

Hotset GmbH & Co. KG

Entwicklung einer hybriden Leichtbaustruktur mit funktionsintegriertem Flächenheizelement aus recycelten Kohlenstofffasern

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,

gefördert unter dem Az: 37249 von der

Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Tim Strauß, Hotset GmbH

&

Caterina Linnig, Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil,

Universität Paderborn

Lüdenscheid, April 2023

Der Abschlussbericht ist erhältlich bei:

Hotset GmbH

Hueckstraße 16

58551 Lüdenscheid

Tel. +49 2351 4302-0

Fax: +49 2351 4302-25

info@hotset.com

06/02		Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt			
Az	37249	Referat	01	Fördersumme	125.000 €
Antragstitel		Entwicklung einer hybriden Leichtbaustruktur mit funktionsintegriertem Flächenheizelement aus recycelten Kohlenstofffasern			
Stichworte		Recyceltes Kohlenstofffaservlies, elektrische Beheizung			
Laufzeit		Projektbeginn		Projektende	
24 Monate		15.02.2021		14.02.2023	
Projektphase(n)		1			
Zwischenberichte		30.11.2022			
Bewilligungsempfänger				Tel 02351 4302-475	
Hotset GmbH				Fax 02351 4302 81-475	
Hueckstraße 16				Projektleitung	
58511 Lüdenscheid				Tim Strauß	
				Bearbeiterin	
				Tanja Pointke	
Kooperationspartner		Universität Paderborn Warburger Str. 100 33098 Paderborn Ausführende Stelle: Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil (LiA)			
Zielsetzung und Anlass des Vorhabens					
<p>Ziel des Forschungsvorhabens ist die Erschließung neuartiger, innovativer Anwendungsfelder für recycelte Kohlenstofffasern aus CFK-Abfallströmen. Hierzu soll ein mehrschichtiges, leichtbaugerechtes Hybridsystem mit funktionsintegriertem Flächenheizelement entwickelt werden. Das Flächenheizelement besteht aus einem Vlies aus recycelten Kohlenstofffasern und duromerem Matrixsystem. Die Funktionsweise basiert auf der Nutzung der elektrisch leitfähigen Kohlenstofffasern als Heizwiderstand. Die zu entwickelnde hybride Leichtbaustruktur im Rahmen dieses Forschungsvorhabens beispielhaft als Bodenstruktur in Campingfahrzeugen zum Einsatz kommen.</p>					
Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden					
<p>Im Rahmen des Projekts werden zunächst die Anforderungen an das mehrschichtige, leichtbaugerechte Hybridsystem und dem Flächenheizelement für die Anwendung als beheizbarer Fußboden in einem Campingfahrzeug herausgearbeitet. Aufbauen darauf erfolgt die methodische Materialauswahl nach Ashby. Neben den mechanischen und elektrischen Anforderungen wird ebenfalls der ökologische Fußabdruck möglicher Werkstoffe als Entscheidungskriterium herangezogen. Zusätzlich wird die Eignung verschiedener Werkstoffkombinationen für die hybride Leichtbaustruktur mit integriertem Flächenheizelement untersucht. Eine Charakterisierung oder die Literaturrecherche relevanter Werkstoffeigenschaften der solitären Werkstoffe in der Hybridstruktur und des rCF-Vlieses für die numerische Simulation erfolgt in Arbeitspaket 2.2. Bei der Auslegung des Flächenheizelements in AP 3 entsprechend der geforderten Leistungsdaten kann der Widerstand unter anderem durch Variation des Flächengewichts des rCF-Vlies und der Ausrichtung der Vlieslagen angepasst werden. Eine Randbedingung ist dabei, dass das entwickelte rCF-Vlies-Heizelement auch im Niedervoltbereich, beispielweise über das Bordnetz eines Fahrzeugs betrieben werden soll. Ein weiterer, wesentlicher Einflussfaktor auf den Widerstand des Heizelements ist die elektrische Kontaktierung des rCF-Vlies. Es werden verschiedene Konzepte erarbeitet und auf ihre Tauglichkeit untersucht. Zusätzlich werden Fertigungsverfahren zur Herstellung der Heizelemente auf Eignung unter-</p>					

sucht. Die Validierung der elektrischen und thermischen Eigenschaften der Heizelemente erfolgt im Anschluss. Dazu wird sowohl der Widerstand der Heizelemente ermittelt als auch die Temperaturentwicklung infolge der elektrischen Kontaktierung und die Homogenität der Heizelemente mittels Thermographieaufnahmen ausgewertet.

Nachfolgend wird im Arbeitspaket 4 die Entwicklung eines skalierten Demonstrators vorangetrieben. Entsprechend der Anforderungen (AP 1) werden die Schichtdicken der jeweiligen Werkstofflagen des Demonstrators simulativ ausgelegt und Demonstratoren mit integriertem Flächenheizelement als Bodenstruktur eines Campingfahrzeugs gefertigt. Die mechanischen und elektrischen bzw. thermischen Eigenschaften der Demonstratoren werden im Anschluss durch statische Prüfung sowie mit Thermographieaufnahmen validiert (AP 4).

Ergebnisse und Diskussion

Im ersten Schritt wurden die Anforderungen sowohl an das Heizelement als auch an die hybride Leichtbaustruktur für den Einsatz in einem Campingfahrzeug herausgearbeitet. Neben elektrischen Kenngrößen des Heizelements, wie beispielsweise der maximalen Spannung für den Betrieb über das Bordnetz und thermische Anforderungen, wie die maximal zulässige Temperatur für Fußbodenheizungen, wurde die mechanischen Eigenschaften der hybriden Leichtbaustruktur anhand einer Referenz für den Fußbodenbereich abgeleitet. Die Anforderungen wurden in Eigenschaften der solitären Werkstoffe im Hybridverbund überführt und anhand derer mögliche Werkstoffkandidaten identifiziert. Die Eigenschaften der Werkstoffe wird für die Auslegung des Demonstrators mittels FEM-Simulation benötigt. Da bekannte Holzwerkstoffen und thermisch isolierende Polymerschäume im Demonstrator zum Einsatz kommen, war eine Literaturrecherche der Eigenschaften für die Ermittlung relevanter Kenngrößen ausreichend.

Im Anschluss an die Werkstoffauswahl und den vorliegenden Eigenschaften wurde mit der Entwicklung des Heizelements auf der Basis von recycelten Kohlenstoffaservliesen (rCF-Vlies) begonnen. Zur Kontaktierung des rCF-Vlies wurden verschiedene Konzepte erarbeitet. Es ist denkbar, Klebebänder oder Garn aus leitfähigem Kupfer zu verwenden oder ein Aufsprühen von flüssigen Metallpartikeln in das rCF-Vlies zur Kontaktierung zu nutzen. Die Verwendung von Kupferklebeband mit leitfähigem Klebstoff hat sich aufgrund des niedrigeren Kontaktwiderstands, der einfachen Handhabung sowie einem geringem Zeitaufwand als besonders geeignet herausgestellt. Anschließend erfolgte die Auslegung der Heizelemente durch Modifikation diverser Parameter. Dabei wurde unter anderem das Flächengewicht des rCF-Vlies, die Ausrichtung der Vlieslagen zwischen den Kontaktstellen sowie die Größe der Heizelemente variiert und deren Einfluss auf die erzielbare Heizleistung untersucht. Die niedrige Vliesgrammatur eignet sich nur bedingt für den Einsatz im Heizelement. Aufgrund der geringen Dichte des rCF-Vlieses war der gemessene Widerstand zum Teil mehr als doppelt so hoch, wie bei den rCF-Vliesen mit höherer Grammatur von 20 und 30 g/m². Anhand der Thermographieaufnahmen der Heizelemente konnte gezeigt werden, dass die Nutzung von rCF-Vlies mit einem Flächengewicht von 20 sowie 30 g/m² gegenüber des rCF-Vlieses mit einer Grammatur 10 g/m² eine deutlich homogenere Wärmeentwicklung hervorruft.

