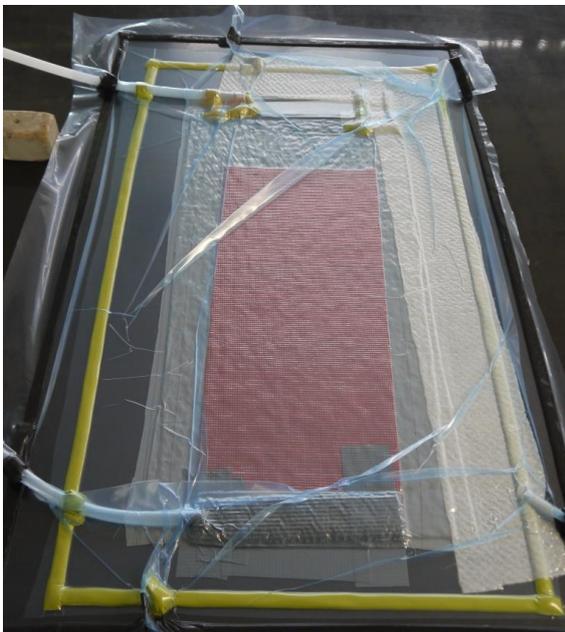


Bild 13 u. 14:

Das C-Faservlies wird über einen Zeitraum von 2h unter Vakuum kompaktiert, in dieser Zeit wird der Aufbau auf 60°C temperiert um mögliche Restfeuchtigkeit aus dem Faserhalbzeug zu entfernen. Bei abgeschalteter Vakuumpumpe wird die Dichtigkeit des Aufbaus vor der Vakuuminfusion geprüft. Über 10 min darf der Vakuumabfall nicht über 2mbar liegen.



Bild 15:

Das getestete EP-Brandschutz- Harzsystem erwies sich als anspruchsvoll im Hinblick auf die Verarbeitung. Das vortemperierte Harzsystem wird nach dem Mischen der Komponenten während der Infusion konstant auf 70°C gehalten. Positiv im Vergleich zu anderen Systemen mit brandhemmenden Zusätzen, ist das Vorliegen der Additive in flüssiger Form, so dass beim Tränken der Fasern keine Gefahr der Entmischung / Ausfilterung der Additive besteht.



Bild 16 u.17 :

Um das angemischte Harz auf konstanter Temperatur zu halten wird das Harz während der Infusion im Ofen temperiert.

Der trockene Faserstack wird auf einer temperierten Oberfläche mit Harz getränkt. Der Temperaturfühler (graues Klebeband) regelt die Oberflächentemperatur auf 75°C. Durch diese Maßnahme sinkt die Viskosität des Harzes beim Einströmen in den Faseraufbau und führt zu einer schnellen und vollständigen Durchtränkung.

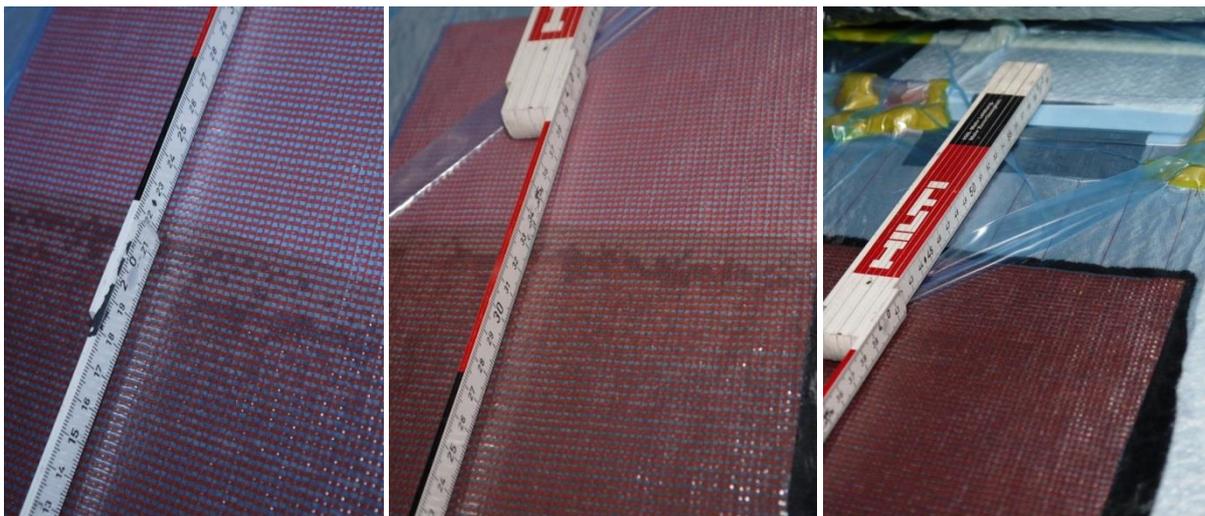


Bild 18, 19 u. 20: Verlauf der Fließfront über die Zeit der Vakuuminfusion bis zur vollständigen Durchtränkung der Faserhalbzeuge mit Harz.

Neben dem Aufwand zur Temperierung des neuen Harzsystems während der Infusion ist auch das Aushärtungsprozedere anspruchsvoller als auf den Datenblättern des Herstellers beschrieben. Erst nach drei Temperaturzyklen mit stetig steigenden Temperaturen war die Matrix ausreichend vernetzt. Bei jeder Erhöhung der Temperatur erweichte das Harzsystem erneut bis in die flüssige Phase. Die notwendige Temperatur zum vollständigen Vernetzen der Matrix liegt mit 170°C in einem Bereich, der es notwendig macht die Standard- Verbrauchsmaterialien wie Vakuumfolie, Fließhilfen usw. durch hochtemperaturstabile Hilfsmaterialien zu ersetzen.



Bild 21:
Die notwendigen hohen Temperaturen zur Aushärtung des Harzsystems führten teilweise zur Überlastung der Verbrauchsmaterialien.



Bild 22:
Das dreimalige Erwärmen der Deckhaut zum Aushärten des Harzsystems ergab Spannungsrisse in der Matrix. Grundsätzlich wurde festgestellt, dass das Harzsystem vergleichsweise spröde ausreagiert.

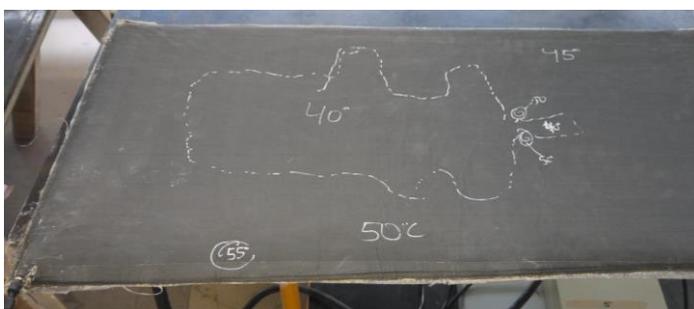


Bild 23:
Der Heizungstest unmittelbar nach der Entformung ergab ein Δt von 15°C über die Fläche. Der vorherige Test an den trockenen Vliesen viel mit einem Δt von 5°C erheblich homogener aus.

Vor dem Hintergrund, dass die Verarbeitung des flammenhemmend ausgerüsteten Harzsystems EPON Flamex 9600 sich sehr aufwendig gestaltete, wurde nach alternativen Matrixsystemen mit brandhemmenden Zuschlägen recherchiert, die die FAR Anforderungen erfüllen.

Bezeichnung	EPON FlameX Resin 9600 Curing Agent 9700	Araldite FST Harz 40002 Härter 40003	Harz SR1126 Härter SD8203 o. SD8202	EPOLAM 2500/ 2500 o. 2501	FIRESTOP S 425	LH25/LH25
Hersteller	HEXION	HUNTSMAN	SICOMIN	SIKA	BÜFA	ebalta
Verarbeitungsprozess	RTM VARTM Infusion	RTM Infusion Pultrusion	Handlaminat	Handlaminat	RTM Infusion	Handlaminat Infusion
Mix Viskosität @25°C @30°C @40°C @50°C @60°C	1450-1500 575-675 250-300	Ca.750 Ca.500 Ca.200 Ca.100 Ca.50	SD8203 SD8202 1000 770 600 500	2500 2501 3500 1800	Ca.190	850-1050
Tg onset °C	85	260	SD8203 SD8202 90 93	2500 2501 100 95	114°C (HDT ISO 75-A)	Ca.90
Topfzeit	Einstellbar 5Std.->24Std @60°C	Ca. 45min @70°C	Ca. 1Std @ 30°C Ca. 2,5Std. @ 20°C	2500 2501 90min 25min @25°C	100g Harz +2ml Butanox M-50 30-45min 20°C-TMax	Ca. 1Std
Typischer Aushärte-zyklus	150°C/1,5Std post cure bei 180°C möglich um mech. Eigenschaften zu erhöhen	100°C/1Std +120°C/1Std +180°C/2Std 100°C/4Std +180°C/2Std.	23°C/12Std +40°C/6Std +60°C/4Std +80°C/4Std 23°C/24Std +40°C/24Std	23°C/16Std +100°C/2Std.	80°C/8Std	80°C/12-16Std
Mechanische Eigenschaften Festigkeit [MPa] E-Modul [MPa] Dehnung	Zug 95 3800 5%	Zug 135 3100 5%	Zug SD8203 SD8202 >31 35 >3200 >3800 0,9% 0,8%	Biegung 2500 2501 90 60 3900 3900 (16Std/23°C)	Zug 55 3400 2,0%	Biegung Ca.90 Ca.4600 2,2%
Eigenschaften	ungefüllt 60s vertical burn FAR25.853(a) geeignet für Aircraft Interieur und sekundäre Strukturen Smoke toxicity BSS7239 Smoke density BSS7238 In Kombination mit einem zertifizierten Feuerschutz-anstrich oder Gelcoat FAR 25.753	ungefüllt FAR 25.853 ABD 0031	gefüllt FAR25-853 (a) Halogenfrei selbstverlöschendes Epoxidharzsystem (anschwellend) Feuerwiderstandsprüfung: UL94 V0 Rauchgas-Prüfung: AITM 2.0007 BSS 7238 Rauchgas-Toxizität-Prüfung: AITM 3.0005 BSS 7239	gefüllt FAR25.853a Härter 2500 Eurocopter ECS.2196.20 Geringe Toxizität (ohne MDA) Härter 2501 Airbus-Normen RS C-M-00260/1 und AIMS 04-27-002/1	UP-Harz mit DCPD Halogenfrei Nicht nach FAR FAR25.853a getestet soll aber diese erreichen in Verbindung mit dem BÜFA-Gelcoat Firestop GC C 285 Nur Laminat BS 476 part7: class 2 Laminat+Gelcoat EN45545: R1: HL3 R7:HL2 R17:HL2	Brennbarkeitsklasse S 4 Rauchentwicklungs-klasse SR-2 Tropfbarkeitsklasse ST-2 Rauchgas-toxizität DIN 5510-2 Anhang C mit FAR25 vergleichen

Abbildung 24: Harzsysteme mit Brandschutzeigenschaften zum Erreichen der FAR Norm

Gesucht wird ein Harzsystem das für die Verarbeitung im Vakuuminfusionsprozess und in der hydraulischen Heißpresse geeignet ist. Eine Glasübergangstemperatur von über 120°C besitzt, und eine Topfzeit von mind. 1,5Std aufweist. Die mechanischen Eigenschaften sollen vergleichbar mit einem Standard Epoxidharz sein und es soll die Anforderungen der FAR 25.853 erfüllen.

Nach einem Vergleich der recherchierten Harzsysteme wurde das Produkt Araldite FST 40002/40003 von der Firma HUTSMAN herausgefiltert. Es erfüllt als einziges System alle gewünschten Kriterien.

Das alternative Produkt kommt von der Fa. Huntsman, ist zweikomponentig und niedrigviskos eingestellt. Die Verarbeitung im Vakuuminfusionsverfahren und im Pressverfahren ist nach Papierlage möglich.

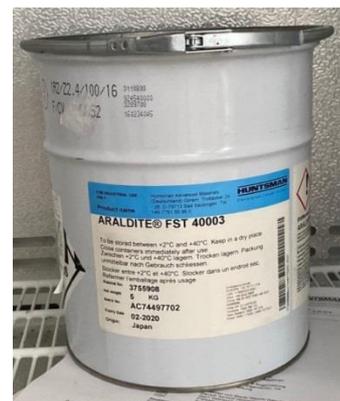
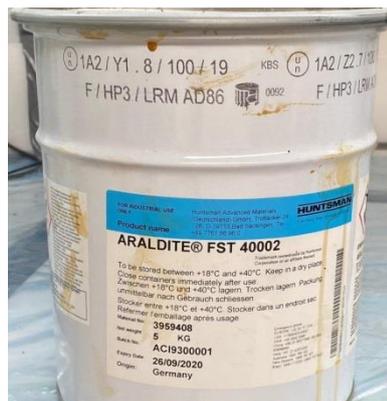


Bild 25 u. 26: Harz- und Härter- Komponente des brandhemmend ausgerüsteten Epoxidharzes

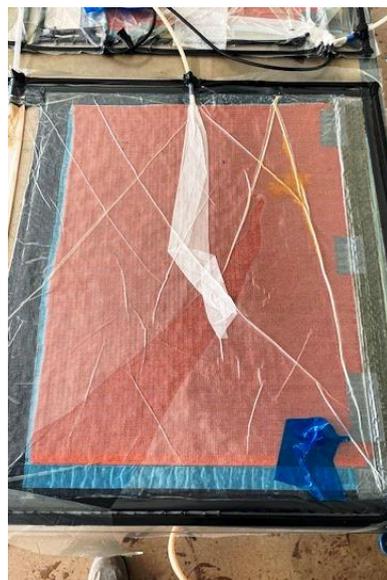


Bild 27u.28: Die Tränkung der Fasern im Vakuuminfusionsverfahren wurde in der Temperkammer durchgeführt um die Prozessvorgaben des Herstellers zu erfüllen.

Die Harzkomponente des Systems wurde auf 50°C vorgewärmt. Nach dem Mischen mit der Härterkomponente ergab sich eine Temperatur von 35°C für die Infusion. Der Faserstack wurde in der Temperkammer auf 50°C vorgewärmt. Auf diese Weise sank die Viskosität des Harzes noch einmal während der Durchtränkung der Fasern. Nach Abschluss der Infusion wurde die Temperatur gemäß Datenblatt des Systems schrittweise auf 100°C erhöht und dann zur Aushärtung für 4 Stunden auf 100°C gehalten.

Die Verarbeitung machte keinerlei Probleme und auch die Aushärtung des Systems erfolgte erwartungsgemäß.



Bild 29: Die hergestellten Platten wurden zu Coupons für den Brandtest besäemt.

Verarbeitungsseitig hat sich das Huntsman System somit bewährt und kommt als Matrixsystem für die weiteren Projekt Demonstratoren in Frage. Die Ergebnisse des Brandtests sind im AP 6.3 dokumentiert.

AP 6.3: Herstellung, Prüfung, Optimierung von Coupons

Für die Ermittlung strukturmechanischer Kennwerte wird 3D Icom Coupons mit von ITA-A zur Verfügung gestellten rCF-Vliesstoffen herstellen. Diese Coupons wurden im Nass Pressverfahren bei 3D Icom hergestellt und können im Labor des FIBRE auf ihre mechanischen Eigenschaften hin untersucht werden. Die Ergebnisse liefern Kennwerte für die Auslegung und geben Hinweise auf die erzielbaren Kennwerte mit dem neuen Orientierungsverfahren. Auch fibretech composites wird Coupons definieren, deren Aufbau sich an den Entwürfen für Heizungsmodule orientieren und deren Strukturmechanik charakterisiert werden soll. Die Coupons für FCT werden so gestaltet, dass sie eine vorgegebene Kontaktierung besitzen, so dass an ihnen auch Heizungsversuche zur Konstruktion des Heizungs-Moduls vorgenommen werden können.

Anhand von Coupontests wurde die Eignung der recyklierten Vliese als Widerstandsheizung untersucht.

Hierfür wurden vom Projektpartner ITA Vliese zur Verfügung gestellt, die durch Pyrolyse Verfahren von Harzen, Schichten und anderen Fremdstoffen befreit und zu gerichteten Vliesen unterschiedlicher Grammaturn verarbeitet.



Bilder 30 u. 31: Im Pyrolyse Verfahren recycelte C-Faservliese.

Neben den vom ITA zur Verfügung gestellten Vliesen wurden weitere C-Faservliese unterschiedlicher Grammaturnen und Faserausrichtungen im Hinblick auf Ihrer Eignung als Widerstandsheizung getestet.



Bild 32: 30 g/m² Wirrfaservlies mit einer aufkaschierten Kupferfolie im Kontaktierungsbereich.

Dabei erwies sich eine mit elektrisch leitfähigem Kleber ausgestattete Kupferfolie für sehr leichte Vliese mit Grammaturnen bis ca. 80g/m² als gute Möglichkeit die elektrische Energie in die C-Faser zu überführen ohne eine Überhöhung des Übergangswiderstandes im Kontaktierungsbereich. Bei Vliesen ab ca. 100g/m² Flächengewicht zeigte die Kupferfolie allerdings signifikante Temperaturerhöhungen im Bereich des Übergangs von Kupfer zum Vlies, was auf einen erhöhten Übergangswiderstand schließen lässt.



Bild 33: Flache Ausführung eines Krimpanschlusses zur Kontaktierung.

Neben der selbstklebend ausgestatteten Kupferfolie zur Kontaktierung wurde ein metallisches Klettband als alternative Kontaktierung der C-Vliese erprobt.

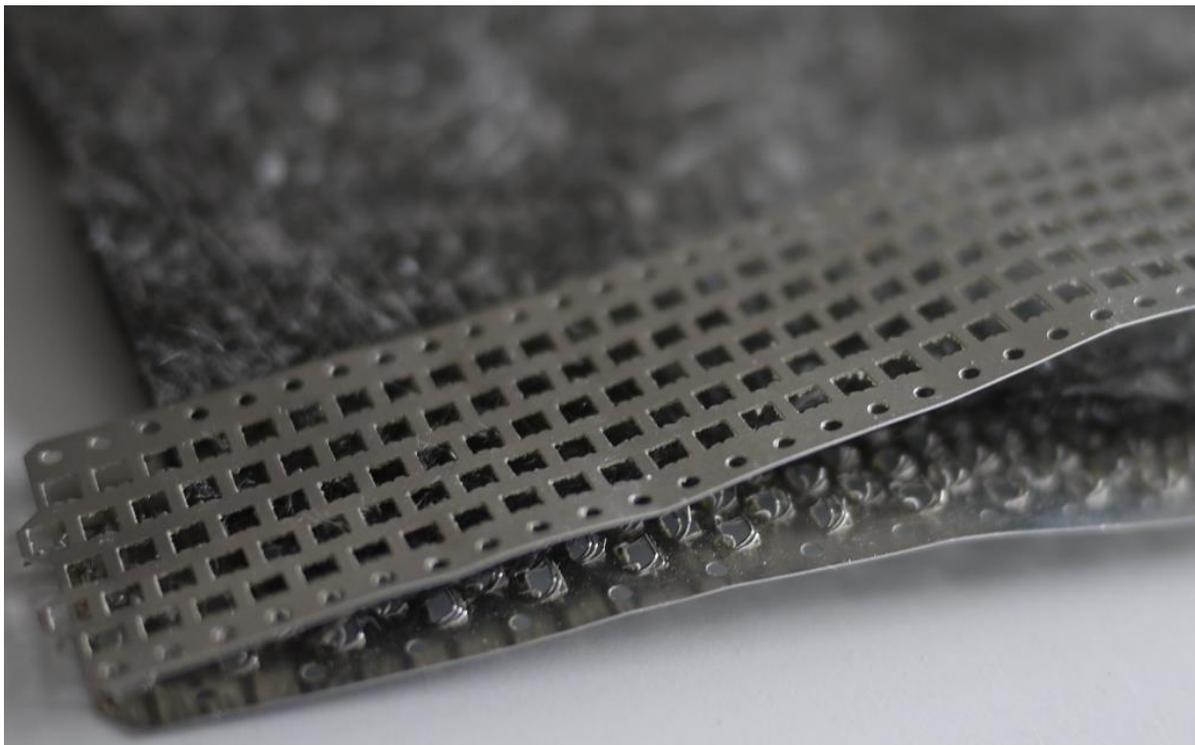


Bild34 : Metallisches Klettband zur Kontaktierung der C-Faserhalbzeuge

Durch die große Anzahl an ausgestanzten Wiederhaken ergibt sich eine Vielzahl an Kontaktstellen zwischen Metall- Klettband und Faserhalbzeug. Das Vlies wird von beiden Seiten eingespannt. Die Klettwirkung funktioniert auch noch bei Vliesen mit Grammaturen von bis zu 300g/m².

Als bereits bewährte fibretech Lösung zur Kontaktierung von Kohlefasergeräten wurde das fibretemp Kontaktierungsband in Verbindung mit C-Faservliesen überprüft.



Bild 35 : Kontaktierungsband zwischen zwei Lagen Vlies

Das Kontaktierungsband besteht aus einem 80mm breiten Kohlefaser Gewebe in das einseitig Kupferdrähte eingewirkt sind. Durch die Breite des Gewebes ergibt sich eine große Kontaktfläche zum bestromten Faserhalbzeug. Durch das Einwirken der Kupferdrähte entsteht eine Vielzahl von Kontaktpunkten zwischen Kupfer und C-Fasergewebe des Kontaktierungsbandes.



Bild 36: Linke Seite metallisches Klettband, rechts Standard Kontaktierungsband zur Einleitung.

Metallisches Klettband und Standard Kontaktierungsband liefern gute Ergebnisse im Hinblick auf die Wärmeentwicklung und den Übergangswiderstand im Bereich der Kontaktierung.

Neben der elektrischen Kontaktierung wurde im Zuge der ersten Coupon Tests auch die Eignung der C-Faser Vliese als Widerstandsheizelement untersucht. Hierbei geht es in erster Linie um die Gleichmäßigkeit der Wärmeentwicklung im Faserhalbzeug. Zu diesem Zweck wurde ein Testaufbau aus einem Schaltnetzteil und einem Temperaturregler erstellt. Die Coupons wurden mit den unterschiedlichen Kontaktierungen trocken unter Vakuumdruck verpresst und elektrisch angeschlossen. Vor dem Anschluss an das Schaltnetzteil wurde der Gesamtwiderstand des Heizfeldes gemessen. Anschließend wurden die Testaufbauten bestromt und mit Hilfe einer Thermografie Kamera das Verhalten während der Aufheizphase überprüft und bewertet.



Bild 37 : Testaufbau aus Schaltnetzteil und Regler

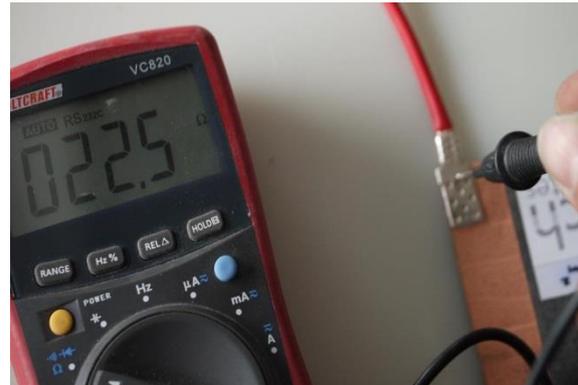


Bild 38: Widerstandsmessung eines Heizfeldes

Bei den leichten Vliesen mit Grammaturen bis ca. 80g/m^2 ergibt sich ein relativ hoher elektrischer Widerstand. Dies macht diese Vliese interessant für den direkten Betrieb an Hausnetzen mit relativ hohen Spannungen im Bereich 110-220V. Die Wärmeentwicklung der leichten Vliese war bei allen getesteten Coupons inhomogen. Das ΔT betrug beim 30g/m^2 Vlies bei einer mittleren Temperatur von 50°C bereits 21°K . Problematisch sind vor allem diskrete Bereiche die erheblich wärmer werden als der Durchschnitt der Heizfläche. Bei höheren Heizleistungen entstehen hier schnell Temperaturen die kritisch für das Matrixsystem sind.

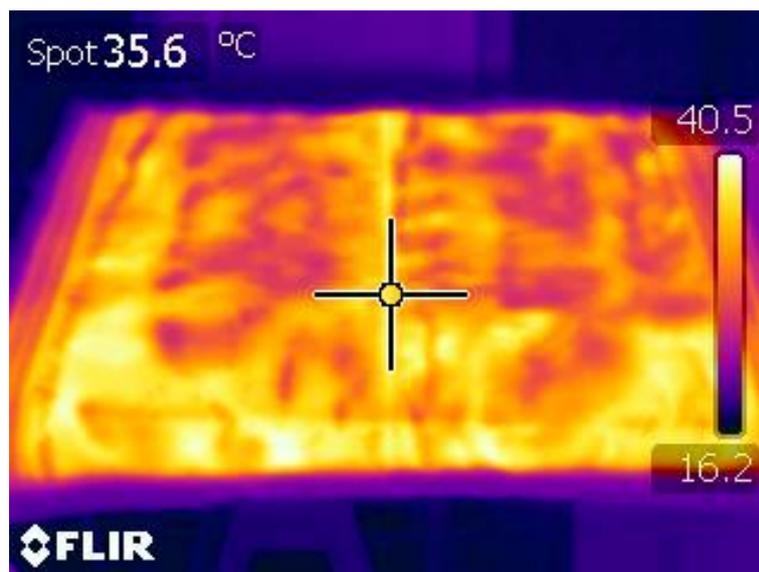


Bild 39: Inhomogene Wärmeverteilung eines 80g/m^2 Wirrfaser Vlieses.

Die Coupons die aus den recyklierten C-Faser Vliesen hergestellt wurden, zeigen hinsichtlich des elektrischen Widerstandes ein ähnliches Verhalten wie C-Faser Gewebe gleicher Grammat. Die Gesamtwiderstände der Heizfelder liegen deutlich unter einem Ohm. Vor diesem Hintergrund bietet sich der Betrieb mit Kleinspannungen bis 42Volt an. Zulassungsseitig birgt die Kleinspannung Vorteile im Hinblick auf die Gefahrenanalyse und Zertifizierung.

Die Wärmeentwicklung der Pyrolyse-Vliese ist sehr viel gleichmäßiger als die verglichenen marktüblichen Wirrfaser-Vliese. Der Pyrolyse Prozess und die Ausrichtung der Filamente haben einen positiven Einfluss auf die Eignung der recyklierten C-Faservliese als Widerstandsheizelement. Bei einer mittleren Temperatur von 50°C ergab sich ein ΔT von nur 3°K für die ersten getesteten Coupon Flächen. Im Zuge des zweiten Projekttreffen am 27.06.2018 in Gera beim Projektpartner Fa. Suchy, wurde vereinbart, das noch weitere recyklierte Vliese durch das Institut für Textiltechnik Augsburg hergestellt werden, um die Ergebnisse zu verifizieren.

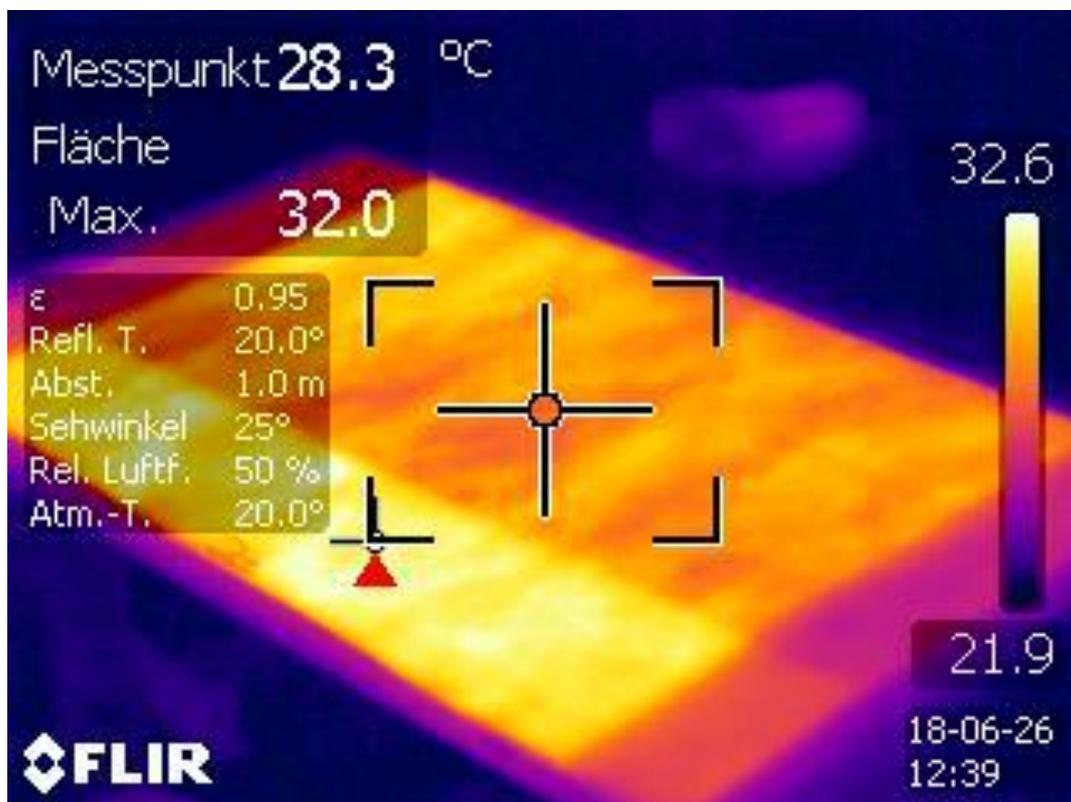


Bild 40: Thermografieaufnahme eines Heizelementes aus recyklierten C-Faser Vlies in einer Epoxidharz Matrix.

Für das AP 6.3 wurden weitere CFK Coupons hergestellt und mit einer brandhemmenden 0,5mm starken Gummibeschichtung versehen, um die Brandtests, die beim Partner fibre (Faserinstitut Bremen) durchgeführt werden, zu komplettieren.

Eine dünne Gummischicht an der Oberfläche der Bodenpanels offeriert neben den Brandschutz-Eigenschaften einen ausgezeichneten Dämpfungsgrad der die Sandwichpanels mechanisch und akustisch verbessert.

Es wurden Abriebtests an zwei Varianten gummierter Oberflächen durchgeführt um eine Aussage zur Verschleißfestigkeit zu erhalten.

Die Versuche sind an einer pneumatisch betriebenen Apparatur durchgeführt worden, an der die Scheuertouren eingestellt werden können. Die zu testende Carbonplatte mit der aufgetragenen Gummierung wird eingespannt, mit einem definierten Gewicht von 3,3 kg belastet und über die raue Seite einer Laminatplatte gescheuert.

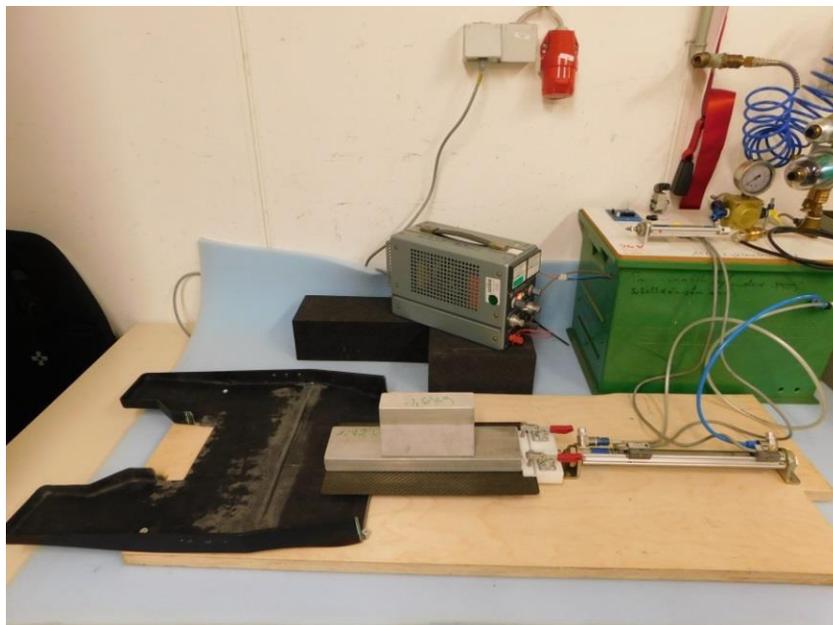


Bild 41: Versuchsaufbau zu Scheuertest.

Es wurden zwei unterschiedliche Beschichtungen getestet, eine ohne Flammschutz (schwarz) und eine Gummierung mit Flammschutzmittel [FSM] (weiß).

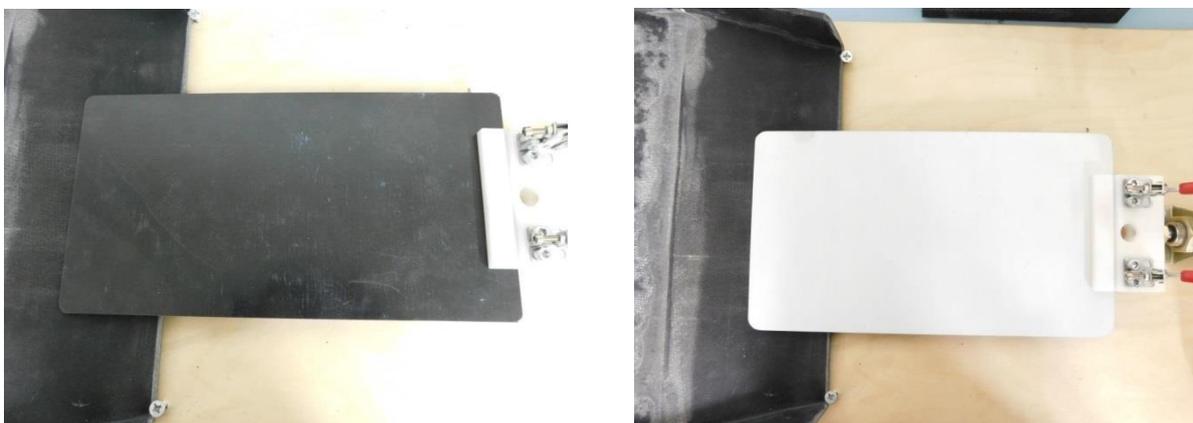
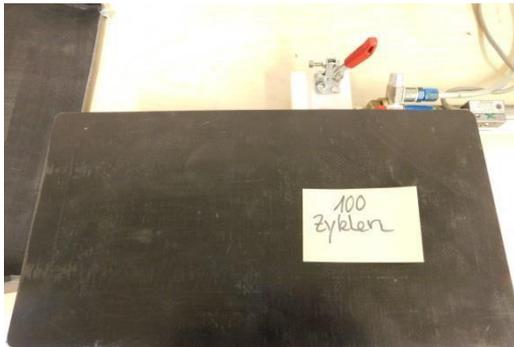


Bild 42 u.43: Carbonplatte mit Gummierung ohne Flammschutz und mit Flammschutz (weiß)

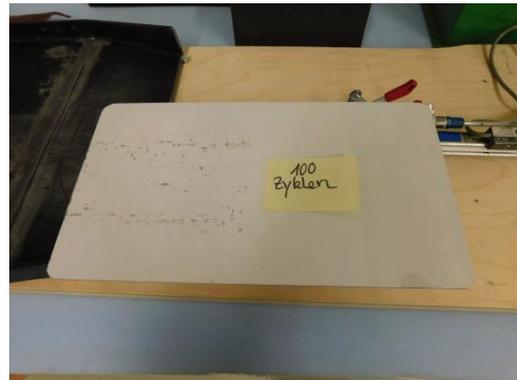
Die Probe wird mit der beschichteten Seite nach unten eingespannt und mit dem Gewicht beschwert. Anschließend wird die Zyklenzahl eingestellt und das Gerät gestartet. Nach Ablauf der Scheuertouren wird die Probe entnommen und visuell begutachtet und bildlich dokumentiert. Dieser Ablauf wiederholt sich bis 10.000 Touren erreicht sind. Die Hubgeschwindigkeit beträgt dabei 42 cm/sec. Überprüft wurden 100, 200, 400, 800, 1000, 1500, 2000, 2500, 5000, 7500 und 10.000 Scheuer-touren. Die Ergebnisse werden im Folgenden dargestellt:

Anzahl Scheuertouren 100
Carbonplatte mit Gummi ohne Flammschutz



Ein leichter Abrieb der Gummierung ist zu erkennen

Carbonplatte mit Flammschutz- Gummi

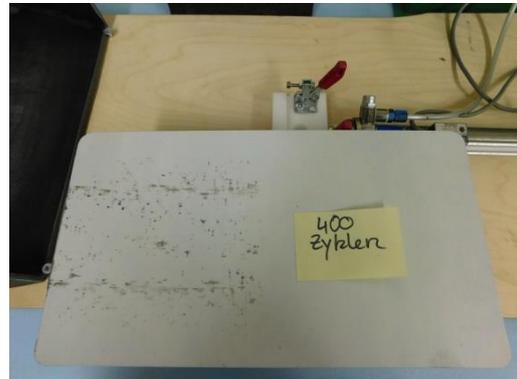


Abzeichnung leichter schwarzer Spuren, kein Abrieb

Anzahl Scheuertouren 400



Verstärkter Abrieb und Bildung von Gummikrümeln



Die schwarzen Spuren durch Abfärbung leicht vermehrt

Anzahl der Scheuertouren 1000



Gummibeschichtung beginnt sich an der Kante zu lösen



Leichter Anstieg der Verfärbung auf der Gummierung, kein Abrieb erkennbar

Anzahl der Scheuertouren 2500



Vollständiges Ablösen der Gummierung im
Randbereich



Keine sichtbaren Veränderungen

Anzahl der Scheuertouren 5000



Beschichtung auch auf der Fläche teilweise
Abgescheuert
Versuch mit der Gummierung ohne FSM endet.



Bis auf Anstieg der Verfärbung
keine Veränderungen

Anzahl der Scheuertouren 10.000



Beschichtung nach wie vor intakt, lediglich
Abfärbungen vom Reibpartner erkennbar

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die Beschichtung ohne FSM der mechanischen Beanspruchung nicht standhält. Anders hingegen die Beschichtung mit FSM, die sogar nach 10.000 Scheuerzyklen keinen Abrieb zeigt. Unter der Voraussetzung, dass auch der Brandtest positiv verläuft empfiehlt sich die Gummierung mit Flammenschutzmittel damit für den Einsatz auf Bodenpanels.

Brandtests an Coupons

Für das AP 6.3 wurden Coupons von C-Faservliesen hergestellt, teilweise mit einer dünnen Gummischicht ausgerüstet und mechanisch getestet.

Sowohl die Matrix der CFK-Coupons als auch das Elastomer der gummierten CFK Coupons waren mit Flammenschutzmittel ausgerüstet und wurden beim Projektpartner fibre (Faserinstitut Bremen) nach FAR-Norm mit Hilfe des „Bunsenbrenner Tests“ geprüft. Beide Proben haben die Anforderungen im Hinblick auf die Selbstverlöschung, Brennweite, Abtropfen etc. erfüllt.

Aufgrund der guten mechanischen Testergebnisse und dem bestandenen Brandtest empfiehlt sich die Flammenschutzmittel ausgerüstete Gummierung für den Einsatz auf Bodenpanels

AU-190322-8347-5

Probe	Nr	l[cm]	d[mm]	b [cm]	flame time [s]	drip flame [s]	t [s] at 38 mm	t [s] at 292	l [cm]
CM-Preg TC 200/620 CP 002 40 + Kraibon HHZ 9578/99 EFQ.	1	29,8	1,84	7,6	-	-	-	-	-
CM-Preg TC 200/620 CP 002 40 + Kraibon HHZ 9578/99 EFQ.	2	29,8	1,84	7,7	-	-	-	-	-
CM-Preg TC 200/620 CP 002 40 + Kraibon HHZ 9578/99 EFQ.	3	29,8	1,88	7,7	-	-	-	-	-
CM-Preg TC 200/620 CP 002 40 + Kraibon HHZ 9578/99 EFQ.	4	29,8	1,88	7,7	-	-	-	-	-
Hexion EPON Flamex 966 Epicure Flamex 9701	5	29,6	3,55	7,7	-	-	-	-	-
Hexion EPON Flamex 966 Epicure Flamex 9701	6	29,6	3,55	7,7	1	-	-	-	-
Hexion EPON Flamex 966 Epicure Flamex 9701	7	29,6	3,55	7,7	-	-	-	-	-
Hexion EPON Flamex 966 Epicure Flamex 9701	8	29,6	3,55	7,7	-	-	-	-	-

Burn rate for all experiments: zero

Flame self-extinguished directly after removing burner. Exception: Sample Nr.6.
Flame time 1 s.

Abb. 55: Testergebnisse Bunsenbrenner Test nach FAR-Norm durchgeführt vom Projektpartner fibre.

Im Arbeitspaket 1.1 wurde ein weiteres Epoxid- basierendes Matrixsystem mit brandhemmenden Eigenschaften erprobt und hinsichtlich der Verarbeitungseigenschaften als praktikabel eingestuft.

Um zu überprüfen, ob die brandhemmenden Eigenschaften des Araldite Systems der Fa. Huntsman den internationalen Anforderungen im Verkehrsflugzeugbau entsprechen wurde das System im Brandhaus Rhein-Main nach den EASA Richtlinien abgeprüft.

Material:	Laminat bezeichnet als „CFK Proben mit Brandschutzharz“
Aufbau:	200 g/m ² Basalt Gewebe 350 g/m ² C-Faser Vlies 200 g/m ² Basalt Gewebe Matrix: Huntsman Araldite FST 40002/40003
Dicke:	ca. 4,0 mm
Flächengewicht	ca. 3,9 Kg/m ²
Farbe	grau

Abb. 56: Aufbau der Brandtest Coupons

Aussehen der Proben vor dem Versuch

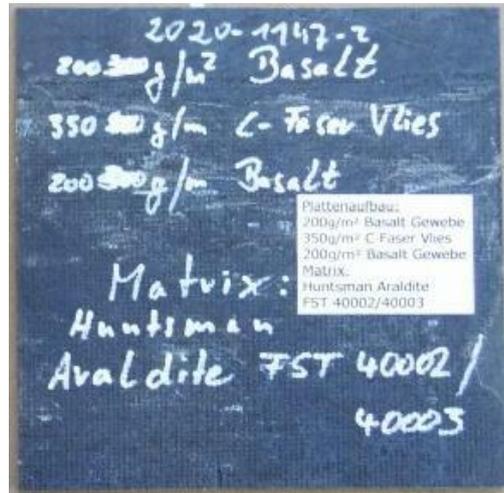


Bild 57/58: Vorder- Prüfseite der Proben

Rückseite der Proben

Das Material wurde normgerecht bei 23°C und 50 % Luftfeuchtigkeit gelagert bis zur Gewichtskonstanz. Es wurde unmittelbar vor den Versuchen aus dem Klimaraum entnommen.