Im Sinne einer Funktionsintegration wird das Heizelement mit den präferierten Werkstoffen kombiniert, so dass ein funktionsfähiger Prototyp der Fußbodenheizung entsteht, dessen Eigenschaftsprofil in weiteren Untersuchungen validiert werden konnte. Sowohl in statischen Tests als auch bei der Untersuchung der erreichbaren Temperaturentwicklung konnte gezeigt werden, dass die gewünschten mechanischen, elektrischen und thermischen Anforderungen für den Einsatz als Fußbodenheizung erreicht werden. Zudem konnte durch die Auslegung anhand von Leichtbauprinzipien eine Massensparnis von ca. 45 % bei gleichen Eigenschaften und gleichzeitiger Funktionsintegration im Vergleich zur Referenz erzielt werden.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Im Rahmen des Projektes wurde ein hybride Fußbodenbeheizung entwickelt. Ausgewählte Ergebnisse des Projekts sind in die Lehre an der Universität Paderborn eingeflossen. Seitens der Fa. Hotset sind diverse Messeauftritte geplant, auf denen die entwickelte Technologie vorgestellt werden kann. Zudem sind Veröffentlichungen in Fachzeitschriften wie CU reports des Composite United oder dem Heizungs-Journal geplant.

Fazit

Im Rahmen des Projektes wurde die Entwicklung einer hybriden Leichtbaustruktur mit integriertem Heizelement aus recycelten Kohlenstofffasern erfolgreich abgeschlossen. Es konnte ein geeignetes Fertigungsverfahren zur Herstellung der Heizelemente und die Einflussfaktoren auf die elektrischen Eigenschaften der Heizelemente herausgearbeitet werden. Durch die gezielte Ausrichtung der rCF-Lagen, der Grammatik sowie die Art der Kontaktierung kann der Widerstand der Heizelemente je nach geforderter Randbedingung angepasst werden, so dass für die Funktion der Beheizung ein niedriger Widerstand erreicht werden konnte. Bei der Bestromung der kontaktierten rCF-Vliesen konnte das thermische Potential gezeigt werden. Bereits beim Anlegen niedriger Spannungen von 12 V wurden Temperaturen von über 100 °C erreicht.

Weiterhin wurde ein aus anwendungsgerecht ausgewählten solitären Werkstoffe bestehender hybrider Demonstrator mit integriertem Heizelement ausgelegt, hergestellt und getestet. Im Vergleich zur Referenzstruktur aus OSB-Platten weist der Demonstrator ähnliche Steifigkeitswerte auf. Durch den Einsatz ausgewählter Werkstoffe kann im Vergleich zur Referenz eine deutliche Massensparnis von 44 % erzielt werden.

Inhaltsverzeichnis	Seite
1 Zusammenfassung	11
2 Einleitung.....	12
3 AP 1 – Anforderungsanalyse	16
4 AP 2 – Methodische Werkstoffauswahl und -charakterisierung.....	19
4.1 Methodische Werkstoffauswahl und Spezifikation der Fertigungsverfahren	19
4.2 Charakterisierung mechanischer und thermischer Eigenschaften für die numerische Simulation	23
5 AP 3 – Entwicklung des Flächenheizelements aus rCF-Vlies	24
5.1 Konzeptentwicklung zur Kontaktierung des rCF-Vlies	24
5.2 Auslegung des Flächenheizelementes	26
5.3 Herstellung des Flächenheizelements.....	28
5.4 Validierung der Leistungsdaten des Flächenheizelements.....	31
6 AP 4 – Demonstratorentwicklung	42
6.1 Anforderungsgerechte Auslegung einer Bodenstruktur mit integriertem Heizelement.....	42
6.2 Demonstratorfertigung und Eigenschaftvalidierung	45
7 Fazit.....	52
8 Literaturverzeichnis	55

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Möglicher Aufbau des hybriden Werkstoffverbunds mit integriertem Flächenheizelement	13
Abbildung 2.2: Arbeits- und Zeitplan des Projekts.....	15
Abbildung 3.1: Bodenplatte eines VW T5 Transporters.....	17
Abbildung 3.2: Anforderungen an die Einzelwerkstoffe des Hybridverbunds ...	18
Abbildung 4.1: Werkstoffauswahldiagramm für biegebelastete Platten mit hohem E-Modul bei gleichzeitig geringer Dichte	20
Abbildung 4.2: Spezifischer elektrischer Widerstand verschiedener Werkstoffe	21
Abbildung 4.3: Werkstoffauswahldiagramm für biegebelastete Platten minimaler Wärmeleitfähigkeit unter Berücksichtigung der minimaler Dichte.....	22
Abbildung 5.1: Mögliche Kontaktierungsvarianten der rCF-basierten Heizelemente mittels Kupferklebeband (links), Kupfergarn (Mitte) und aufgedampften Metallpartikeln (rechts)	25
Abbildung 5.2: Variation der Position der Kontaktierung oben (links) oder mittig (rechts)	27
Abbildung 5.3: Ausrichtung der rCF-Vliese im Heizelement.....	28
Abbildung 5.4: Herstellung eines Heizelements mittels Handlaminieren.....	30
Abbildung 5.5: Ermittelte Widerstände der Kontaktierungsalternativen unter Berücksichtigung der Ausrichtung der rCF-Vlieslagen bei 20 g/m ²	32
Abbildung 5.6: Einfluss der Position des Kupferklebebands auf den Widerstand der Heizelemente.....	33
Abbildung 5.7: Temperatur-Zeit-Diagramm der Heizelemente mit variierte Kontaktierungsposition.....	33
Abbildung 5.8: Ermittelter Widerstand der Grammaturen des rCF-Vlies bei einer Ausrichtung von 90°.....	35
Abbildung 5.9: Temperatur-Zeit-Diagramm und Thermographieaufnahmen der Heizelemente unterschiedlicher Grammaturen aus Abbildung 5.7.....	35
Abbildung 5.10: Ermittelter Widerstand bei verschiedener Ausrichtung bei einer Grammaturn des rCF-Vlies von 20 g/m ²	36
Abbildung 5.11: Temperatur-Zeit-Diagramm und Thermographieaufnahmen der Heizelemente unterschiedlicher Ausrichtung.....	37
Abbildung 5.12: Ermittelter Widerstand der Heizelemente mit definierter Breite bei einer Kontaktlänge von 25 cm mit einem Flächengewicht von 20 g/m ² bei 90°-Ausrichtung.....	38
Abbildung 5.13: Temperatur-Zeit-Diagramm und Thermographieaufnahmen der Heizelemente unterschiedlicher Breite bei einer Kontaktlänge von 25 cm	39