Versuchsaufbau:

Es wurde ein Brenner gemäß Anhang F zu FAR 25.853 Teil 1 verwendet. Es wurde mit einer Gesamtflammenlänge von ca. 70 mm geprüft. Die Länge des inneren Flammkegels betrug ca. 30 mm und die Temperatur, gemessen an der Spitze des inneren Flammkegel betrug mindestens 1027°C. Die Brennerflamme wurde senkrecht auf die Probenmitte gerichtet. Der Abstand zwischen Brenner und Probenoberfläche betrug 30 mm.



Bild 59-61: Ausrichtung und Temperatur des Brenners

Sichtkontrolle der Proben nach der Beflammung



Bild 62: Vorderseite der Proben nach der Beflammung

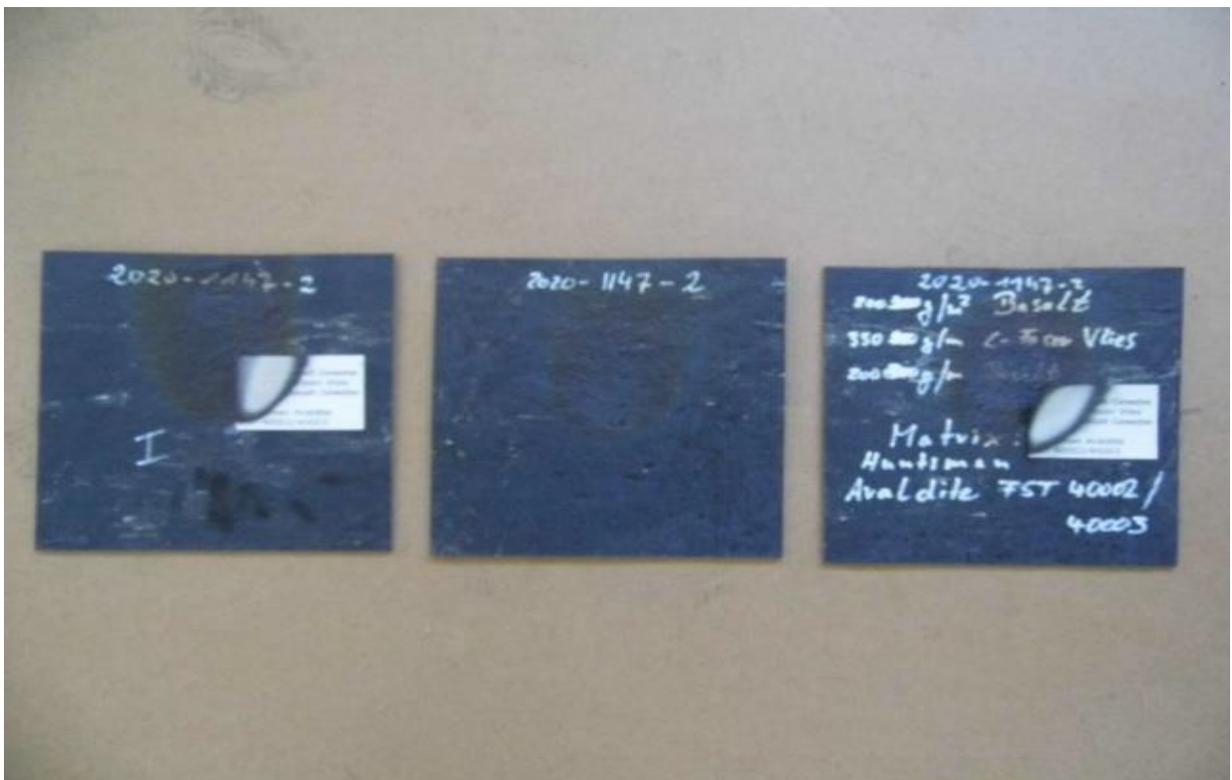


Bild 63: Rückseite der Proben nach der Beflammung

Prüfresultate:

Beflammung der Probenmitte / vertikale Probenanordnung Beflammungsdauer 15 Minuten, Flammentemperatur ca. 1093°C±83°C. Abstand Brenner – Probenoberseite: 30 mm.

Probe- Nr.	1	2	3
Zündzeit [s]	10	20	12
Durchbrennen [s]	--	--	--
Selbstverlöschend [s]	902	903	905
Brennzeit [s]	902	903	905
Versuchsende [s]	902	903	905
Brennfleckgröße (L x B) [mm]	130 x 140	135 x 155	120 x 155

Beobachtungen:

Ausbreitung der Flammen auf der Oberfläche bis zum oberen Probenrand. Mittlere Rauchentwicklung während des Versuches.

Leichte Rauchentwicklung auf der Probenrückseite nach 20 – 30 Sekunden Beflammungszeit. Verfärbung auf der Rückseite.

Bewertung:

Das Material erfüllt die Anforderungen (kein Durchbrennen) an die CS-23.

Der Test des alternativen Brandschutz Harzsystems von Huntsmann verlief sehr positiv. Die Verarbeitung des Systems erfolgte problemfrei und die Performance im Brandtest war gut. Das System wurde für die Herstellung weiterer Demonstratoren im Projektverlauf verwendet.

Entwicklung Berechnungstool für die C-Faser Vlies Heizung:

Beim Carbonvlies- verstärktem- Kunststoff liegt ein Werkstoffverbund aus zwei unterschiedlichen Materialien vor.

Sie sind über mechanische und chemische Bindungseffekte verbunden, weisen aber sehr unterschiedliche Eigenschaften auf.

Hinzu kommt das die Fasern oft mit einer Schlichte behandelt sind, die für eine bessere Verbindung mit dem Harz sorgen soll.

Vor diesem Hintergrund existieren für das gesamtelektrische Verhalten vielfache Einflussgrößen.

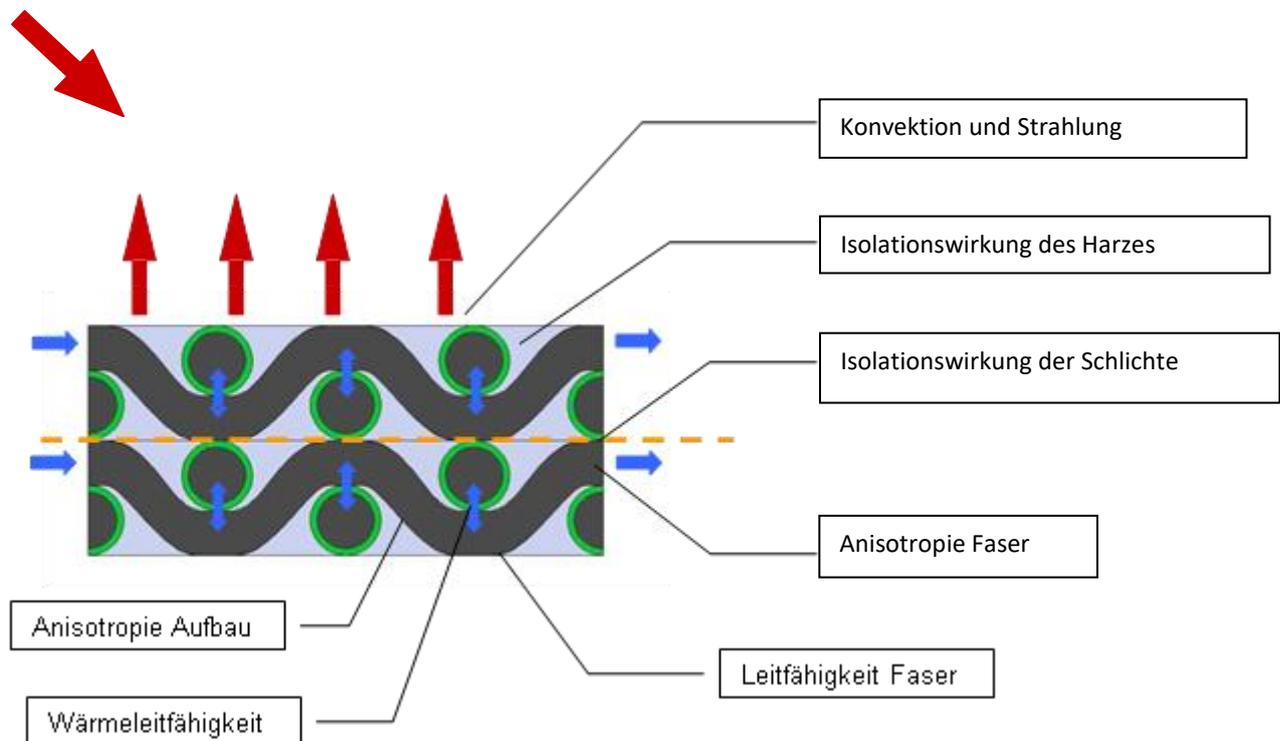


Abbildung 64: Einflüsse auf die Heizschicht

Für die Entwicklung eines Tools zur Auslegung einer C-Faser Vlies Heizung können einige dieser Einflussgrößen vernachlässigt werden sofern sie grundsätzlich vorliegen und Ihr Einfluss linearer Natur ist.

Konvektion und Strahlung an der Oberfläche einer beheizten Struktur liegen immer vor. Ihr Einfluss ist linear zur Größe der Oberfläche und den Umgebungsbedingungen. Sofern die Messung der elektrischen Kennwerte an gleich großen Coupons unter gleichen Umgebungsbedingungen erfolgt, ist ihr Einfluss zu vernachlässigen.

Die elektrische Isolationswirkung des Harzsystems ist zum einen harzspezifisch, zum anderen davon abhängig welcher Faservolumengehalt des Verbundes vorliegt. Sofern das eingesetzte Harz definiert ist und keine alternativen Matrixsysteme verwendet werden, bleibt nur noch der Faservolumengehalt als Variable.

Die Deckschichten der Sandwichstrukturen werden beim Partner fibretech im Vakuuminfusionsverfahren hergestellt. Die Varianz des Faservolumengehaltes bewegt sich in einem Bereich von ca. +/- 2%. Für die Auslegung der Heizung kann dieser Einfluss vernachlässigt werden. Gleiches gilt für die Herstellung der Deckhäute im Pressverfahren, wie es beim Partner 3D-Icom Anwendung findet, sofern die Pressdrücke beim Fertigungsprozess nicht variieren.

Die Schlichte dient für eine bessere Haftung der Fasern an der Matrix. Die Praxis hat gezeigt, dass sie dafür sorgen kann, dass eine Einleitung des Stroms in die Fasern gar nicht erst möglich ist. Ein einzelner Faseroving mit solch einer Schlichte verhält sich nicht als linearer Widerstand. Der Widerstand pro Länge ist damit nicht konstant.

Bei den verwendeten recyklierten C-Faservliesen ist die Schlichte durch den Pyrolyse-Vorgang nicht mehr vorhanden. Alternativ hergestellte Vliese werden in der Regel gewaschen, so dass der Einfluss der Schlichte bei Verwendung von C-Faservliesen zu vernachlässigen ist. Bei einer möglichen Serienproduktion sollten die zur Verwendung kommenden Faserhalbzeuge dennoch grundsätzlich auf ihren elektrischen Widerstand hin überprüft werden.

Die Leitfähigkeit der Faser und die Wärmeleitfähigkeit des Verbundes sind unter der Voraussetzung, dass durch den Recycling Prozess keine Schlichte mehr vorhanden ist, lineare Kenngrößen.

Im Zuge der Tests an diversen Vliesausprägungen konnte gezeigt werden, dass das gesamtelektrische Verhalten der jeweiligen Vliese weitestgehend linear ist. Das Einbringen einer zweiten Lage Vlies im Aufbau führte zu einer Halbierung des elektrischen Widerstandes.

Die ermittelten elektrischen Kennwerte der diversen Vliese und die abgeleiteten Ingenieurskonstanten bilden die Grundlage für das Berechnungstool.

C-Vlies Heizungs-Rechner

Eingabe
optionale Eingabe
Rechenwert bzw. Ergebnis

Halbzeug	HO-r-CF Vlies 105g/m ² 40%PA	
Anzahl Lagen	1	Stk
Anzahl Kontaktierungsbänder	1	Stk pro Seite
Grammatur		105 g/m ²
Spezifischer Widerstand (1mm breit, 1mm lang, 1g/m ²)		90,9 Ohm*(g/m ²)/mm ²
Heizfeldlänge inkl. Kontaktierung	1.200	mm
Heizfeldbreite	600	mm
Gesamtwiderstand inkl. Kontaktierung	1,512	Ohm
Spannung	20,0	V
Strom	13,2	A
Leistung	265	W
Leistungsdichte Heizfeld	421	W/m²
Leistungsdichte Kontaktierung	100	W/m ²

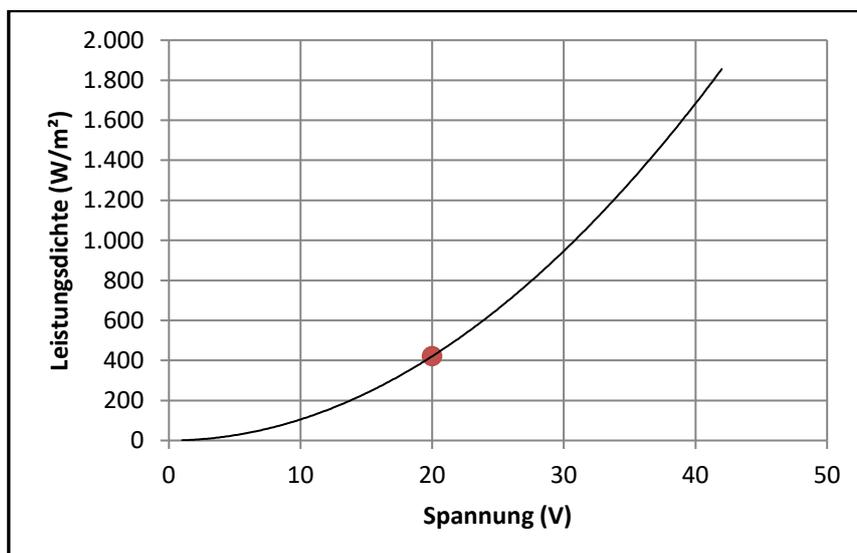


Abbildung 65/66: Ein- und Ausgabemaske des Heizungs-Berechnungstools für C-Faservliese

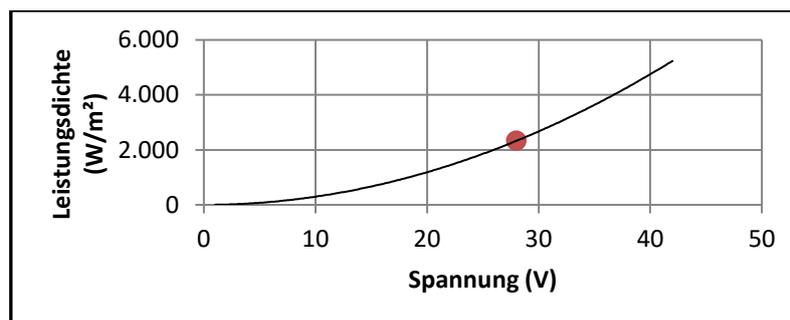
Die grün hinterlegten Flächen stellen die Eingabefelder da. Beim Klick auf das Eingabefeld Halbzeug öffnet sich ein Chart mit allen 12 bisher untersuchten Vliesen aus denen ausgewählt werden kann. Das Eingabefeld „Anzahl der Lagen“ ermöglicht den Aufbau eines Heizfeldes aus mehreren Lagen C-Faser Vlies. Entsprechend der Anzahl der Vlieslagen kann im Eingabefeld „Anzahl Kontaktierungsbänder“ der leitende Querschnitt zur Kontaktierung des Heizfeldes angepasst werden. Über die beiden Eingabefelder Heizfeldlänge und Heizfeldbreite wird die geometrische Größe des zu berechnenden Heizfeldes definiert. Über das Eingabefeld „Spannungen“ können unterschiedliche Bordspannungen berücksichtigt werden.

C-Vlies Heizungs-Rechner

Eingabe
optionale Eingabe
Rechenwert bzw. Ergebnis

Halbzeug	HO-r-CF Vlies 200g/m ²
Anzahl Lagen	2 Stk
Anzahl Kontaktierungsbänder	1 Stk pro Seite
Grammatur	400 g/m ²
Spezifischer Widerstand (1mm breit, 1mm lang, 1g/m ²)	77,8 Ohm*(g/m ²)/mm ²
Heizfeldlänge inkl. Kontaktierung	1.400 mm
Heizfeldbreite	600 mm
Gesamtwiderstand inkl. Kontaktierung	0,427 Ohm
Spannung	28,0 V
Strom	65,6 A
Leistung	1.838 W
Leistungsdichte Heizfeld	2.327 W/m²
Leistungsdichte Kontaktierung	1.353 W/m ²

Abbildung 67/68: Beispiel mit zwei Lagen 200g/m² Vlies und 28V Bordspannung



Parallel zum einfachen, Excel basiertem Berechnungstool für mehr oder weniger rechteckige Heizfeldgeometrien, soll auch eine Berechnungsstrategie zur Auslegung von geometrisch komplexen Heizfeldern mit Kohlenstofffaser-Vliesen erstellt werden. Begleitet wird die Entwicklung durch die Simulation von C-Faser Heizungen mittels der finiten Elementen Analyse.

Die Möglichkeiten der FE-Programme aber auch der bezahlbar verfügbaren Rechnerleistung steigen stetig und mit Ihnen auch die Möglichkeit komplexe physikalische Zusammenhänge vorab darzustellen. Dies ermöglicht gerade bei komplexen Heizfeld-Geometrien das Verhalten vorab zu simulieren und Probleme rechtzeitig zu identifizieren und geeignete Optimierungs-Maßnahmen rechtzeitig in den Prozess einfließen zu lassen.

Darum wird parallel an der Simulation der Kohlenstofffaservliesheizung in dem Finite Elementen Programm Abaqus CAE geforscht.

Das Programm bietet die Möglichkeit thermoelektrische Analysen durchzuführen. Zudem lassen sich im Programm auch anisotrope Werkstoffverhalten definieren und dies nicht nur für die oft genutzte Analyse mechanischer Probleme, sondern eben auch für thermische und elektrische Kennwerte.

Bei einer thermoelektrischen Analyse wird das Heizfeld in seinem kompletten Aufbau virtuell nachgebaut und anschließend der Stromfluss simuliert. Ziel ist eine Aussage über die Leistungs- und Wärmeverteilung in der Struktur.

Die Theorie die der Lösungsstrategie von Abaqus zu Grunde liegt entspricht den gängigen Formeln für Wärmeübertragung durch Strahlung, Konvektion und Konduktion. Gleiches gilt für die Übertragung und Leitung von elektrischen Strömen.

Zusammen mit den Möglichkeiten bei der Werkstoffdefinition sprechen diese Eigenschaften erst einmal dafür, dass eine Darstellung komplexer Systeme mit dem Programm möglich ist.

Die Werte für die benötigten Werkstoffkennwerte, Konstanten und Anfangsbedingungen sind im Programm allerdings nicht vorhanden. Sie müssen vom Benutzer definiert und eingegeben werden.

Hier liegt die Herausforderung. Dem Ermitteln und Einpflegen geeigneter Kennwerte.

Benötigt werden dabei die Werte für die Wärmeleitung in Faservorzugsrichtung, quer zu dieser in der Ebene und in Dickenrichtung zwischen den einzelnen Lagen. Ebenso für die elektrische Leitfähigkeit und die Wärmekapazitäten der einzelnen Materialien.

Für den notwendigen Abgleich zwischen berechnetem Ergebnis und der Realität wird zunächst mit einer einfachen Heizplatte begonnen, die dem Testaufbau entspricht und somit einen guten Abgleich mit der Realität ermöglicht.

Tabelle : Thermische und elektrische Kennwerte für die verwendeten Werkstoffe

	C-Faser	Epoxydharz	Pu-Schaum
λ_{\parallel} [W/mK]	4,9 ^[1]		
λ_{\perp} [W/mK]	1,7 ^[1]		
λ_{\perp} [W/mK]		0,20 ^[3]	0,03 ^[3]
c_p [J/kgK]	714 (300°K) ^[2]	1000(273°K) ^[3]	1400 ^[3]
ρ [kg/m ³]	1700 ^[1]	1200 ^[3]	80
R_{spez} [Ω m]	$16 \cdot 10^{-5}$	10^8	-

Die Heizplatte besteht im Modell aus einem Volumenbauteil mit zwei Elementschichten mit einer Gesamtschichtstärke von 2mm.

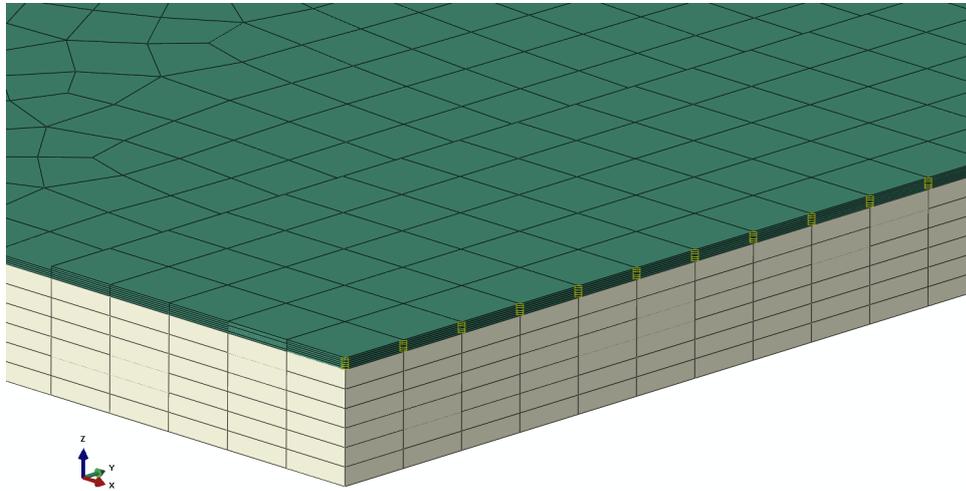


Abbildung 69: Netzmodell mit simulierten Faserlagen und einem Schaumkern als Isolation

Gebildet wird das Modell aus einem vernetzten Schalenmodell durch Aufkopplung der Lagen für die Heizschicht und den Schaum der die Unterlage simuliert (gewöhnlich findet sich die Heizung als eine Seite eines Sandwichaufbaus wieder der als Kern einen Schaum oder besser einen Wabenkern hat).

Für die Heizlage werden thermo-elektrische Brick- Elemente vom Typ DC3D8E zugewiesen. Für den Schaum werden Wärmeleitelemente vom Typ DC3D8 verwendet.

Die Schaumplatte ist im Modell fest mit der Heizplatte verbunden, so dass später hier wirklich nur Konduktion von Heiz- zu Isolierschicht vorliegt.

Die anisotropen Werkstoffeigenschaften des Vlieses werden über die Materialdefinition und die Orientierung des Materials im Modell zugewiesen.

Für die Berechnung wird im Modell ein elektrisches Potential angelegt, in der Realität entspricht das einer Konstant-Spannungsquelle wie etwa den verwendeten Schaltnetzteilen. Der abfallende Strom ergibt sich dann durch den Widerstand des Heizfeldes und damit auch die Leistung.

Verluste an die Umgebung werden über Oberflächenbedingungen für Konvektion und Wärmeabstrahlung im Modell definiert.

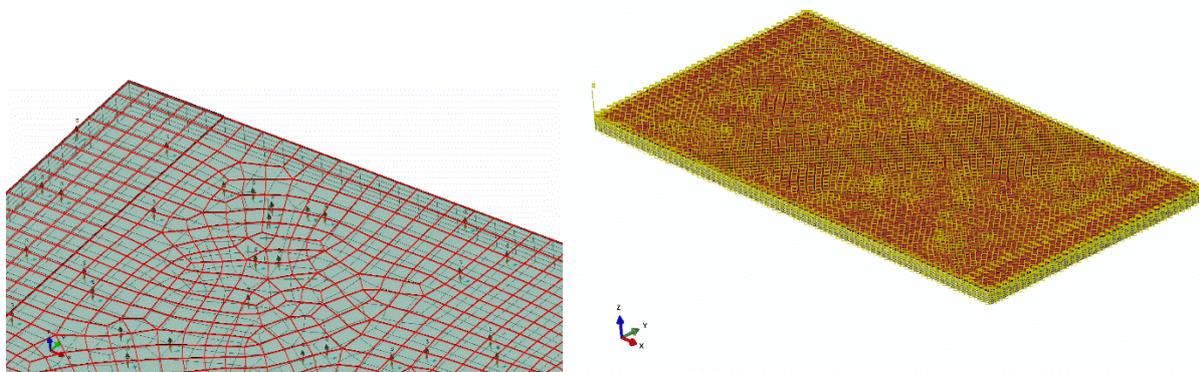


Abbildung 70: Materialorientierung und Flächen für Konvektion und Wärmestrahlung

Im Programm erfolgt die Analyse und Ausgabe für jedes Berechnungselement. Interessant ist die Ausgegebenen Temperaturverteilung die sich grafisch recht schnell mit dem Bild der Infrarot-Kamera vergleichen lässt.

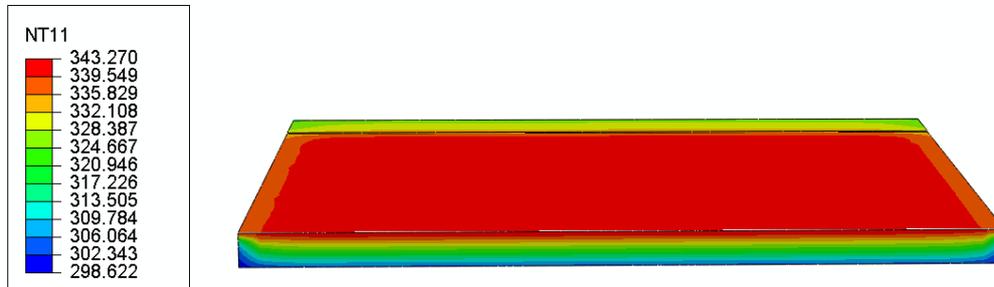


Abbildung 71: Schnitt durch Heizlagen und Kern zeigt die Durchwärmung der Rückseite (Temperaturen in °K)

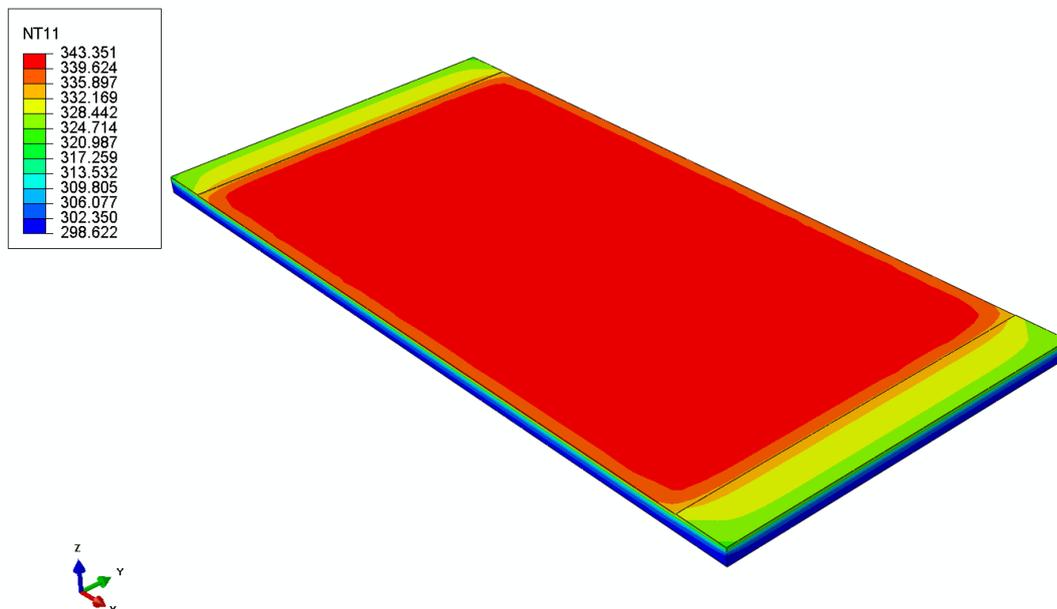


Abbildung 72: Berechnungsergebnis des Rechteck-Feldes mit kälteren Kontaktierungsbereichen (Temperatur in °K)

Augenfällig ist, dass es momentan noch nicht möglich ist die leichte Inhomogenität der Leistungs- und Wärmeverteilung- des Vlieses (verglichen mit einem Gewebe) in der Analyse darzustellen. Qualitativ stimmt aber für ein Rechteck das dargestellte Ergebnis mit der Realität überein.

Bringt man eine gezielte Inhomogenität in das Heizfeld ein, wie etwa eine breite Überlappung von Lagen 45° zum angelegten Potential, ergibt sich eine Inhomogenität in der Heizung.

Diese lässt sich auch in der FE-Analyse als Ergebnis darstellen. Hier stimmt auch das Wärmebild mit dem Model überein. Heiße Bereiche finden sich genau dort wo sie sich auch im Analyse-Bild finden.

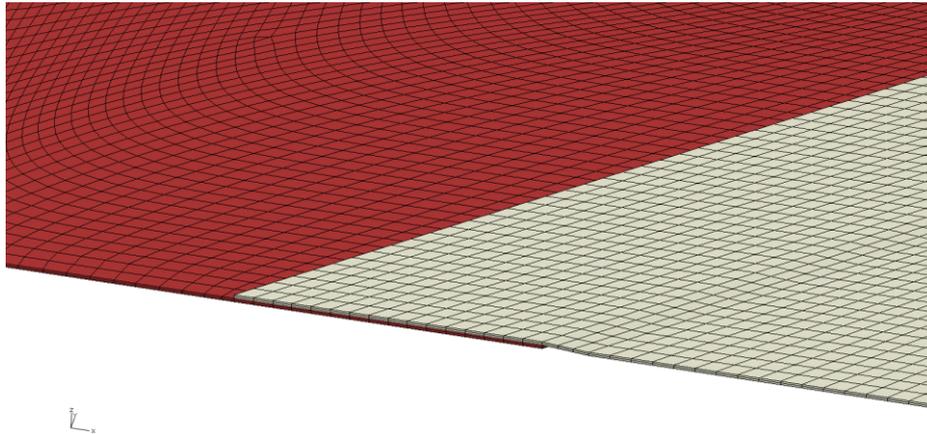


Abbildung 73: 45° Überlappung von Faserlagen im Modell

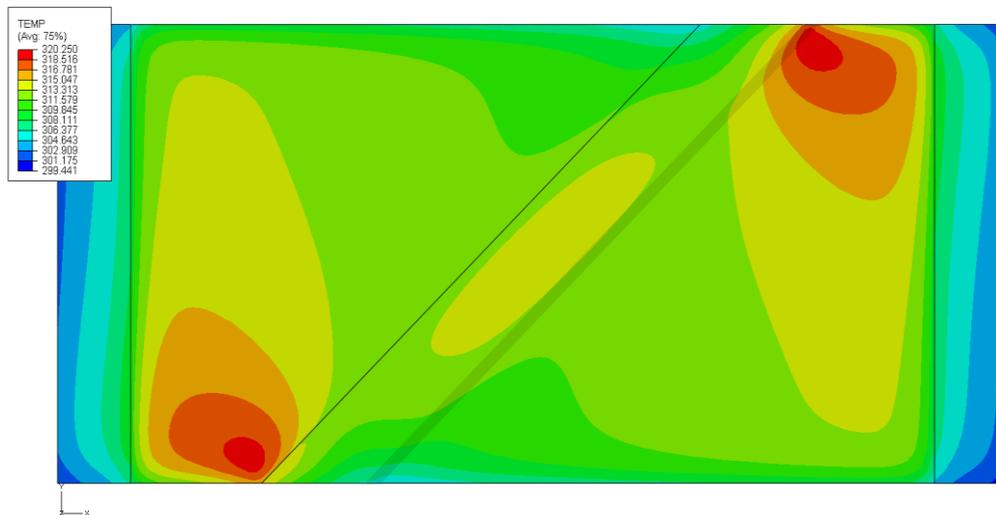
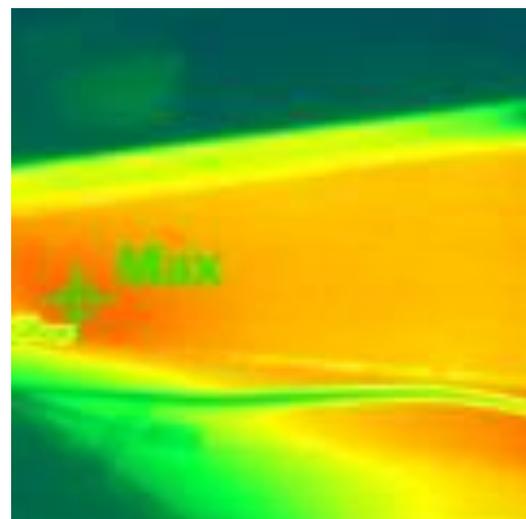
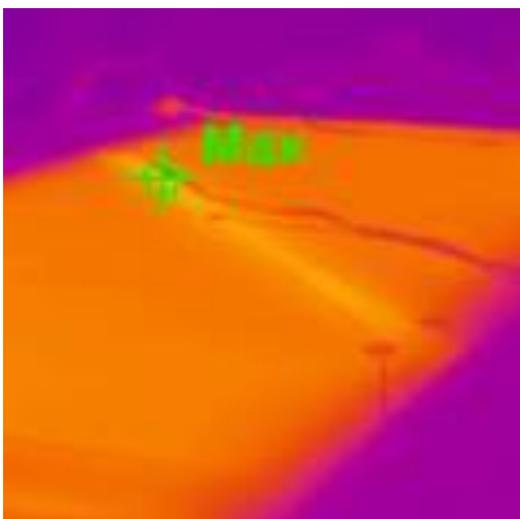


Abbildung 74: Berechnungsergebnis mit deutlicher Inhomogenität in der Temperaturverteilung auf Grund der Überlappung (Temperaturen in °K)



Thermografie Bild 75/76: Wärmere Überlappungsbereich und heiße Zone am Rand zwischen Überlappung und Kontaktierung

AP 6.4: Entwicklung der Bauteilheizung

Auf Basis der Ergebnisse der Couponversuche und unter Berücksichtigung der Anforderungen einer Heizung (s. AP 1.1) bzw. der Integration (s. AP 6.1) hat die fibretech composites GmbH im Folgenden die Bauteilheizung entwickelt. Es ist im Hinblick auf eine spätere Bauteilfamilie die Konstruktion und das dafür zu entwickelnde Berechnungsverfahren festzulegen.

Wie im Zuge des zweiten Projekttreffen am 27.06.2018 in Gera beim Projektpartner Fa. Suchy, vereinbart, wurden durch den Partner Institut für Textiltechnik Augsburg (ITA) weitere recycelte Vliese zur Verfügung gestellt, um die bisherigen Ergebnisse zu verifizieren.

Da sich das hochorientierte C-Faservlies projektbezogen noch in der Entwicklungsphase befindet werden die Muster der unterschiedlichen Produktionsverfahren verglichen um für den geplanten Einsatz die beste Variante zu ermitteln.

In den folgenden Versuchen wird die Homogenität der Wärmeverteilung und die Widerstandskennwerte der getesteten Faserhalbezeuge bestimmt, um zu entscheiden mit welcher der Varianten der aus rezyklierten C-Faservliesen die weiteren Tests durchgeführt werden.

	Bezeichnung und Grammat	Bemerkung
1	C-Faser Leinwandgewebe 200g/m ²	C-Gewebe Leinwand als Vergleichsnorm
2	HO-r-CF Vlies 80g/m ²	100% Pyro-Faser
3	HO-r-CF Vlies 150g/m ²	100% Pyro-Faser
4	HO-r-CF Vlies 175g/m ²	100% Pyro-Faser
5	HO-r-CF Vlies 200g/m ²	100% Pyro-Faser
6	HO-r-CF Vlies 180g/m ² ELG	100% Pyro-Faser ELG
7	HO-r-CF Vlies 450g/m ² ELG	100% Pyro-Faser ELG
8	HO-r-CF Vlies 600g/m ² NXT	100% Pyro-Faser NXT
9	HO-r-CF Vlies 105g/m ² 40%PA	60% recycle C-Faser SGL 40%PA 3.1
10	HO-r-CF Vlies 120g/m ²	100% Pyro-Faser
11	wirrfaser Vlies 30g/m ²	C-Faser
12	wirrfaser Vlies 80g/m ²	C-Faser
13	wirrfaser Vlies 100g/m ²	C-Faser
14	wirrfaser Vlies 150g/m ²	C-Faser

Für systematische Tests unter reproduzierbaren Bedingungen wurde ein einheitlicher Versuchsaufbau zum Test der unterschiedlichen Faservliese entwickelt.



Bild 77: Versuchsaufbau (1,2m x 0,6,m)

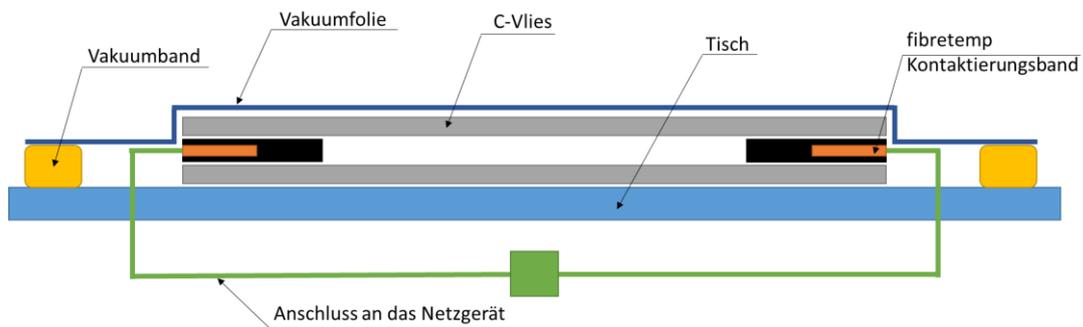


Bild 78: Schematischer Aufbau zum Test der C-Faser Vliese



Bild 79:
Elektrischer Anschluss an das Netzgerät über einen Kupferwinkel der aus dem Vakuumaufbau heraus geführt werden kann. Die Tests erfolgten an trockenen Faserhalbzeugen. Als Referenz für die Gleichmäßigkeit der Wärmeverteilung wurde ein 200g/m² Kohlefaserewebe festgelegt. Die Aufnahmen mit der Wärmebildkamera erfolgten bei 50°C.

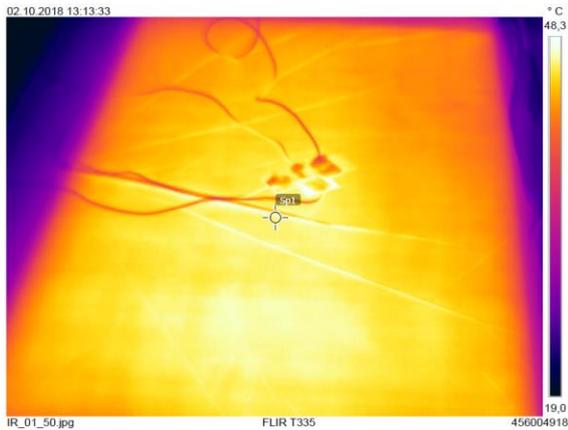


Bild 80:
C-Faser Gewebe 200g/m² als Referenz $\Delta T \pm 2^{\circ}\text{C}$

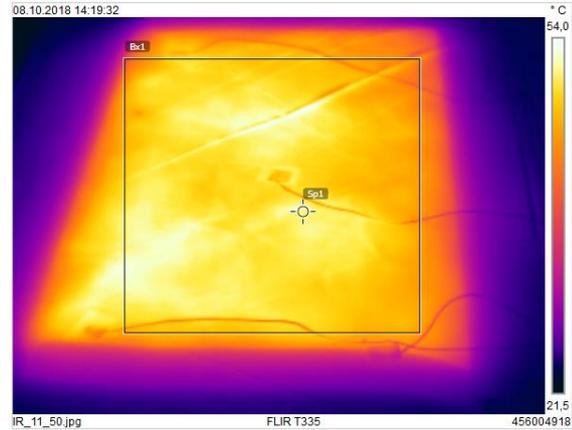


Bild 81:
Wirrfaservlies 30g/m² $\Delta T \pm 3,5^{\circ}\text{C}$



Bild 82 und 83: Primäre Orientierung der Fasern im Vlies

Die Messungen an den Vliesen wurden in Längs und Querrichtung durchgeführt um den Einfluss der Faserorientierung zu ermitteln (Länge der Testmuster jeweils 1200mm).