Abbildung 5.14: Ermittelter Widerstand der Heizelemente mit definierter Länge & Breite mit einem Flächengewicht von 20 g/m ² bei 90°-Ausrichtung.....	40
Abbildung 5.15: Temperatur-Zeit-Diagramm und Thermographieaufnahmen der Heizelemente mit definierter Länge und Breite.....	40
Abbildung 6.1: Aufbau und Randbedingungen des Finite-Elemente Modells zur Berechnung und Bewertung der Durchbiegung unter statischer Belastung	43
Abbildung 6.2: Simulativ berechnete Durchbiegung der Referenz (links) und des hybriden Demonstrators (rechts)	43
Abbildung 6.3: Definition des ebenen Finite-Elemente Modells zur Bewertung des thermischen Verhaltens unter Vorgabe eines elektrischen Potentials von 10 V.....	44
Abbildung 6.4: Theoretische Temperaturverteilung in Dickenrichtung des Hybridverbunds mit einer Dicke von 15 mm.....	45
Abbildung 6.5: Layout der Demonstratoren bestehend aus Heizelementen (schwarz) mit Kontaktierung aus Kupferklebeband (dunkelbraun).	46
Abbildung 6.6: Demonstrator während der Fertigung und im betriebsbereiten Zustand	47
Abbildung 6.7: Demonstrator während der Belastung und dessen Oberfläche nach Abschluss der statischen Prüfung	49
Abbildung 6.8: Thermographieaufnahmen der thermisch unisolierten Oberseite (links) und isolierten Unterseite (rechts) des Demonstrators (4x25 cm ²). Die Zieltemperatur des Reglers beträgt 40°C.	50
Abbildung 6.9: Thermographieaufnahmen der thermisch unisolierten Oberseite (links) und isolierten Unterseite (rechts) des Demonstrators (50x50 cm ²). Die Zieltemperatur des Reglers beträgt 40°C.	50
Abbildung 6.10: Temperatur-Zeit-Diagramme beider Demonstratoren und des im 50x50 cm ² -Demonstrator verbauten Heizelement vor der Integration in die Hybridstruktur.....	51
Abbildung 6.11: Thermographieaufnahme des Demonstrators bei einer Zieltemperatur von 28 °C.	51

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1: Werkstoffkennwerte für die numerische Simulation des Demonstrators.....	23
Tabelle 5-1: Untersuchte Parameter zur Optimierung des Widerstands des Heizelements.....	26
Tabelle 6-1: Theoretische Leistungsdaten der Demonstratoren.....	47

Abkürzungs- und Begriffsverzeichnis

CFK	Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
FKV	Faserverstärkte Kunststoffe
GF	Glasfaser
PLA	Poly lactide
rCF / rC-Faser	Recycelte Kohlenstofffaser

1 Zusammenfassung

Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurde eine hybride Leichtbaustruktur mit funktionsintegriertem Flächenheizelement aus recycelten Kohlenstofffasern entwickelt. Die Durchführung des seitens der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Projekts (AZ 37249) erfolgte durch die Projektpartner Hotset GmbH sowie dem Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil an der Universität Paderborn.

Ziel des Forschungsvorhabens war die Erschließung neuartiger, innovativer Anwendungsfelder für recycelte Kohlenstofffasern aus CFK-Abfallströmen. Hierzu wurde ein mehrschichtiges, leichtbaugerechtes Hybridsystem mit funktionsintegriertem Flächenheizelement entwickelt. Das Flächenheizelement besteht aus einem Vlies aus recycelten Kohlenstofffasern und duromerem Kunststoff. Die Funktionsweise basiert auf dem Mechanismus der jouleschen Wärme durch den Einsatz der hervorragend elektrisch leitfähigen Kohlenstofffasern. Beim Anlegen einer elektrischen Spannung fungiert das rCF-Vlies als flächiger Widerstand, was zu einer effizienten Umwandlung von elektrischer Energie in Wärme führt. Die zu entwickelnde hybride Leichtbaustruktur soll im Rahmen dieses Forschungsvorhabens beispielhaft als Bodenstruktur in Campingfahrzeugen zum Einsatz kommen. Für die Auslegung der hybriden Leichtbaustruktur wurden zunächst Werkstoffe entsprechend den gewünschten mechanischen, elektrischen und thermischen Anforderungen an die Fußbodenheizung im Campingfahrzeug mit Hilfe der methodischen Materialauswahl nach Ashby abgeleitet. Anschließend erfolgte die Auslegung der Heizelemente durch Modifikation diverser Parameter. Dabei wurde unter anderem das Flächengewicht des rCF-Vlies, die Kontaktierung mittels Kupferklebeband und Kupferdraht, die Ausrichtung der Vlieslagen zwischen den Kontaktstellen sowie die Größe der Heizelemente variiert und deren Einfluss auf die erzielbare Heizleistung untersucht. Zudem stand die homogene Temperaturverteilung der Heizelemente im Fokus der Untersuchungen. Bereits beim Anlegen niedriger Spannungen von 12 V wurden Temperaturen von über 100 °C erreicht. Zudem konnte anhand von Thermographieaufnahmen gezeigt werden, dass die Nutzung von rCF-Vlies mit einem Flächengewicht von 30 g/m² gegenüber rCF-Vliesen mit niedriger Grammaturn eine deutlich homogenere Wärmeentwicklung hervorruft. Im Sinne einer Funktionsintegration wird das Heizelement mit den präferierten Werkstoffen kombiniert, so dass ein funktionsfähiger Prototyp der Fußbodenheizung entsteht, dessen Eigenschaftsprofil in weiteren Untersuchungen validiert werden konnte. Sowohl in statischen Tests als auch bei der Untersuchung der erreichbaren Temperaturentwicklung konnte gezeigt werden, dass die gewünschten mechanischen, elektrischen und thermischen Anforderungen für den Einsatz als Fußbodenheizung erreicht werden.