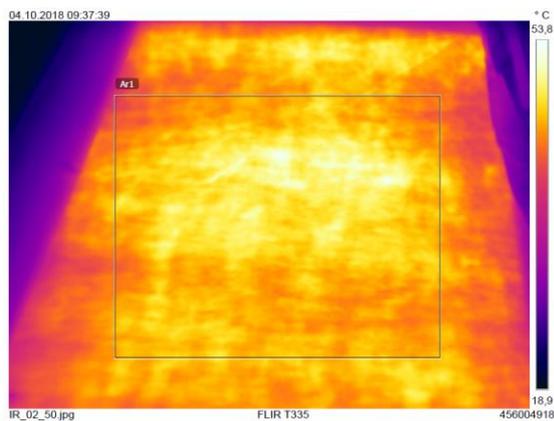


Bild 84: HO-r-CF Vlies 80g/m²
 $\Delta T \pm 4,5^{\circ}\text{C}$

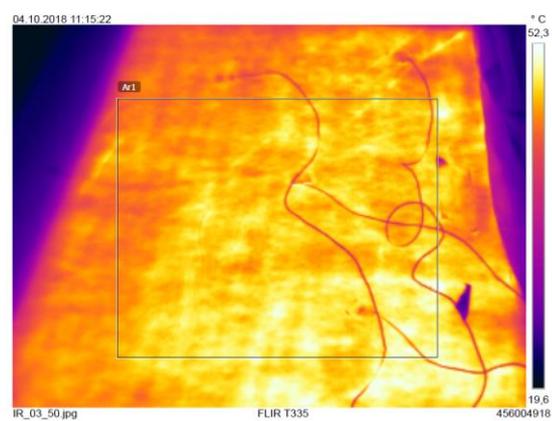


Bild 85: HO-r-CF Vlies 150g/m²
 $\Delta T \pm 3,5^{\circ}\text{C}$

Längs

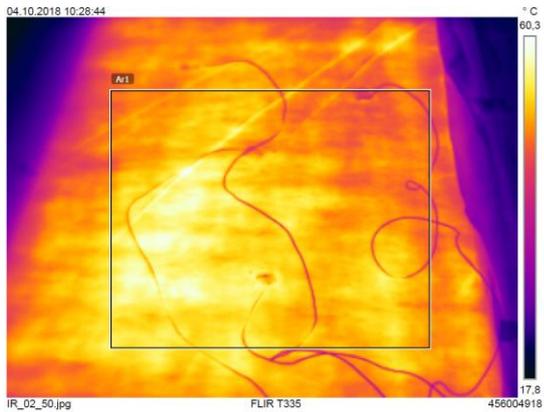


Bild 86: HO-r-CF Vlies 80g/m²

± 5°C

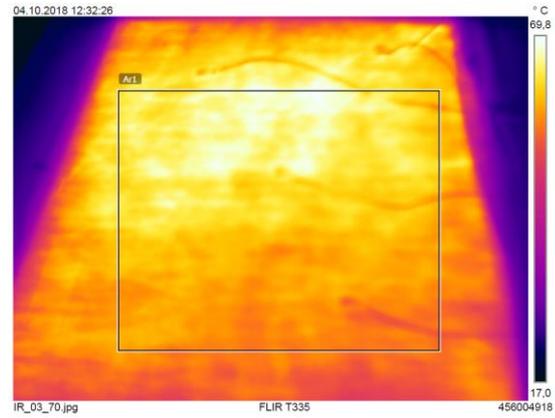


Bild 87: HO-r-CF Vlies 150g/m²

[@ 70°C] ± 5°C

Quer

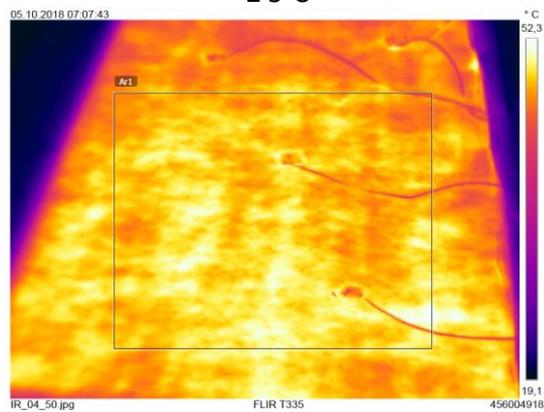


Bild 88: HO-r-CF Vlies 175g/m²

± 3°C

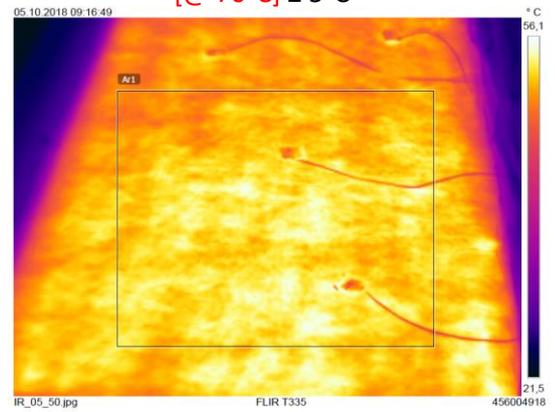


Bild 89: HO-r-CF Vlies 200g/m²

± 4°C

Längs

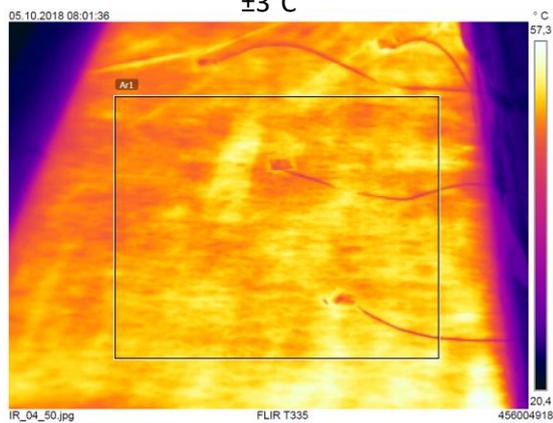


Bild 90: HO-r-CF Vlies 175g/m²

± 3°C

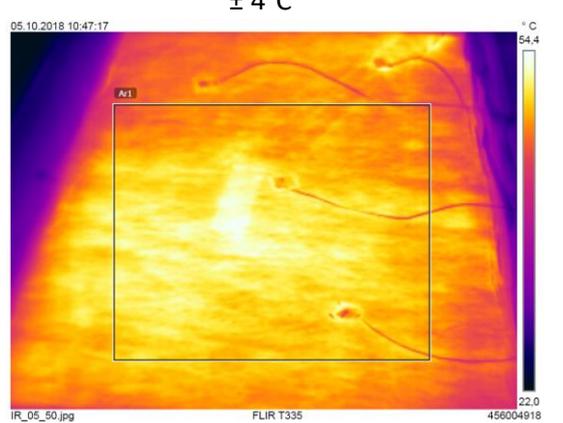


Bild 91: HO-r-CF Vlies 200g/m²

± 3,5°C

Quer

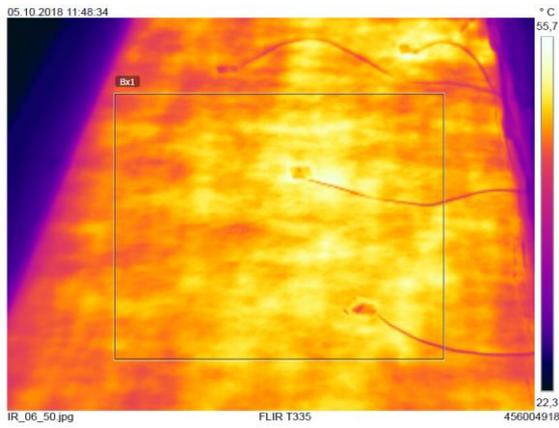


Bild 92: HO-r-CF Vlies 180g/m²

ELG ± 4,5°C

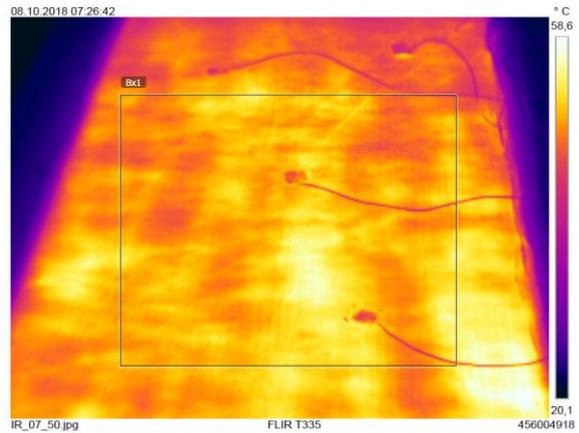


Bild 93: HO-r-CF Vlies 450g/m²

ELG ± 4°C

Längs

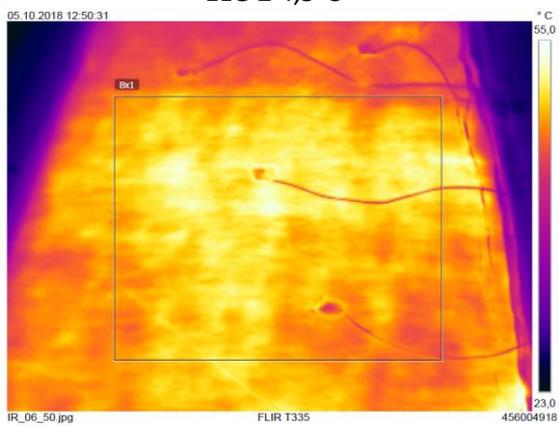


Bild 94: HO-r-CF Vlies 180g/m²

ELG ± 4,5°C

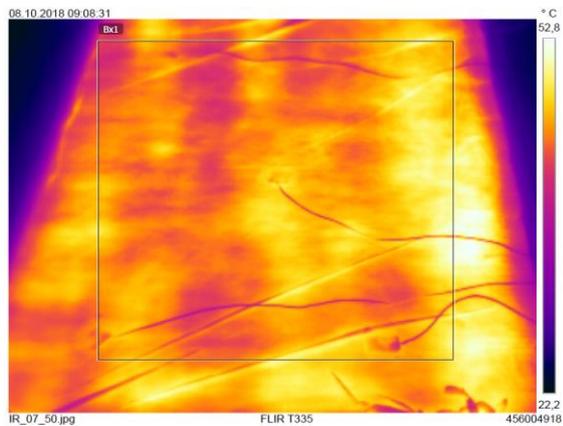


Bild 95: HO-r-CF Vlies 450g/m²

ELG ± 4°C

Quer

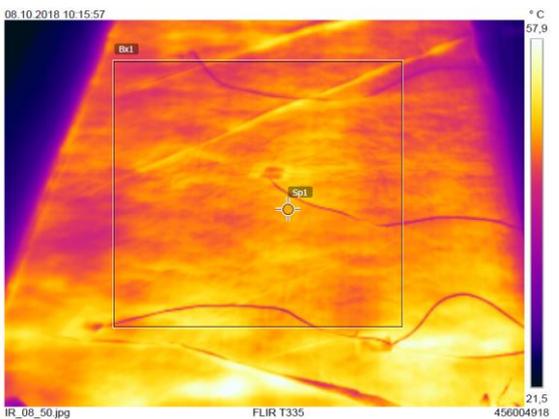


Bild 96: HO-r-CF Vlies 600g/m²

NXT ± 4,5°C

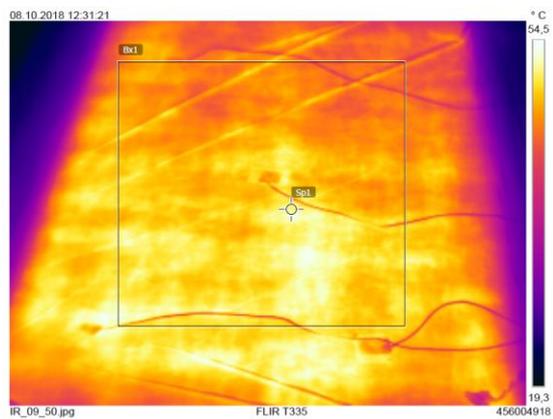


Bild 97: HO-r-CF Vlies 105g/m²

40%PA ± 3,5°C

Längs

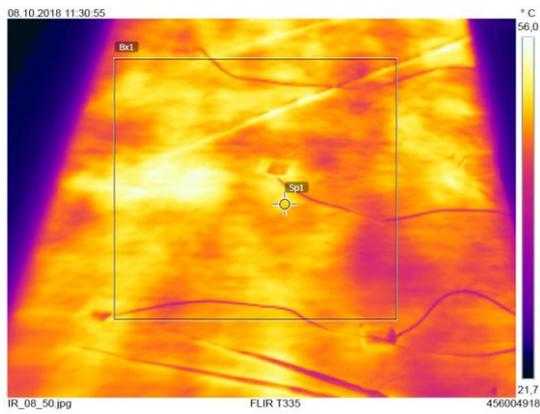
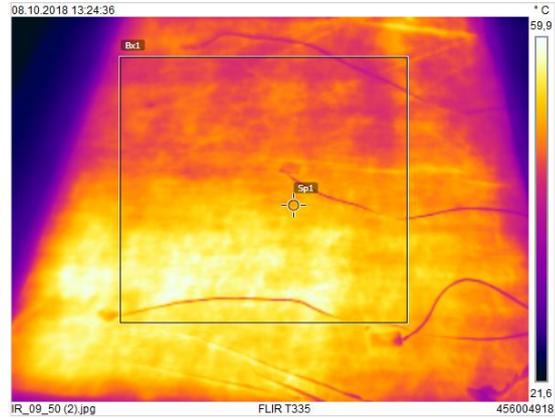


Bild 98: HO-r-CF Vlies 600g/m²
NXT ± 4,5°C



Bil99: HO-r-CF Vlies 105g/m²
40%PA ± 5°C

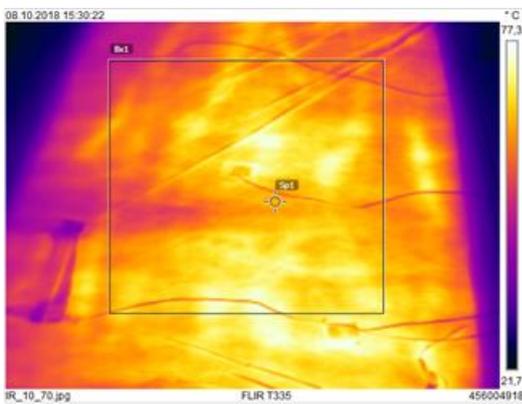


Bild 100: HO-r-CF Vlies 120g/m²
± 10°C Längsrichtung

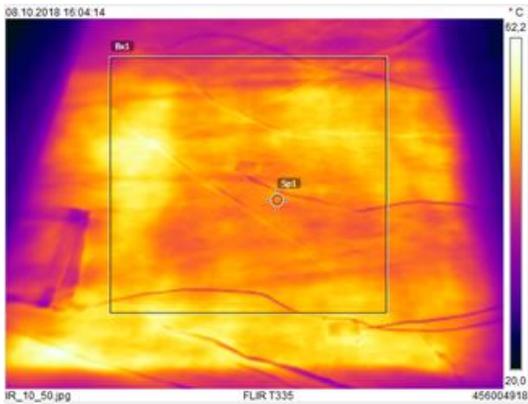
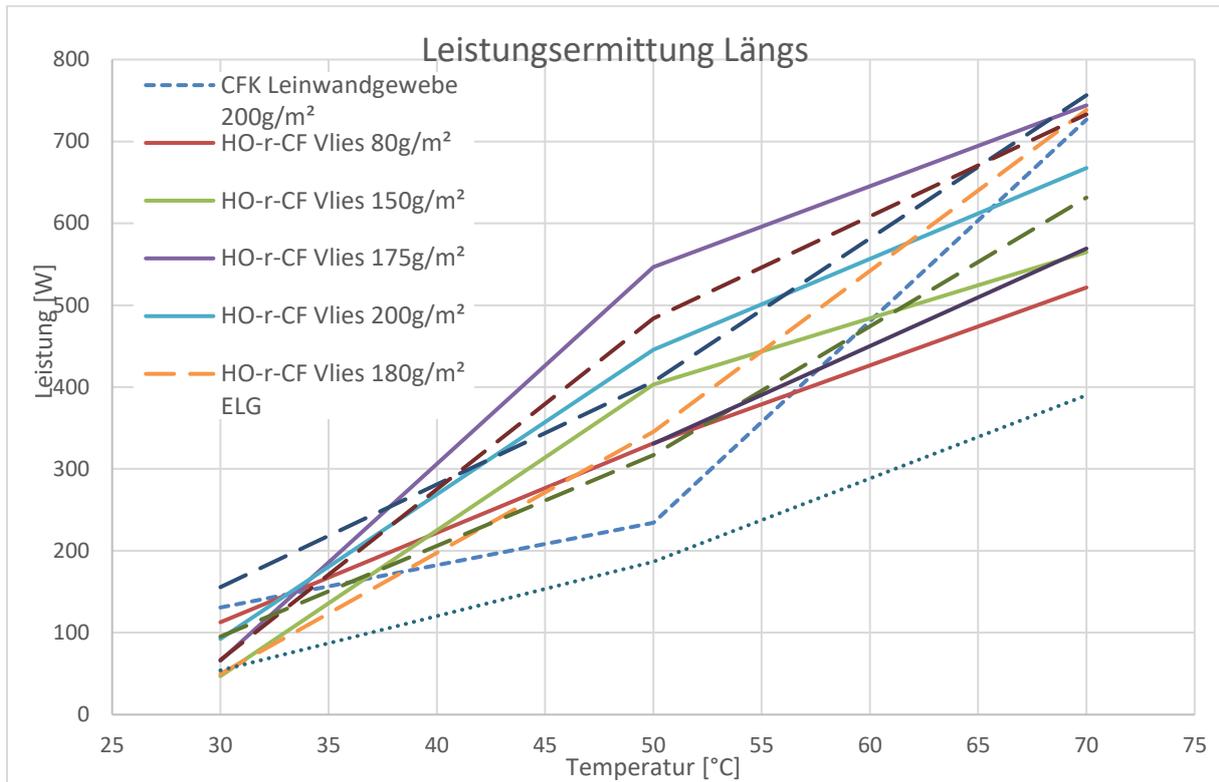
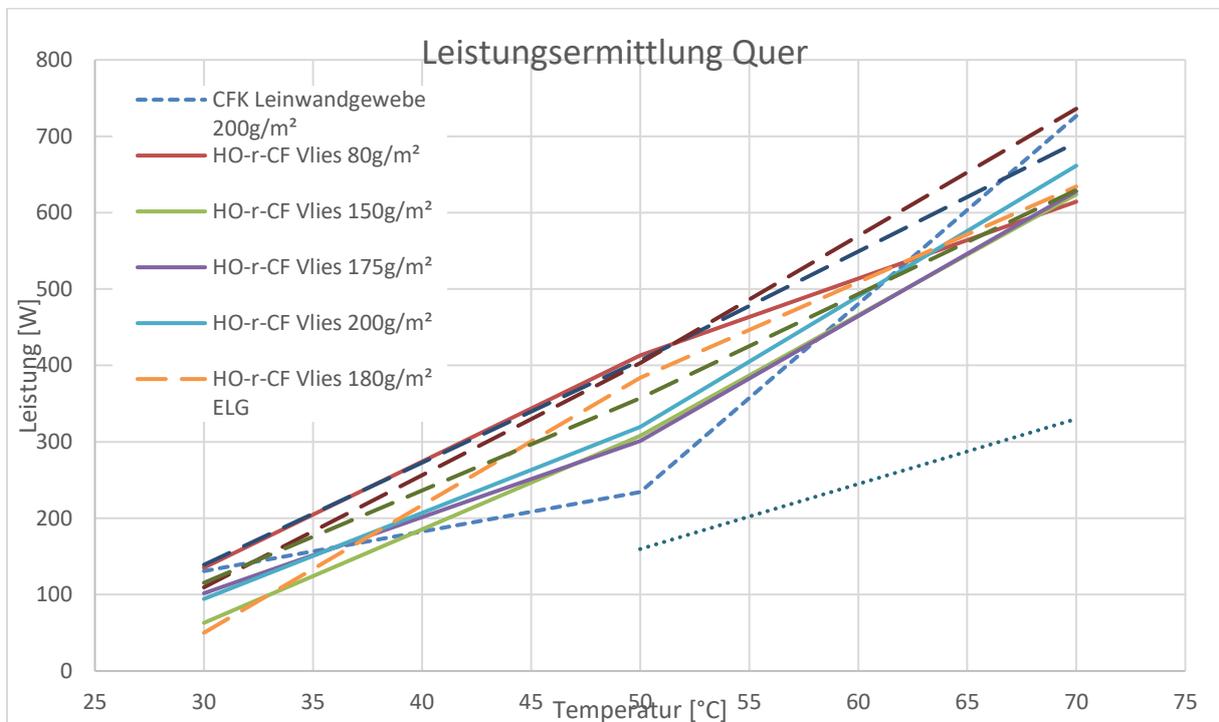