2 Einleitung

Der Schutz der Umwelt, die Reduktion treibhauschädlicher Emissionen sowie die Ressourcenschonung durch Entwicklung einer geschlossenen Kreislaufwirtschaft für relevante Werkstoffe sind einige der wichtigsten Fragestellungen, die adressiert werden müssen. In diesem Zusammenhang sind kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) aufgrund ihrer herausragenden mechanischen Eigenschaften bei geringem Gewicht für Leichtbauanwendungen von großer Bedeutung. Auf dem globalen Markt zeigt sich dies in der Prognose einer stetigen Zunahme der Nachfrage nach Kohlenstofffasern von rund 10 % innerhalb der nächsten Jahre und einer Vielzahl neuer Anwendungsmöglichkeiten in den Bereichen Automotive, Luft- und Raumfahrt, Windenergie und Maschinenbau [1]. Analog dazu ist damit zu rechnen, dass in den nächsten Jahren auch der Anteil von CFK-Altbauteilen aus den genannten Branchen ansteigt. Im Jahr 2024 müssen mehr als 10.000 Tonnen an Rotorblättern pro Jahr entsorgt bzw. recycelt werden. Bei etwa 6000 - 8000 kommerziellen Flugzeugen, die zurzeit betrieben werden, wird erwartet, dass sie bis 2030 das Ende ihrer Lebensdauer erreichen und ebenfalls recycelt werden müssen [2]. Die Rückgewinnung der Kohlenstofffaser nach dem Stand der Technik geht zunächst mit undefinierten Eigenschaften bezüglich der Faserlänge und -qualität einher. Die technisch umsetzbare Aufbereitung von Recyclingfasern etwa zu Vliesen setzt, aufgrund der i.d.R. regellosen Orientierung der Fasern, die originäre Wirkung als Verstärkung in Kunststoffen zusätzlich herab, weshalb zahlreiche Vorbehalte gegenüber dem Wiedereinsatz von recycelten Kohlenstofffasern in technisch anspruchsvollen Anwendungsbereichen vorherrschen. Vor dem Hintergrund steigender CFK-Abfallmengen ist es im Sinne der Kreislaufwirtschaft deshalb von essenzieller Bedeutung die Akzeptanz dieser Sekundärmaterialien zu steigern, indem innovative Anwendungsfelder erschlossen werden. Besonders solche Anwendungen sind vielversprechend, in denen neben mechanischen Eigenschaften weitere, inhärente Merkmale der Kohlenstofffaser nutzbar gemacht werden. Hierzu zählen etwa die Beständigkeit gegen Chemikalien, die Abschirmung gegen elektromagnetische Strahlung oder die elektrische Leitfähigkeit. Aufgrund ihrer hohen elektrischen Leitfähigkeit können Kohlenstofffasern durch das Anlegen einer elektrischen Spannung als Widerstandsheizelement für Infrarotheizungen genutzt werden [3].

Eine Infrarotheizung ist eine direktelektrisch betriebene Heizungsalternative zu herkömmlichen Heizsystemen. Sobald eine Spannung anliegt, steht die Wärme zur Verfügung, weshalb sich Infrarotheizungen durch einen hohen Wirkungsgrad in der Nutzung auszeichnen. Anders als bei konduktiven Heizsystemen erwärmt eine Infrarotheizung nicht das gesamte Luftvolumen, sondern lediglich Gegenstände in der näheren Umgebung. Nach heutigem Stand der Technik werden als

Widerstandsheizelemente metallische Werkstoffe mit hoher elektrischer Leitfähigkeit, aber auch textile Kohlenstofffaser-Gewebe eingesetzt. Letztere werden heute beispielsweise zur Beheizung von Werkzeugen zur FVK-Bauteilherstellung im Flugzeug- oder Fahrzeugbau oder als Plug and Play-Lösungen für Wohnraumbeheizung in Form von Wand- oder Decken-Designelementen ohne die Integration weiterer Funktionen verwendet. Der Einsatz dieser Infrarotheizungen in mobilen Leichtbauanwendungen ist aufgrund des Aufbaus, der Kontaktierung und der technischen Spezifikationen deutlich eingeschränkt. Weiterhin haben die hohen Materialkosten der neuen, endlosen Kohlenstofffasern einen Einfluss auf die Marktakzeptanz und -durchdringung.

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Erschließung neuartiger, innovativer Anwendungsfelder für recycelte Kohlenstofffasern (rCF) aus CFK-Abfallströmen. Hierzu soll ein mehrschichtiges, leichtbaugerechtes Hybridsystem mit funktionsintegriertem Flächenheizelement entwickelt werden. Das Flächenheizelement besteht aus einem Vlies aus recycelten Kohlenstofffasern und duromerem Kunststoff. Die Funktionsweise basiert auf der Nutzung der elektrisch leitfähigen Kohlenstofffasern als Heizwiderstand. Die zu entwickelnde hybride Leichtbaustruktur (siehe Abbildung 2.1) soll im Rahmen dieses Forschungsvorhabens beispielhaft als Bodenstruktur in Campingfahrzeugen zum Einsatz kommen. In der hybriden Leichtbaustruktur ist eine konsequente Fokussierung auf die Eigenschaften der Einzelwerkstoffe möglich, d.h. jeder beteiligte Werkstoff kann jeweils die Anforderung (Steifigkeit, Festigkeit, Wärmeleitfähigkeit, elektrische und thermische Isolierung, etc.) übernehmen, für die er am besten geeignet ist. Der Einzelwerkstoff ist für sich genommen zur Erfüllung aller Anforderungen unzureichend, erst im Hybridverbund ergibt sich eine optimal funktionsfähige Komponente bei minimalen Gewicht.

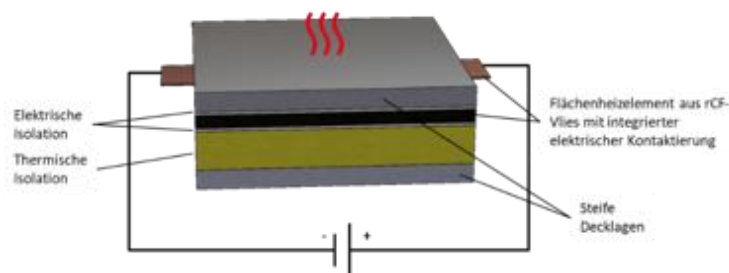


Abbildung 2.1: Möglicher Aufbau des hybriden Werkstoffverbunds mit integriertem Flächenheizelement

An die Leichtbaustruktur werden verschiedenartige Anforderungen gestellt. Zum einen soll das Flächenheizelement auf Basis von recyceltem Kohlenstofffaservlies mittels elektrischer Kenngrößen für eine definierte Leistung in Form von

Wärme ausgelegt sowie die Kontaktierung des Heizelements realisiert werden. Zum anderen sind mechanische Anforderungen, wie beispielsweise hohe Biege- und Torsionssteifigkeit sowie Dauerfestigkeit im Betrieb der Fahrzeugbodenstruktur zu berücksichtigen. In Form eines Sandwichaufbaus können durch den Abstand steifer Decklagen vom Mittelpunkt unter anderem hohe Biegesteifigkeiten erzielt werden. Zwischen den Decklagen befindet sich der Kern des Werkstoffverbunds. Dieser besteht zum einen aus dem kontaktierten Flächenheizelement und zum anderen aus zusätzlichen Werkstoffen, welche die weiteren Funktionen, wie beispielsweise elektrische sowie thermische Isolierung übernehmen. Für diese Anforderungen müssen Werkstoffe mit geringer Dichte gefunden werden, um das Leichtbaupotential voll auszuschöpfen. Eine mögliche Verwendung metallischer Deckbleche ermöglicht darüber hinaus die Anwendung von gängigen Fügeoperationen des Karosseriebaus zu umgebenden Strukturen im Fahrzeug. Die Entwicklung der hybriden Bodenstruktur mit funktionsintegriertem Flächenheizelement zeichnet sich durch das Potential zur Reduktion des Energieverbrauchs und somit auch den Emissionen aus. Neben dem Werkstoffkreislaufschluss durch die Wiederverwendung von Recyclaten, können entstehende Emissionen durch den Einsatz einer Leichtbauanwendung weiter reduziert werden. Bei einer Massensparnis von 1 kg werden bei der Nutzung eines Fahrzeugs durchschnittlich 0,5 l Kraftstoff pro 100 km gespart [4].