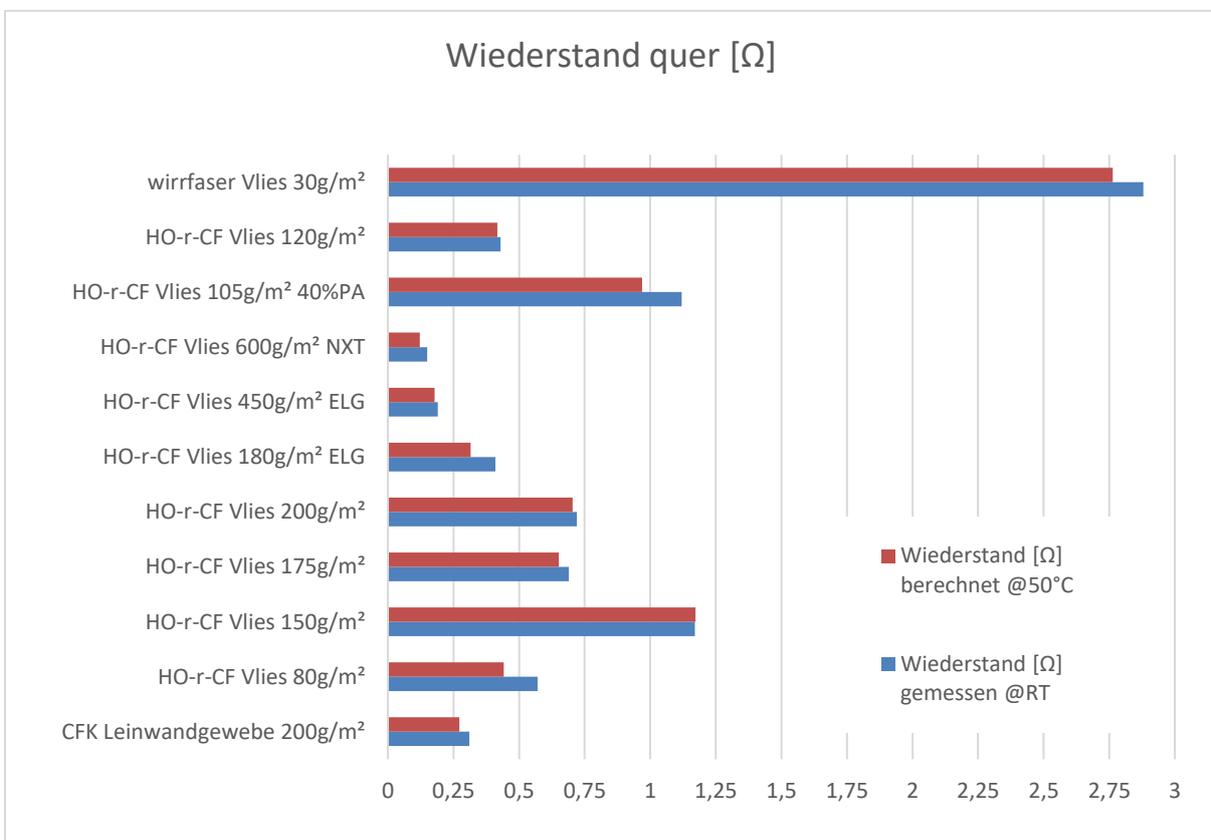
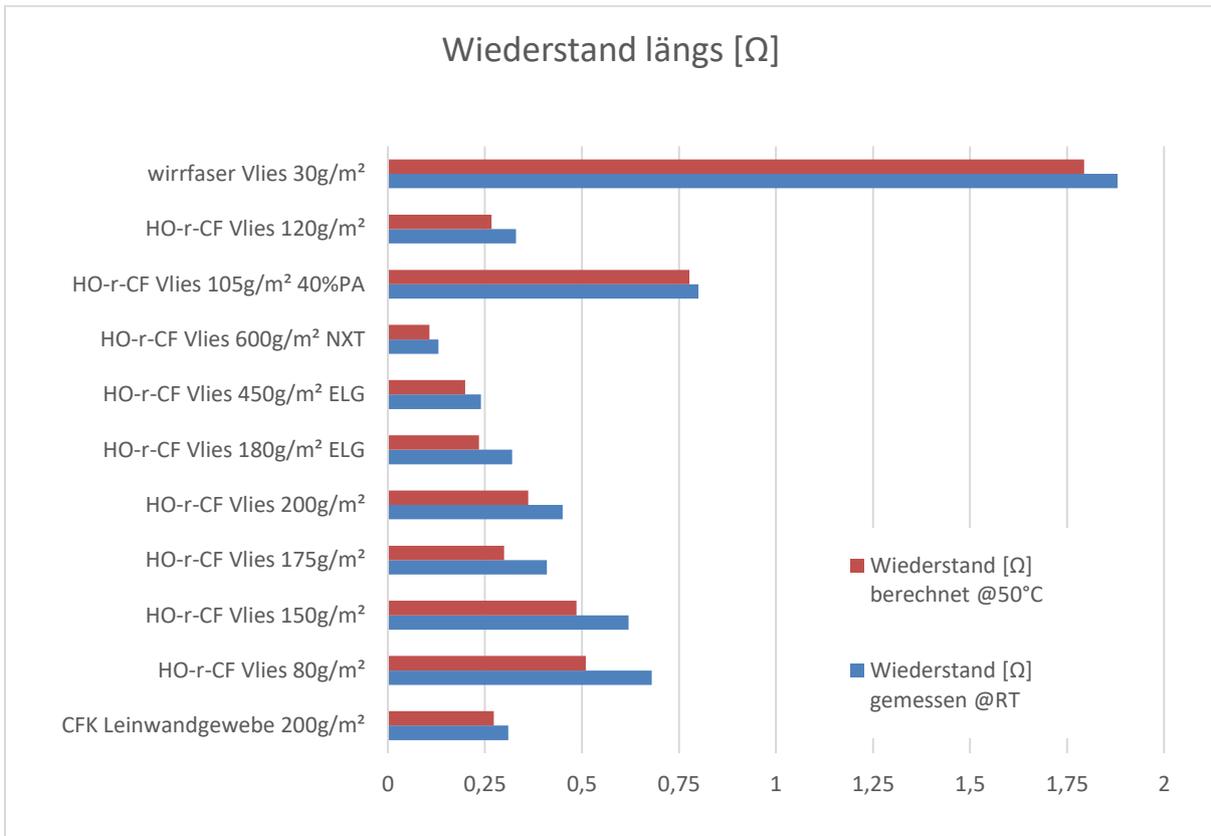
Bild 101: HO-r-CF Vlies 120g/m²
± 5,5°C Querrichtung

Quer



Bilder 102/103: Zusammenhang Leistung und Temperatur





Sämtliche getesteten recyklierten Vliese für den Test waren genadelt. Dieser Arbeitsschritt ist wichtig für den Zusammenhalt der Vlies-Faserhalbzeuge. Das Nadeln führt aber dazu, dass die Orientierung der Fasern in Richtung isotrope Faserverteilung beeinflusst wird. Die Ergebnisse der Heizztests zeigen, dass die Vliese in Längs- und Querrichtung nur geringe Unterschiede aufweisen. Einzig das 120g/m² Vlies zeigt ausgeprägte Unterschiede in der Gleichmäßigkeit der Wärmeentwicklung bezogen auf die Ausrichtung des Halbzeuges. Für einfache Heizaufgaben kommen die getesteten Vliese durchaus in Betracht (Bsp. 175g/m² mit einem ΔT von 3°C).

Es ist davon auszugehen, dass hochorientierte recyklierten Vliese in Faserrichtung bestromt, noch einmal homogenere Wärmeverteilungen aufweisen werden.

Entwicklung der CFK Heizung

Im Zuge des dritten Projekttreffens am 29.05.2019 in Bremen bei fibretech, wurde den Projektpartnern eine erste beheizte Sandwichplatte mit elektrischen Anschlüssen auf der Rückseite vorgestellt.

Die integrierte C-Faser Vliesheizung besteht aus zwei Lagen HO-r-CF Vlies 150g/m² das im pyrolyse Verfahren recykliert wurde. Als elektrische Isolierung der C-Fasserheizung wurde ein 280g/m² Basaltgewebe verwendet. Die rückseitige Deckschicht des Wabensandwich Panels besteht aus zwei Lagen HO-r-CF Vlies 200g/m². Um zu zeigen, dass mit Vlies „geheizt“ wird wurde die Basaltisolation in einem Bereich durch ein 30g/m² Glasvlies ersetzt. Das eingesetzte Harz für diesen ersten Demonstrator ist ein Standard Infusionsharz noch ohne Brandschutzeigenschaften nach FAR.



Abbildung 104:
Wabensandwichplatte mit
Carbonvlies Heizung als erster
Demonstrator mit einem
„Sichtfenster“ auf die C-Faser
Vlies Heizung

Zur elektrischen Kontaktierung der Sandwichpanele wurden die Litzen der fibretemp Kontaktierungsbänder, mit einem Kabelschuh verpresst. Um den festen, aber auch demontierbaren, Anschluss des Heizmoduls zu ermöglichen, wurde er an ein Flachkupfer geschraubt, das über ein zweites, freies Gewinde für den Anschluss der Zuleitung verfügt.



Abbildung 105: Kontaktierungsbereich vor der Tränkung mit Harz

Vor der Infusion des Panels wurde der Anschluss großzügig mit Basaltvlies isoliert, sodass keine freiliegenden Bereiche einen ungewollten Stromfluss ermöglichen. Nachdem das Harz ausgehärtet ist wird der Gewindebereich des Flachkupfers freigelegt und bildet den elektrischen Anschluss des Heizpanels.



Abb.106 : Elektrische Isolation der Kontaktierung mit Basaltvlies vor und nach der Harzinfusion

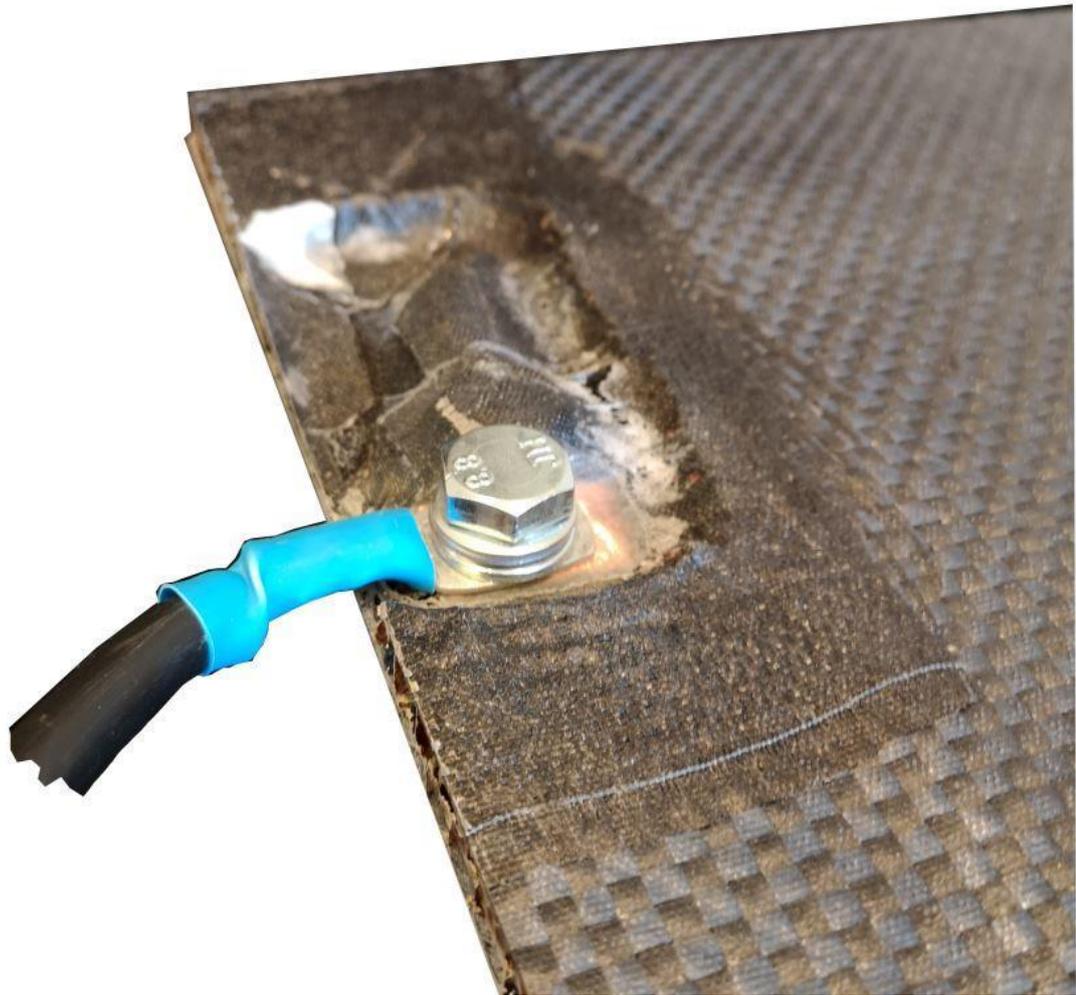


Abbildung 107: Freigelegter rückseitiger elektrischer Anschluss des beheizten Panels

Alternativ zu der Stromversorgung über eine Kabelverbindung, besteht auch die Möglichkeit die Stromeinleitung über eine Schiene vorzunehmen, die in der tragenden Struktur unterhalb des Heizmoduls liegt. Auf diese Art könnte das offene Gewinde zur Kontaktierung, als auch als Befestigung genutzt werden.

Aufgrund der hohen Sicherheitsanforderungen im Flugzeugbau wurden weitere Alternativen betrachtet.

Eine Möglichkeit ist die vollständige Isolierung des Kontaktierungsübergangs durch das Laminat der beheizbaren Deckschicht des Sandwichs. Da das Heizpanel ohnehin von einem Rahmen umschlossen wird, kann der Raum genutzt werden um die gesamte Kontaktierung inklusive der anfänglichen Anschlusskabelisolation in das Laminat zu integrieren. Durch dieses Vorgehen werden alle leitenden Bereiche im Kontaktierungsübergang durch das Laminat isoliert. Die Kabelführung kann durch den Wabenkern erfolgen. Das Heizmodul würde auf diese Weise mit zwei Kabeln konfektioniert, die inklusive der Isolierung im Panel verschwinden. Der Anschluss an die Bordelektrik kann mit dem in der Luftfahrt bewährten Crimpverfahren erfolgen.

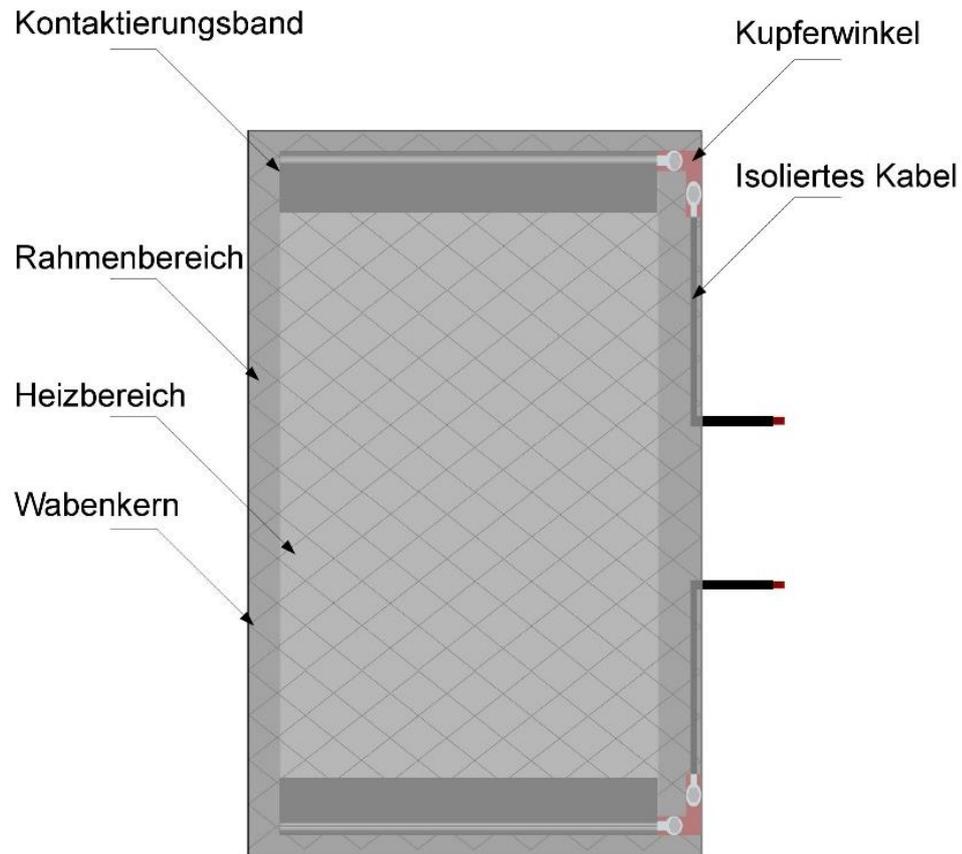


Abbildung 108: Schematische Darstellung einer alternativen Kontaktierung

Falls es erforderlich wird, kann das Panel auch mit einem Steckanschluss ausgerüstet werden. Der Stecker muss bei einer Bordspannung von 28 Volt etwa 80 Ampere übertragen, damit die erforderliche Leistung von ca. 2 KW erreicht wird. Der vom VDE empfohlene Kabelquerschnitt beträgt dabei 16 mm². Eine hierzu passende Steckverbindung ist in 11 gezeigt. Diese Steckverbinder sind für den Bereich der E-Mobility entwickelt worden und passen zum Anforderungsprofil.



Abbildung 109: Passende Steckverbinder für das beheizte Sandwichpanel

Quelle:

<https://www.te.com/deu-de/products/connectors/automotive-connectors/intersection/amp-high-current-connector-system-hvp-800.html?tab=pgp-story>

Je nach Anschlussanforderungen kann der Stecker als 90 Grad Variante auf der Unterseite des Panels angebracht werden, oder als 180 Grad Variante direkt an die bestehenden Kabel gesteckt werden. Die Verbindung ist über einen Riegel sicherbar und zusätzlich nach Schutzklasse IP67 vor dem Eindringen von Staub und Flüssigkeiten abgedichtet.

Eine weitere konstruktive Aufgabe ist die bauteisseitige Ausführung der elektrischen Anschlüsse der beheizten Interieur Bauteile. Im Projektverlauf wurde eine Konstruktions-Studie über mögliche Ausführungen der elektrischen Kontaktierung erstellt.

Rahmenparameter:

- Möglichst wenig Teile
- Trennbarer Kabelanschluss
- Möglichst passend für alle Heizfeldauslegungen, max. 2 Varianten
- Kupfer oder Molybdän-Massebänder
- Standsicher
- Abdichtung für Vakuumsack möglich
- Eindringen von möglichst wenig Harz
- Einfache Bedienung
- Einsetzbar für normale Betriebstemperaturen und ggf. Hochtemperatur
- Günstig in der Herstellung

Konzept 1

- Abgewandelter Stecker mit Crimpanschluss für 70mm²Cu.
- Fuß aus zu späterer Matrix passendem kurzfaserverstärkten Harz.
- Seiten schräg geformt, um Fasern besser drapieren zu können
- Kontakt wird nach Krimpen in Fuß eingeklickt.
- Bereich für Abdichtung des Vakuumsackes
- Kabel mit Crimp-Buchse wird hinterher verbunden



Abb. 110: Konzept 01

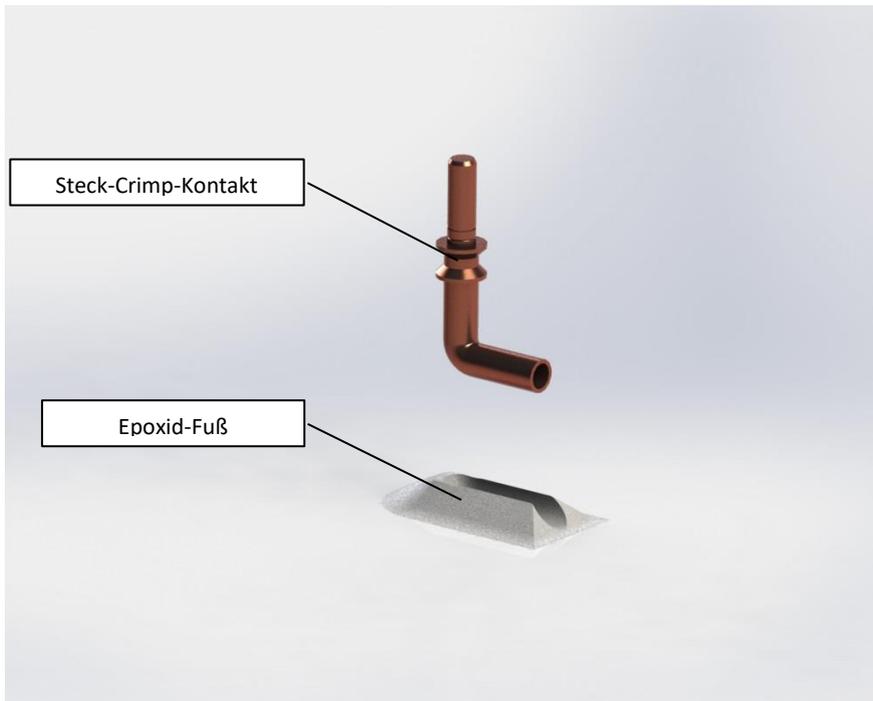


Abb.111 : Konzept 1 Teile

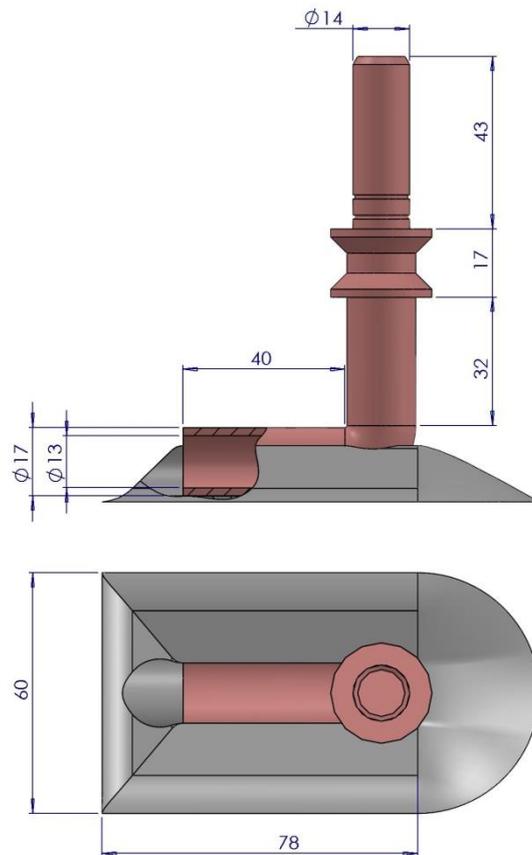


Abb. 112: Konzept 1 Maße

Konzept 2

- Klemme analog Kabelklemme
- Steck-Kontakt mit Schraube als gleichzeitige Befestigung
- Untere Aufnahme mit seitlicher Führung
- Deckelplatte
- Kontaktierungsband wird eingelegt und Zwischen Unterer Aufnahme und Deckel Verschraubt
- Festes Anzugmoment muss bestimmt werden
- Möglichkeit zum Klappen denkbar



Abb. 113: Konzept 2

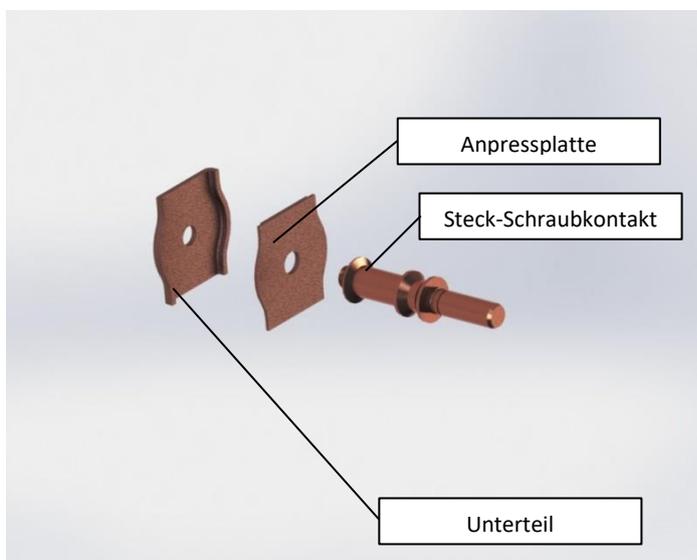


Abb.114: Konzept 2 Teile

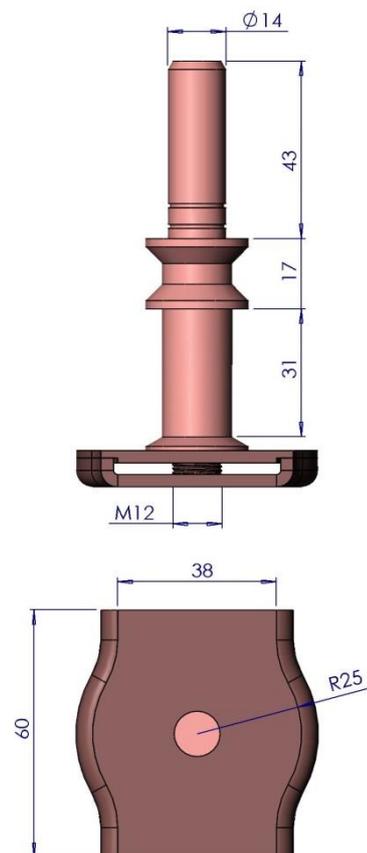


Abb.115 : Konzept 2 Maße

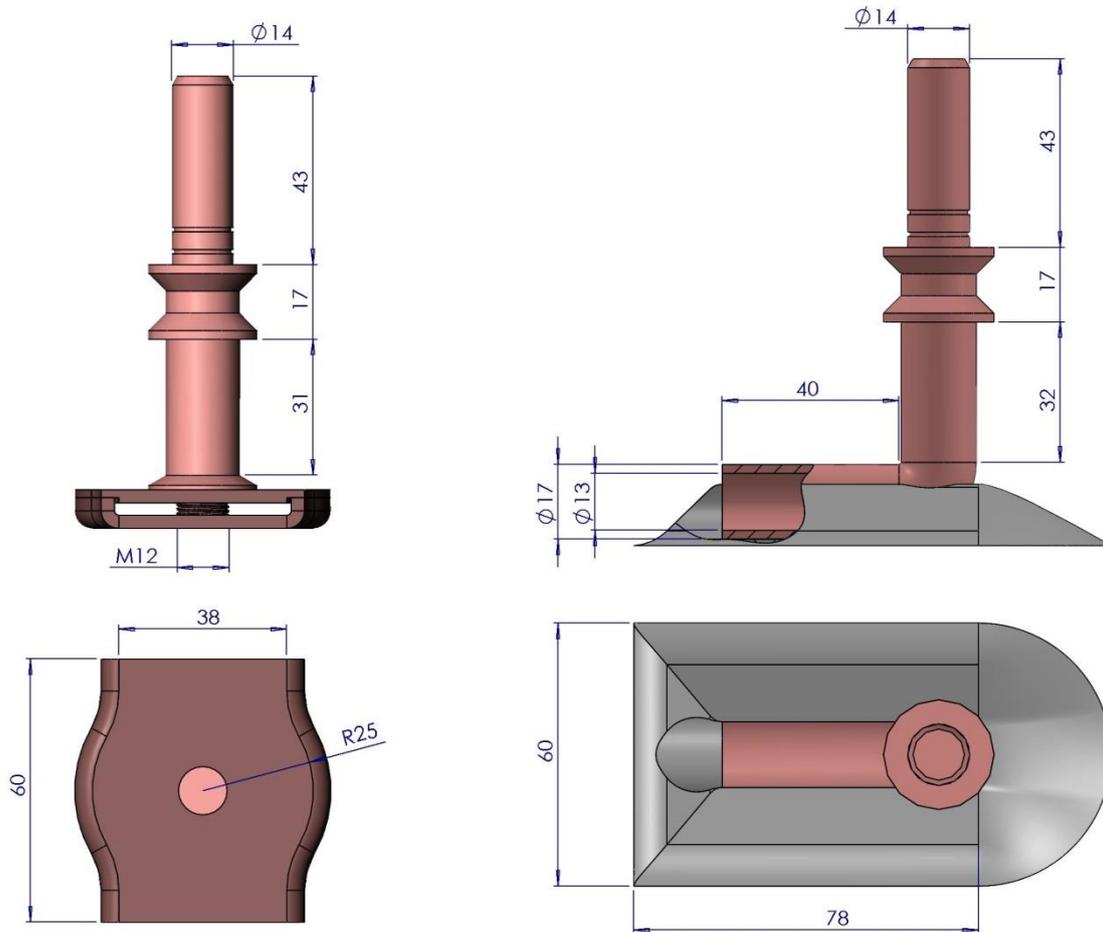


Abb. 116: Konzeptvergleich

Beide entwickelten Systeme berücksichtigen die Notwendigkeiten die sich aus der Verwendung der Kontaktierungsbänder zur Stromeinleitung in die C-Faser Vliese ergeben. Leichte Vorteile ergeben sich für das Konzept 2 auf Grund der Möglichkeit die flache Kupferlitze des Kontaktierungsbandes direkt zu Verpressen ohne sie in ein Rundrohr zum Krimpen zu überführen.

AP 6.5: Herstellung eines integrierbaren Heizungsmoduls

Fibretech Composites wird Funktionsmuster herstellen, um die Konstruktionen im Experiment untersuchen zu können und die vorhergesagten Eigenschaften nachzuweisen bzw. eine Optimierung vorzunehmen. Die Ergebnisse werden intensiv mit dem Partner 3D Icom und den Vliesstoffherzeugern diskutiert, um weiteres Optimierungspotential zu erkennen.

Für das AP 6.5 wurden Heizungskits auf Basis der recyklierten C-Faservliese hergestellt und getestet. Im Projektverlauf haben sich zwei Fertigungsverfahren zur Herstellung der Interieur Bauteile qualifiziert. Der Projektpartner 3D ICOM verarbeitet die Vliese im Pressverfahren und fibretech stellt die Decklagen der Sandwichstrukturen im Vakuuminfusionsverfahren her. Bei beiden Verfahren ist die Integration eines Widerstandsheizelementes möglich.

Um das Einbringen der C-Faser Heizung im Produktionsprozess zu erleichtern, ist es Vorteilhaft wenn das Heizelement als vorkonfektioniertes „Kit“ vorliegt.

Im Projektzeitraumzeitraum hat der Partner fibretech eine Methodik zur Herstellung der vorkonfektionierten Heizelemente auf Basis der C-Faser Vliese entwickelt.

Hierbei wurde berücksichtigt, dass eine elektrisch isolierende Schicht zu den weiteren C-Vlies Lagen erforderlich ist. Weitere Herausforderung der Entwicklung ist die nähtechnische Verarbeitung der Vliesstoffe, die Auswahl und Erprobung der Nähgarne, sowie die Drapierbarkeit des vernähten Halbzeuges.

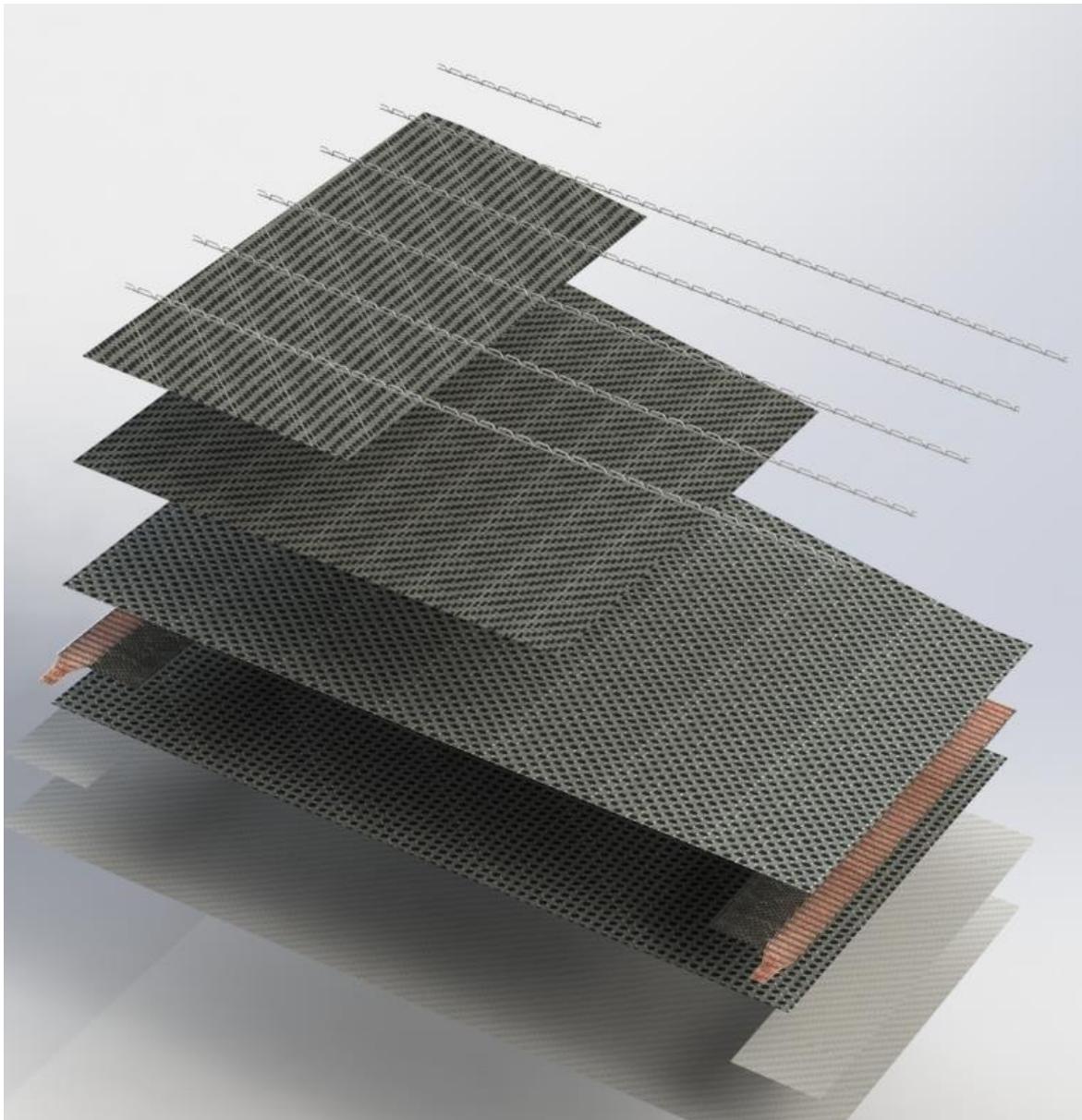


Abbildung 117: Explosionszeichnung eines Heizungskits bestehend aus dem C-Faservlies, Kontaktierung Isolation und Nähgarne.

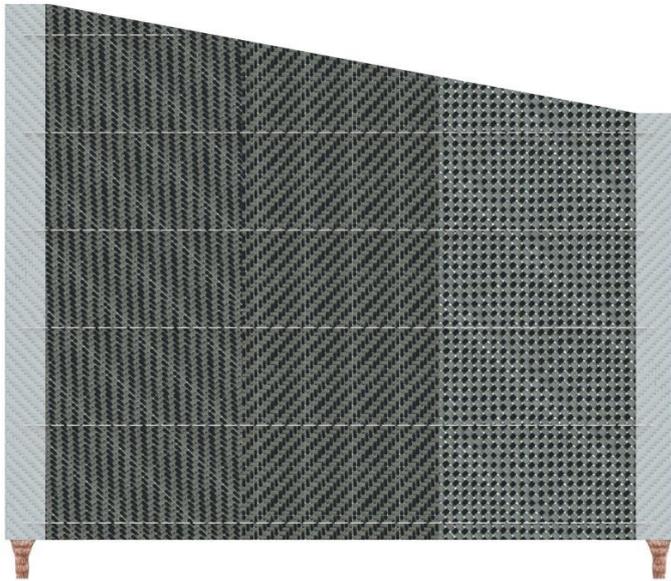


Abbildung 118:
Vernähtes Heizungskit mit Verstärkungen im Kontaktierungsbereich

Die integrierte C-Faser Vliesheizung des Test Aufbaus besteht aus zwei Lagen HO-r-CF Vlies 175g/m² das im pyrolyse Verfahren recyclet wurde. Als elektrische Isolierung der C-Faserheizung wurde ein 280g/m² Basaltgewebe verwendet.

Zur Veranschaulichung des Aufbaus der Kits, wurde exemplarisch eine Bilderserie erstellt.



Abbildung119: Ausgangspunkt ist ein Basaltgewebe das mit Zugabe zugeschnitten wird

Das Basaltgewebe dient beim späteren Einsatz als elektrische Isolation zu den Verstärkungslagen aus C-Faser Vlies.

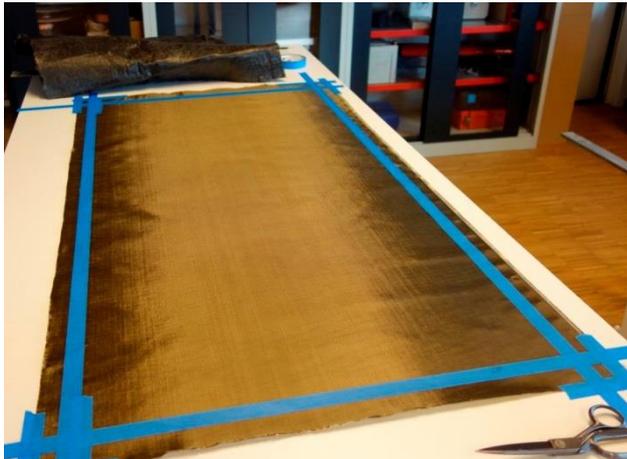


Abbildung 120:
Markierung der
geplanten Heizfeldgröße.



Abbildung 121: Ablage der ersten Heizlage C-Faser Vlies und temporäre Fixierung mit Sprühkleber.

Die Bestandteile des verwendeten Sprühklebers sind Epoxidharz-kompatibel und haben keinen negativen Einfluss auf die mechanischen Kennwerte des Laminates.

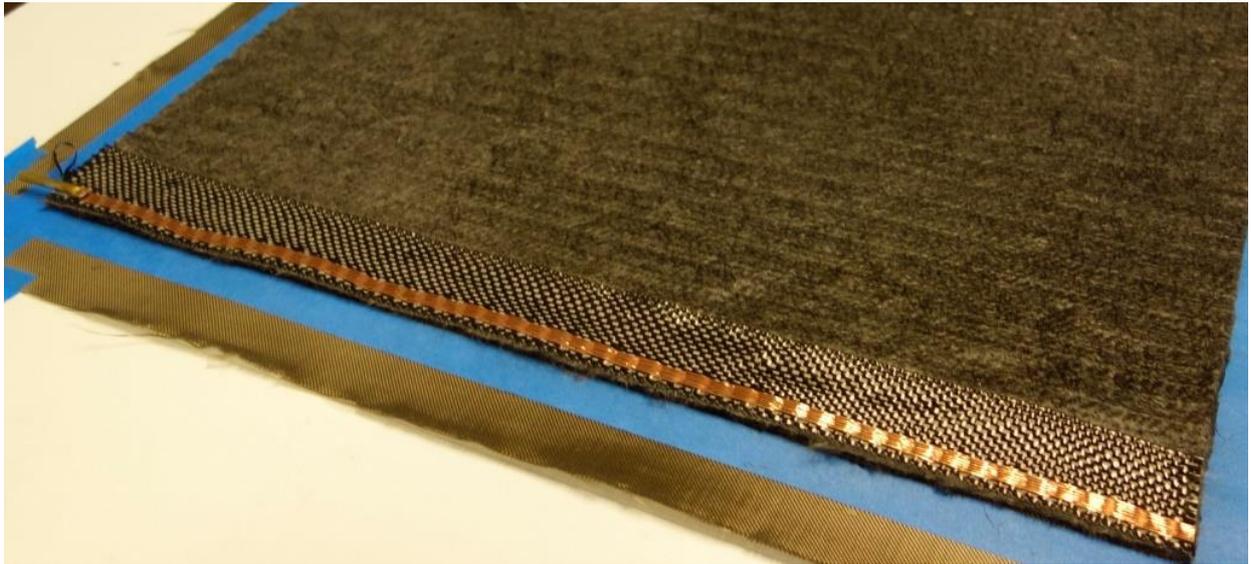


Abbildung 122: Positionierung der Kontaktierungsbänder an den Stirnseiten des Heizfeldes.

Das Hybrid Gewebe aus Kupfer und Kohlefaser wird benötigt um den elektrischen Strom in das Vlies einzuleiten.

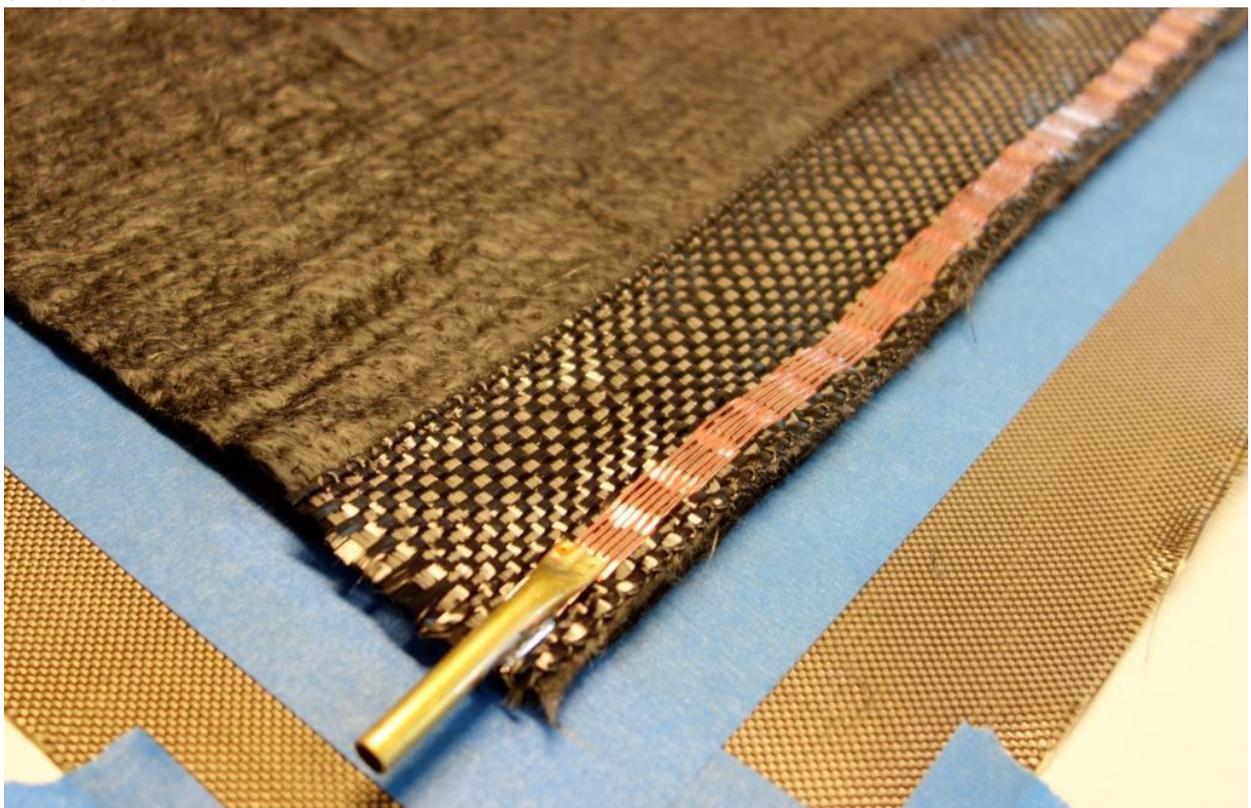


Abbildung 123: Ein Messingrohr zur späteren Kontaktierung des Kits wird aufgelötet.