Abbildung 2.2 zeigt den Arbeits- und Zeitplan, der diesem Projekt zu Grunde liegt. Die Auslegung des Lagenaufbaus einer hybriden Leichtbaustruktur entsprechend des analysierten und spezifizierten Anforderungsprofils (AP 1) setzt eine methodische Werkstoffauswahl voraus (AP 2.1). Neben den mechanischen und elektrischen Anforderungen wird ebenfalls der ökologische Fußabdruck möglicher Werkstoffe als Entscheidungskriterium herangezogen. Zusätzlich wird die Eignung verschiedener Werkstoffkombinationen für die hybride Leichtbaustruktur mit integriertem Flächenheizelement untersucht. Eine Charakterisierung relevanter Werkstoffeigenschaften der recycelten Kohlenstofffaservliese und rCF-Vlies-Kunststoffverbunden für die numerische Simulation erfolgt in Arbeitspaket 2.2. Bei Auslegung des Flächenheizelements (AP 3) entsprechend der geforderten Leistungsdaten kann der Widerstand unter anderem durch Variation des Flächengewichts des rCF-Vlies individuell angepasst werden. Ein weiterer, wesentlicher Einflussfaktor auf den Widerstand des Heizelements ist die elektrische Kontaktierung des rCF-Vlies. Zudem besteht aufgrund der Oberflächenbeschaffenheit der Kohlenstofffaser die Herausforderung eine langfristige und sichere Kontaktierung zwischen metallischen Leitern und der Kohlenstofffaser zu gewährleisten. Um diese Herausforderung zu adressieren, werden im Rahmen der Entwicklung des Flächenheizelements verschiedene Konzepte zur Kontaktierung

des rCF-Vlies herausgearbeitet und erprobt. Entsprechend der Anforderungen werden die Schichtdicken der jeweiligen Werkstofflagen des Demonstrators simulativ ausgelegt und mit integriertem Flächenheizelement als Bodenstruktur eines Campingfahrzeugs gefertigt. Die Funktionalität des Demonstrators wird im Anschluss entsprechend validiert (AP 4).

Arbeits- und Zeitplan		1. Jahr				2. Jahr			
		I	II	III	IV	I	II	III	IV
AP 1	Anforderungsanalyse								
AP 1	Anforderungsanalyse								
AP 2	Methodische Werkstoffauswahl und -charakterisierung								
2.1	Methodische Werkstoffauswahl und Spezifikation der Fertigungsverfahren								
2.2	Charakterisierung mechanischer und thermischer Eigenschaften für die numerische Simulation								
AP 3	Entwicklung des Flächenheizelements aus rCF-Vlies								
3.1	Untersuchung der Eignung verschiedener Konzepte zur Kontaktierung des rCF-Vlies								
3.2	Auslegung des Flächenheizelementes unter Verwendung eines rCF-Vlies								
3.3	Herstellung des Flächenheizelements								
3.4	Validierung der Leistungsdaten des Flächenheizelements								
AP 4	Demonstratorentwicklung								
4.1	Anforderungsgerechte Auslegung einer Bodenstruktur mit integriertem Heizelement								
4.2	Demonstratorfertigung und Eigenschaftsvalidierung								
PT	Projektbegleitender Ergebnistransfer								
	Öffentlichkeitsarbeit, Publikation								
PK	Projektkoordination								
	Projektleitung								
Meilensteine									
Meilenstein 1: Anforderungsliste liegt vor									
Meilenstein 2: Werkstoffauswahl ist erfolgt und Daten für numerische Simulation liegen vor									
Meilenstein 3: Entwicklung des Flächenheizelements ist erfolgreich abgeschlossen									
Meilenstein 4: Validierung des Demonstrator ist abgeschlossen; Funktionsfähiger Demonstrator liegt vor									

Abbildung 2.2: Arbeits- und Zeitplan des Projekts

3 AP 1 – Anforderungsanalyse

Im Arbeitspaket 1 erfolgt die Spezifikation der hybriden Leichtbaustruktur sowie des Flächenheizelements. Von entscheidender Bedeutung ist hierbei die genaue Herausarbeitung der Eigenschafts- und Anforderungsprofile. Aus dem Eigenschaftsprofil werden dann die Anforderungsprofile der Einzelwerkstoffe und der Grenzschichten zwischen den Einzelwerkstoffen abgeleitet. Mögliche Anforderungen betreffen beispielsweise die mechanischen und thermischen Anforderungen an den Hybridverbund (Biegesteifigkeit, Zugfestigkeit, Isolation, etc.), thermische und elektrische Eigenschaften des Flächenheizelements, wie beispielsweise geforderte Betriebstemperaturen oder maximal abrufbare Leistung sowie die Verbindung zur Fahrzeugperipherie. Ziel dieses Arbeitspakets ist eine Anforderungsliste, auf deren Basis im AP 2 die methodische Werkstoffauswahl sowie die weitere Auslegung des Flächenheizelements (AP 3) und des Demonstrators (AP 4) erfolgt.

Anforderungen an das Heizelement

Die Anforderungen an das Heizelement richten sich nach dem vorgesehenen Use-Case. Im Projektkonsortium wurde der Anwendungsfall einer Fußbodenheizung zur zusätzlichen Beheizung von Campingfahrzeugen definiert. Die Anforderungen an das Heizelement und der Kontaktierung sind

- Betrieb im Spannungsbereich I nach IEC 60449; bestenfalls zwischen 12 und 24 V (F)
- Integrierte elektrische Isolierung (F)
- Automatisierbare Kontaktierungsvariante (W)
- Gleichmäßige Wärmeverteilung (W)

Die Heizleistung ergibt sich aus der angelegten Spannung und der Stromstärke, die wiederum über das Ohmsche Gesetz in direktem Zusammenhang mit dem Widerstand des Heizelements steht. Die Einstellung eines geeigneten Widerstands erfolgt über die Variation des Lagenaufbaus, der Grammatik des verwendeten Vlieses sowie der Größe bzw. dem Abstand zwischen der Kontaktierung.

Anforderungen an den Lagenaufbau des Hybridverbunds & Demonstrators

Anders als bei Einzelwerkstoffen sind bei Hybridwerkstoffen konsequente Funktionstrennungen möglich, d.h. jeder beteiligte Werkstoff kann jeweils die Anforderung übernehmen, für die er am besten geeignet ist. Da jeder Werkstoff symbiotisch nur noch eine bestimmte für ihn definierte Aufgabe übernimmt, führt dies dazu, dass im Grunde nicht mehr Einzelwerkstoffe, sondern Hybridwerkstoffe zu

entwickeln sind. Der Einzelwerkstoff ist für sich genommen unzureichend, erst im Hybrid ergibt sich eine optimal funktionsfähige Komponente.