Die Ausführung des elektrischen Anschlusses als Messingrohr hat den Vorteil, dass nach dem Besäumen des späteren Bauteils eine Buchse entsteht, in die ein einfacher 5mm Bündelstecker zur Kontaktierung eingesteckt werden kann.



Abbildung 124: Beispiel für den elektrischen Anschluss als Buchse nach dem Besäumen.

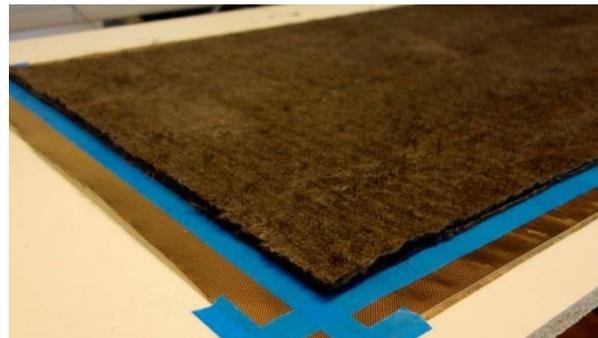


Abbildung 125: Ablage der zweiten Heizlage C-Faser Vlies und temporäre Fixierung mit Sprühkleber

Im Nachgang werden die blauen Klebestreifen entfernt und die Überstände des Basaltgewebes über die Vlies Heizung geklappt. Die Gewebe- Aufdopplung erfüllt neben der elektrischen Isolation auch die Aufgabe die Güte der Vernähung zu verbessern. Die beiden Vlieslagen ohne Gewebeverstärkung zu vernähen führt zu keinen guten Ergebnissen, da die Vliesstoffe zu „offen“ gewirkt sind.



Abbildung 126: Heizungskit vorbereitet für das Vernähen.

Das Vernähen der Kits erfolgt auf einer Industrienähmaschine. Durch das Vernähen entsteht eine Vorspannung im Kontaktierungsbereich der Hezelemente. Kontaktierungsband und Vlies Lagen werden durch die Kreuzstichnaht zusammen gepresst, so dass das Heizfeld auch ohne Vakuumaufbau getestet werden kann.

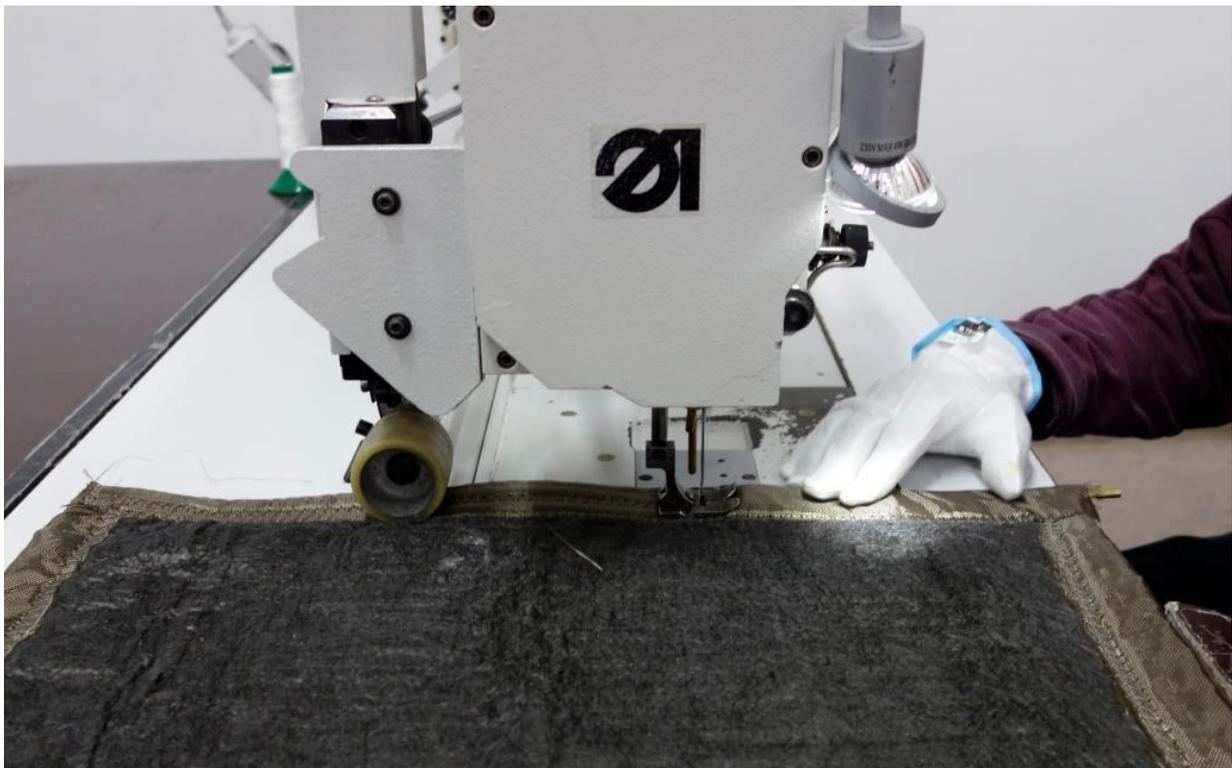


Abbildung 127/128: Vernähen des Heizungskits im Bereich der Kontaktierung.

Durch Vorversuche erfolgte die Auswahl eines geeigneten Nähfadens. Ein Standard- Baumwollzwirn ist nur bis ca. 90 °C mechanisch stabil. Versuche mit einem Aramidfaden, der einen negativen Wärmeausdehnungskoeffizienten aufweist, waren nicht erfolgreich. Die Überlegung, dass ein unter Wärmeeinwirkung sich verkürzender Faden die Vorspannung in der Naht erhöhen, und auf diese Art die Heiz-Vliese stärker verpressen würde, hat sich nicht bestätigt.

Die Versuche haben gezeigt, dass der Nähfaden idealer Weise die gleiche Wärmeausdehnung aufweisen sollte wie die ausgehärtete Kunststoff-Matrix, in die die Fasern eingebettet werden. Die Wahl fiel auf einen Nähfaden aus Peek.

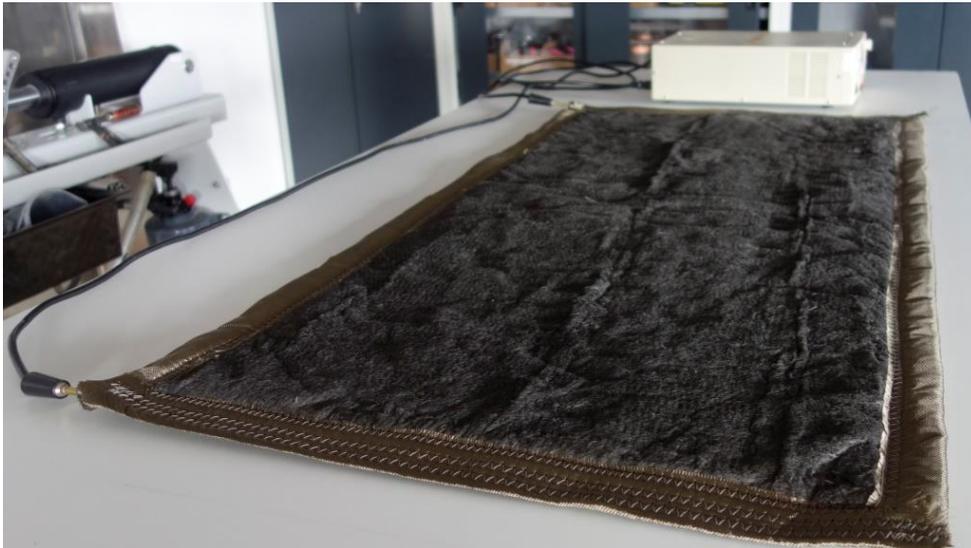
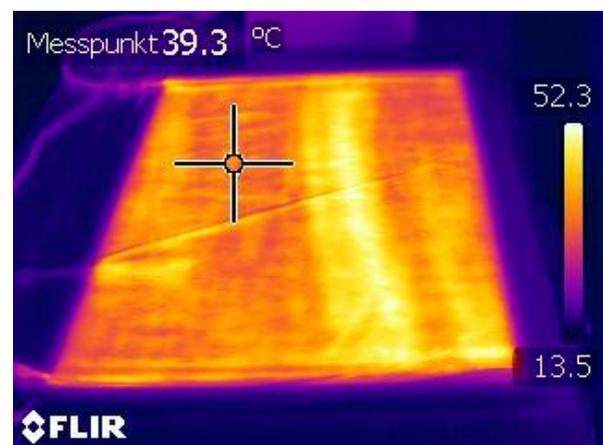


Abbildung 129: Fertig gestelltes Heizungskit beim Funktionstest ohne Vakuumdruck.



Abbildung 130: Heizungskit im Testaufbau mit Vakuumaufbau



Abbildungen 131/132: Funktionstest des Hezelementes ohne und mit zusätzlichem Vakuumdruck.

AP 6.6: Herstellung Demonstratorbauteile

Ziel des AP 6.6 ist die Erzeugung der Demonstratorbauteile. Das Interieurbauteil (unbeheizt und für die Heizungsintegration präpariert) wird von 3D Icom erzeugt; das Heizungsmodul (stand-alone und integriert im Interieurbauteil) durch Fibretech Composites. Bei der Herstellung der Demonstratorbauteile soll nach Möglichkeit auf bestehende und ggf. zu modifizierte Werkzeugformen zurückgegriffen werden, um Kosten zu sparen.

Auf Basis des in AP 6.5 erstellten Heizungskits wurde ein beheizbares Bodenpanel in Sandwichbauweise mit einem Nomex Wabenkern als Kernwerkstoff hergestellt.

Die guten Ergebnisse die das getestete 0,5mm starke Kraibon Elastomer im Hinblick auf die Verschleißfestigkeit und Brandeigenschaften erzielt hat, führten zu der Entscheidung, die Hälfte des Demonstrators mit dem Material als Oberfläche auszustatten.



Bild 133: Fußbodenpanel aus recycelten C-Faservliesen; oberhalb der Lichtleiste mit Kraibon Elastomer ausgerüstet

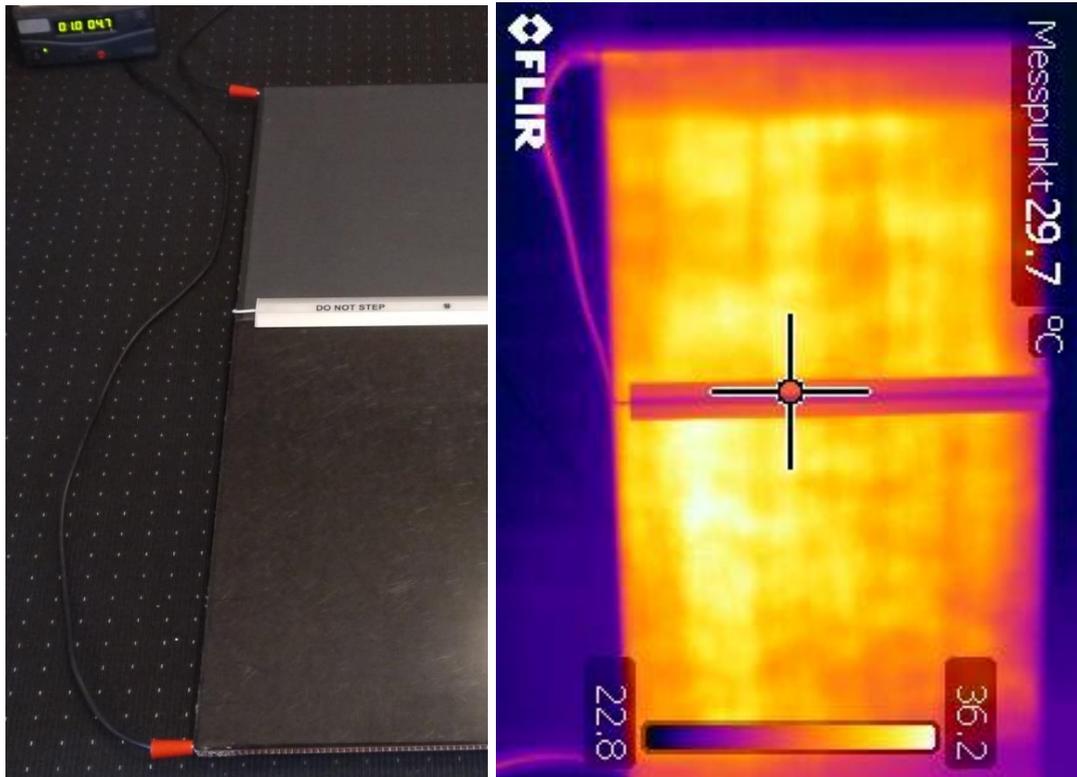


Bild 134: Heizungstest des Demonstrators

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 Interieurbauteil auf Basis von C-Faser Vliesen herzustellen.

Im Vorhaben ist dies nicht nur erfolgreich umgesetzt worden, es wurden auch Erkenntnisse über die Grenzen der mit C Faser Vliesen umsetzbaren Flächenheizungen erlangt.

Im Hinblick auf die im Antrag zum Vorhaben beschriebenen und unter Kap. 1 wiederholten Forderungen nach umweltfreundlichen, sicheren, nachhaltigen, leistungsfähigen und effizienten Lufttransportsystemen in der Zukunft der Luftfahrt in Deutschland sind die erlangten Erkenntnisse von hoher Bedeutung.

Im Projekt wurden hierfür wie unter 2.2 beschrieben von Coupontests über ein erstes beheizbares Panel hin zu einem Demonstrator alle Entwicklungs- und Bauschritte umgesetzt. Der Aufwand der dafür betrieben wurde, erscheint angesichts der erreichten Ziele nach unserer Einschätzung mehr als gerechtfertigt.

2.3.2 Bewertung und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Aus den Beschriebenen Arbeiten innerhalb des Projektes sind konkrete Ergebnisse für die Produktion von Interieur Bauteilen aus recyklierten Carbon Faser- Vliesen gefunden worden. Sie betreffen die Bauteile selbst, als auch die Integration von flächigen Widerstandsheizungen aus C-Faser Vliesen.

Für die Interieur Bauteile ergaben sich:

- Ein geeignetes Infusionsharzsystem mit integriertem Flammenschutz.
- Eine einfach herzustellende aber sehr homogene und verschleißfeste Oberfläche aus Elastomer.
- Ein Berechnungsprogramm zur elektrischen Auslegung von C-Faser Vlies Heizungen.
- Lösungen für die Einleitung von elektrischen Leistungen in die C-Faser Vliese und ein Konzept für elektrische Anschlüsse.
- Ein Verfahren zur Produktion von C-Faser Heizungskits inklusive einer einseitigen elektrischen Isolation

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 auf Basis von C-Faser Vliesen.
- Lösungen für Oberflächenmaterialien.
- Konzepte und Lösungen für die Herstellung von geometrietreuen und verschleißfesten Faserverbund Oberflächen.
- Optimierungen im Bereich der Herstellung von Heizungs Kits für unsere Kunden.
- Möglichkeiten zur Einbindung von C-Faser Heizungen in Bauteile (bisher nur Formenwerkzeuge).

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
- Interieur Bauteile mit integrierter Flächenheizung und verbessertem Impactverhalten.
- Erweitern des Portfolios für andere Industriebereiche (Automotive)

2.3.3 Relevante Ergebnisse Dritter

Relevante Ergebnisse Dritter im bearbeiteten Forschungsbereich sind uns weder im Projektzeitraum noch danach zur Kenntnis gelangt. Im Projektverlauf gab es branchenweit Ansätze und Berichte zum Faser Recycling. Im Bereich der hochorientierten C-Faser Vliese sind keine nennenswerten Fortschritte von dritter Seite bekannt geworden.

2.3.4 Veröffentlichungen und Vorträge

Vorträge erfolgten von Seiten fibretech bis zu diesem Zeitpunkt nur innerhalb des Projekt Konsortiums. In den vergangenen 18 Monaten fanden keine Messen und Kongresse als Präsenz- Veranstaltungen statt.

3 Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
AKL	Autoklav(en)
AP	Arbeitspaket
CFK	Kohlenstofffaser verstärkter Kunststoff
FuE	Forschung und Entwicklung
FVK	Faserverbundkunststoff
EP	Epoxid
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 <p style="text-align: center;">CaroLin Entwicklung und Auslegung einer integrierten Heizung in einer Struktur aus recykliertem Carbonfibervlies für Interieur</p>	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Kantelberg, Michael Brandes, Jens	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2020 6. Veröffentlichungsdatum 27.06.2021 7. Form der Publikation digital
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) fibretech compsotes GmbH Am Lesumdeich 2 28719 Bremen	9. Ber. Nr. Durchführende Institution - 10. Förderkennzeichen 20Q1704A 11. Seitenzahl 66+2
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. Literaturangaben 2 14. Tabellen 7 15. Abbildungen 133
16. Zusätzliche Angaben -	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) -	
18. Kurzfassung <p>Im Vorhaben CaroLin werden Produktionsreste des wertvollen Werkstoffs Kohlenstofffaser zu einem homogenen hochorientierten Carbonvlies (HO-rCF-Vlies) aufbereitet, um dieses dann für die Herstellung von Flugzeug- Interieur Bauteilen zu verwenden.</p> <p>Die elektrisch leitfähigen Kohlenstofffasern werden in diesem Projekt als Widerstandsheizelement für Interieur-Oberflächen genutzt. Sie ermöglichen die Substitution momentan verwendeter schwerer Glasfasern. Gleichzeitig kann eine separate Heizung eingespart werden.</p> <p>Die in diesem Vorhaben entwickelten Verfahren und Methoden sollen dazu beitragen, die nationale Luftfahrtindustrie im weltweiten Wettbewerb nachhaltig zu stärken.</p> <p>Die erfolgten Arbeiten haben wesentlich dazu beigetragen das fibretemp®-System weiterzuentwickeln. Durch die Arbeiten wurden neue Möglichkeiten geschaffen, ein beheiztes Faser-Kunststoff-Verbund-Strukturbauteil mit einem recykliertem Werkstoff herzustellen. Auf Grund der Wiederverwertung ist der Werkstoff für die geplanten Anwendungsfälle günstiger, weist aber gleichzeitig wesentlich bessere Kennwerte als ein ungerichtetes Vlies auf.</p> <p>Gleichzeitig wurde mit dem Vorhaben in zweifacher Hinsicht ein wesentlicher Beitrag zur Nachhaltigkeit unternommen. Wiederverwendung wurde verbunden mit einer Gewichtreduktion in der Luftfahrt, was wiederum zu einem verminderten Treibstoffverbrauch und damit einem geringeren CO₂-Fußabdruck führt und damit die Umwelt schont.</p>	
19. Schlagwörter fibretemp® - die integrierte Temperierung, Interieur Bauteile, Lightweight, CFRP, recyklierte Carbonfaservliese,	
20. Verlag -	21. Preis -

Document Control Sheet

1. ISBN oder ISSN planned	2. type of document (e.g. report, publication) final report
3. title <p style="text-align: center;">CaroLin developement and design of an interated heating element into a structure made out of reprocessed carbon fibre viels for interior application</p>	
4. author(s) (family name, first name(s)) Kantelberg, Michael Brandes, Jens	5. end of project 31.12.2020
	6. publication date 27.06.2021
	7. form of publication digital
8. performing organization(s) (name, address) fibretech compsotes GmbH Am Lesumdeich 2 28719 Bremen	9. originator's report no. -
	10. reference no. 20Q1704A
	11. no. of pages 66 +2
12. Sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. no. of references 2
	14. no. of tables 7
	15. no. of figures 133
16. supplementary notes -	
17. presented at (title, place, date) -	
18. abstract The project CaroLin concerned itself with the re-utilization of valuable Carbon Fibres into a highly fibre orientated Carbon-Veil (HO-cCF-Veil), to be used in the production of aircraft interior parts. In this project the electrically conductive carbon fibres will be used as a resistance heating element on interior surfaces. By this the subsidization of current used heavier E-Glas fibres will be possible. By that also a separate heater will no longer be needed. The processes and technologies that were developed in the context of this project aim to strengthen the national aeronautic industry effectively. The activities of this project significantly added to advancing the fibretemp® technology. The work that has been done made it possible to design a heated structural composite part using a recycled base material. Re-using a material for this kind of application enables us to build a more cost-effective part with improved mechanical values of a traditional veil-material. Coincidentally the project contributed an essential part to the sustainability of the environment in more than one way. Recycling was combined with weight reduction in the aerospace industry leading to a reduction in fuel consumption and by thus lowering the CO2-footprint.	
19. keywords fibretemp® - the integrated temperature control, interior panels, Lightweight, CFRP, recycled carbon veil	
20. publisher -	21. price -