Zunächst wurde eine Marktrecherche zu Bodenplatten in Campingfahrzeugen durchgeführt, um die Anforderungen an den Demonstrator abzuleiten. Als Referenz wurde der Volkswagen T5 Transporter (siehe Abbildung 3.1) ausgewählt. Die Bodenplatte besteht in diesem Modell aus Sperrholz und weist eine Dicke von 12 - 15 mm auf.

Anforderungen an die Hybridstruktur und den Demonstrator sind folgende:

- Mindestens vergleichbare Steifigkeit des Hybridverbunds zur Referenzgeometrie (F)
- Geringe Masse (W)
- Gleichmäßige Wärmeverteilung (W)
- Temperaturbeständigkeit zwischen -40 – 80 °C (F)
- Regelung der Heizleistung und somit der maximal erreichbaren Oberflächentemperatur von 35°C (F)
- Integration des Messfühlers und der Verkabelung in den Demonstrator (F)
- Recyclbarer Aufbau (W)



Abbildung 3.1: Bodenplatte eines VW T5 Transporters

Die Anforderungen an den Demonstrator lassen sich auf die Eigenschaften der Einzelwerkstoffe im Verbund übertragen. Zwar können hohe Steifigkeiten des

Gesamtverbunds werkstoffunabhängig beispielsweise durch eine große Bauteildicke erreicht werden, jedoch ist die Auswahl eines Werkstoffs, der die weiteren Anforderungen erfüllt notwendig.

Die Erfüllung des Anforderungsprofils aus mechanischen sowie von thermischen und elektrischen Eigenschaften ist gefordert. Das Anforderungsprofil an die flächige Bodenstruktur eines Campingfahrzeugs ist in Abbildung 3.2 dargestellt.

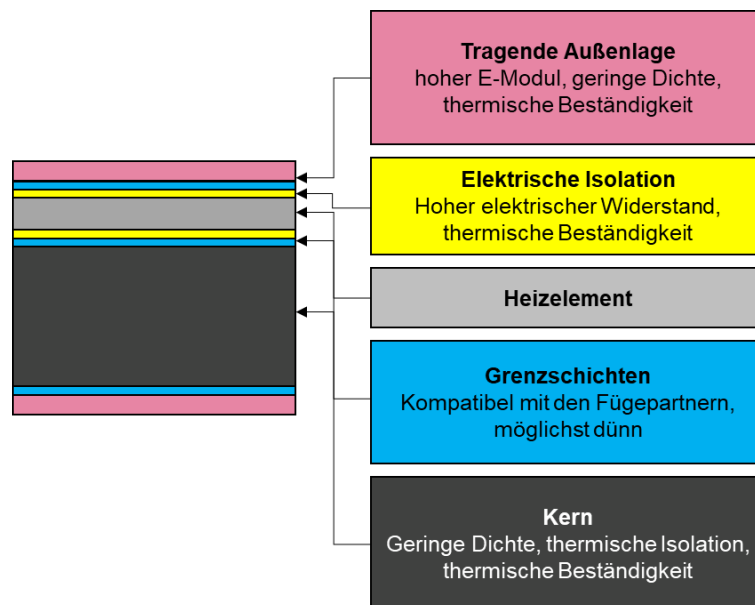


Abbildung 3.2: Anforderungen an die Einzelwerkstoffe des Hybridverbunds

4 AP 2 – Methodische Werkstoffauswahl und -charakterisierung

Zentraler Bestandteil des zweiten Arbeitspaketes ist die Auswahl der Werkstoffe für die hybride Leichtbaustruktur nach methodischem Vorgehen und Ermittlung verschiedener Werkstoffeigenschaften des auf recycelten Kohlenstofffasern basierenden Vlies-Halbzeug und dem Vlies-Kunststoffverbund. Die Ergebnisse der Charakterisierung dienen als Materialdaten für die numerische Simulation des Flächenheizelements (Meilenstein 2).

4.1 Methodische Werkstoffauswahl und Spezifikation der Fertigungsverfahren

In diesem Arbeitspaket erfolgte eine umfangreiche Recherche zu den am Markt verfügbaren Werkstoffen und deren Verarbeitungsprozessen. Die Ergebnisse der Recherche dienten zur Sichtung technischer Werkstoffe, die in ihren Eigenschaften eine möglichst hohe Übereinstimmung mit den idealen Schichtprofilen aus der Anforderungsliste aus AP 1 aufweisen. Neben den mechanischen Eigenschaften der einzelnen technischen Werkstoffe wurden in der Screeningphase u.a. Aspekte der Fertigungs- und Fügetechnik berücksichtigt. Die Suche eines geeigneten Werkstoffkandidaten erfolgte nach der methodischen Werkstoffauswahl nach Ashby [5] unter Zuhilfenahme des Softwareprogramms *Granta Selector* der Fa. ANSYS. Das Programm basiert auf einer detaillierten Datenbank bekannter technischer Werkstoffe, die das Screening und die Analyse von Werkstoffen und deren Kennwerte vereinfacht.

Tragende Außenlage

Die Werkstoffauswahl für die Decklagen des Hybridverbunds berücksichtigt die Notwendigkeit eines hohen Elastizitätsmoduls und einer geringen Dichte sowie ökologische und ökonomische Faktoren. Die tragenden Außenlage des Verbunds wird für die Bestimmung des Materialindex' als Platte abstrahiert, die an den äußeren Kanten gelagert ist und eine aus Biegung belastet wird. Mit dem Ziel der Minimierung der Masse m ergibt sich ein Werkstoffauswahl-Diagramm in Abbildung 4.1, in dem der Elastizitätsmodul über der Dichte aufgetragen ist. Die in Rot dargestellte Auswahlgerade wird zu Optimierung nach oben links verschoben. Dies resultiert in der Maximierung des E-Moduls bei gleichzeitiger Minimierung der Dichte. Werkstoffe, die sich auf der Geraden befinden, erreichen die gleichen Eigenschaften. Die ausgegrauten Werkstoffe rechts unterhalb der Geraden haben nicht die geforderte Eigenschaftsprofil.

Es ist zu sehen, dass sowohl Holzwerkstoffe wie Bambus, Eiche und Sperrholz oder kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe das Anforderungsprofil erfüllen. Die Anforderung der Temperaturbeständigkeit ist für die genannten Werkstoffe erreicht. Sämtliche Holzwerkstoffe sowie CFK sind gegen Temperaturen oberhalb von 100 °C beständig. Bei der Berücksichtigung ökologischer Gesichtspunkte ist der Einsatz von Holz im Vergleich zu CFK vorteilhaft. Aufgrund der niedrigen Kosten ist der Einsatz von Sperrholz zu bevorzugen.

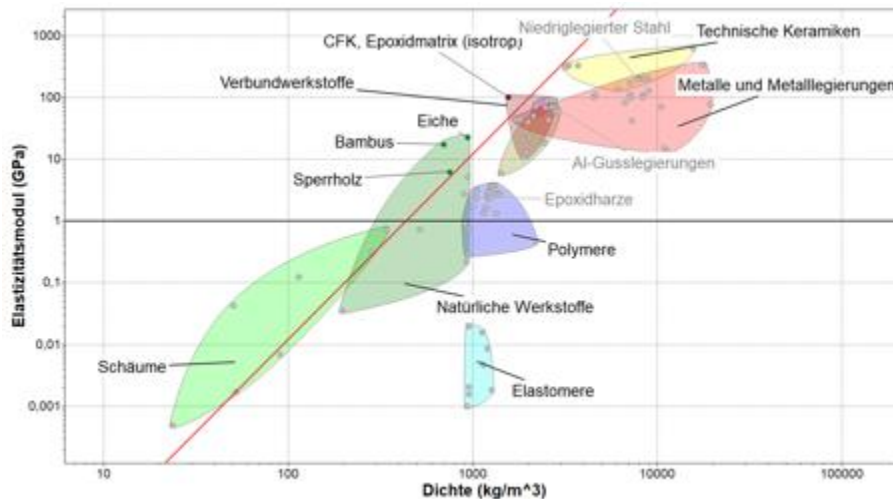


Abbildung 4.1: Werkstoffauswahldiagramm für biegebelastete Platten mit hohem E-Modul bei gleichzeitig geringer Dichte

Im Demonstrator kommen 4 mm starke dreilagige Multiplex-Platten aus Birkenholz zum Einsatz.

Heizelement und elektrische Isolation

Die Anforderung „elektrische Isolierung“ lässt sich als elektrischer Widerstand übersetzen. Werkstoffe mit einem hohen elektrischen Widerstand sind gute Isolatoren. In der Granta Datenbank wird der spezifische elektrische Widerstand über den verfügbaren Werkstoffklassen aufgetragen, um geeignete Werkstoffe herauszufiltern. Abbildung 4.2 dient als Entscheidungsgrundlage für mehrere Komponenten des Hybridverbunds. Die Relevanz des spezifischen elektrischen Widerstand kommt sowohl bei der Auswahl eines geeigneten Werkstoffs für die Kontaktierung als auch für die elektrische Isolierung des Heizelements zum Tragen.

Als Kontaktierungswerkstoffe sind Werkstoffe mit hoher Leitfähigkeit bzw. niedrigen elektrischen Widerstand geeignet. Metallische Werkstoffe, wie Silber und Kupfer weisen hohe Leitfähigkeiten auf. Die vergenständlichte Energie als ökologische Kenngröße bei der Primärproduktion von Werkstoffen dient ebenfalls als

Auswahlkriterium. Diese liegt bei Kupfer mit 59 MJ/kg deutlich niedriger als bei Silber (1470 MJ/kg). Zudem ist Kupfer auch deutlich günstiger, weshalb sich die Verwendung von Kupfer zur Kontaktierung anbietet.

Das Heizelement besteht aus zwei gestapelten Lagen Kohlenstoffaservlies und temperaturbeständigem Epoxidharz als Matrixpolymer. Das Matrixpolymer kann bei der Herstellung der Heizelemente auf unterschiedliche Weise verarbeitet werden. Zum einen kann Handlaminierten als Verarbeitungstechnologie genutzt werden. Dabei wird flüssiges Harz-Härter-Gemisch mit einer Rolle oder einem Pinsel händisch aufgetragen. So wird eine ausreichende Durchtränkung des Vlieses mit dem Matrixpolymer erreicht, jedoch ist der händische Prozess aufwändig und unzureichend reproduzierbar. Alternativ bietet sich die Verwendung von vorimprägnierte Halbzeuge auf Basis von Glasfasern und Epoxidharz an.

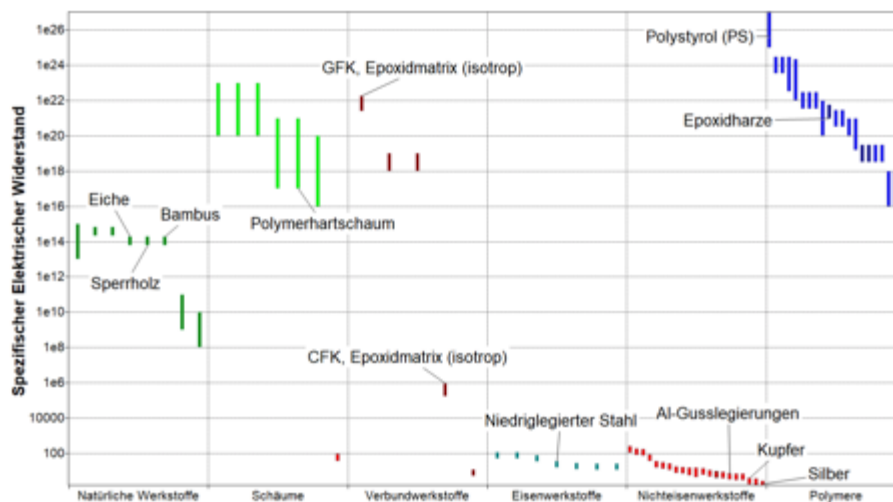


Abbildung 4.2: Spezifischer elektrischer Widerstand verschiedener Werkstoffe

Wie in Abbildung 4.2 zu sehen ist, weisen die sogenannten Prepregs aus Glasfaser und Epoxidharz einen hohen elektrischen Widerstand auf, so dass diese als elektrische Isolation genutzt werden können. Die Prepregs lassen sich als Decklagen flächig auf die CF-Vliese aufbringen und können gemeinsam in einem beheizten Werkzeug verpresst werden. Mit ausreichend hoher mechanischer und thermischer Beständigkeit und der Eigenschaft als schlechter thermischer Isolator kann die elektrische Isolierung direkt in das Heizelement integriert werden, ohne dass die Wärmeübertragung vom Heizelement direkt an die darüberliegende Schicht beeinträchtigt wird.

Die Heizelemente bestehen aus rCF-Vlies des Herstellers Mitsubishi Chemical sowie aus GF-Prepregs Sigrapreg G U300-0/NF-E320/35%. Dabei handelt es sich um ein unidirektionales Glasfaserprepreg mit einem Flächengewicht von 300

g/m² mit Epoxidharz E320 und einem Faservolumengehalt von 65% des Herstellers SGL.

Kern mit thermischer Isolierung

Für das Kernmaterial des Hybridverbunds wurden Werkstoffeigenschaften wie die geringe Dichte, thermische Isolierung und thermische Beständigkeit abgeleitet.

Aus der Anforderung der thermischen Isolierung ist die Wärmeleitfähigkeit als werkstoffspezifische Kenngröße für die Auswahl relevant. Bei gleichzeitiger Minimierung der Dichte kann das Diagramm in Abbildung 4.3 erstellt werden. Schäume weisen generell eine geringe Dichte auf. Durch die eingeschlossene Luft ist die Fähigkeit zur thermischen Isolierung bei dieser Werkstoffklasse besonders ausgeprägt. Basierend auf der Dichte und Wärmeleitfähigkeit kommen beide polymerbasierte Schäume in Frage. Allerdings sind die wesentlich schlechteren mechanischen Eigenschaften, wie der Elastizitätsmodul oder die Druckfestigkeit, ein Ausschlusskriterium für den Einsatz des Polymerweichschaums im Fahrzeugboden. Der Polymerhartschaum ist bis 102 °C temperaturbeständig und trägt mit seinen Eigenschaften zur Erhöhung der Gesamtsteifigkeit des Verbunds sowie der thermischen Isolierung bei. Im Demonstrator wird der Polymerhartschaum Styrodur 3035 CS mit einer Stärke von 7 mm zur thermischen Isolierung der Leichtbaustruktur eingesetzt.

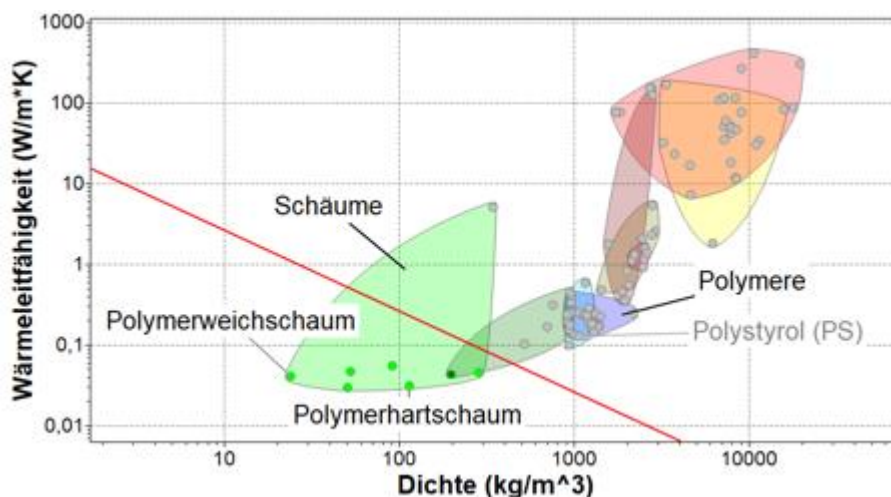


Abbildung 4.3: Werkstoffauswahldiagramm für biegebelastete Platten minimaler Wärmeleitfähigkeit unter Berücksichtigung der minimaler Dichte

Grenzschichten zwischen den Einzelwerkstoffen

Zum Fügen der Einzelwerkstoffe wird ein Klebstoff benötigt, der für das Kleben artfremder Werkstoffe geeignet ist. Es ist sowohl der Einsatz von Klebefolien auf Polymerbasis als auch speziellen 2-Komponentensysteme für das Kleben von Holzwerkstoffen denkbar. Im Demonstrator wird das 2K-System Jowat 692.30 des Herstellers Jowat verwendet.

4.2 Charakterisierung mechanischer und thermischer Eigenschaften für die numerische Simulation

Ziel des Arbeitspakets ist die Recherche und ggf. Ermittlung mechanischer und thermischer Eigenschaften der verwendeten Werkstoffe im Heizelement und dem Hybridverbund.

Für die steifigkeitsbasierte Auslegung des Demonstrators ist die Kenntnis des Elastizitätsmoduls und der Querkontraktionszahl des solitären Werkstoffs relevant. Zusätzlich werden die elektrische Leitfähigkeit, die spezifische Wärmekapazität sowie die Wärmeleitfähigkeit zur Simulation des Aufheizverhaltens verwendet. Diese Kennwerte konnten anhand einschlägiger Literatur und der Werkstoffdatenbank Granta Selector ermittelt werden, weshalb eine zusätzliche Charakterisierung der verwendeten Werkstoffe nicht notwendig war. Die verwendeten Kennwerte sind in Tabelle 4-1 aufgeführt.

Tabelle 4-1: Werkstoffkennwerte für die numerische Simulation des Demonstrators

Werkstoffkennwerte	Birke	Polymerschaum
Elastizitätsmodul [GPa]	6	2
Querkontraktionszahl	0,3	0,3
Dichte [kg/m ³]	700	30
Spez. Wärmekapazität [kJ/kg*K]	1,71	1,45
Wärmeleitfähigkeit [W/m*K]	0,35	0,035

5 AP 3 – Entwicklung des Flächenheizelements aus rCF-Vlies

In Arbeitspaket 3 wird die Entwicklung des Flächenheizelements aus rCF-Vlies vorangetrieben. Der Fokus der Untersuchungen liegt unter anderem auf der Konzeptentwicklung zur Kontaktierung als auch die Auslegung der Heizelemente auf Basis verschiedener Vliesgrammaturen und -ausrichtungen. Basierend auf den Erkenntnissen der Auslegung erfolgt die Herstellung sowie die anschließende Validierung der Leistungsdaten der Heizelemente.

5.1 Konzeptentwicklung zur Kontaktierung des rCF-Vlies

Die elektrische Kontaktierung des rCF-Vlies hat wesentlichen Einfluss auf den Widerstand und somit die abrufbare Leistung des Flächenheizelements. Ziel des Arbeitspakets ist die Entwicklung von Konzepten zur langfristigen und sicheren Kontaktierung zwischen metallischen Leitern und dem auf Kohlenstofffasern basierten Vlies zu erreichen. Zudem soll das kontaktierte Flächenheizelement in eine hybride Leichtbaustruktur integriert werden können, was weitere Anforderungen beispielsweise an die Dimensionierung der Kontaktierung stellt. Um diese Herausforderung zu adressieren, werden Konzepte zur Kontaktierung des rCF-Vlies erprobt und ausgewählt.

In Arbeitspaket 2.1 wurde Kupfer als geeignetes Material für die Realisierung einer Kontaktierung herausgestellt. Basierend darauf sind mehrere Kontaktierungsvarianten denkbar:

- Kupferklebeband: Kupferklebebänder mit leitfähigem Klebstoff eignen sich für die Kontaktierung des rCF-Vlieses, um eine elektrische Verbindung herzustellen. Der Anwendung ist wenig komplex und erzielt durch das Verpressen mit einer Rolle im händischen Prozess eine gleichmäßige Kontaktierungsfläche. Die Verbindung des Kupferklebebands zur Stromquelle erfolgt beispielsweise über Klemmen oder Quetschverbinder, die in der Leichtbaustruktur integriert werden können. Im Hinblick auf eine Automatisierung des Kontaktierungsverfahrens kann beispielsweise mit Hilfe eines Kalenders eine schnelle und kostengünstige Kontaktierung des rCF-Vlieses realisiert werden.
- Kupferdraht oder -garn: Die Verwendung von Kupferdreh oder -garn ist eine weitere Möglichkeit zur Kontaktierung des rCF-Vlieses. Die Drähte können zum einen zwischen den Lagen des rCF-Vlieses eingebracht und zur Fixierung verlötet werden. Zum anderen ist es denkbar Kupfergarn durch Vernähen mit dem rCF-Vlies zu verbinden. Die Verwendung von

Kupferdraht oder -garn ermöglicht eine hohe Präzision bei der Platzierung der Kontaktierung und eine einfache Anpassung an verschiedene Geometrien und Formen. Allerdings erfordert die Verwendung von Lötmitteln eine sorgfältige Handhabung, um mögliche Schäden am rCF-Vlies zu vermeiden. Außerdem kann die Fixierung der Drähte oder des Garns aufwändig sein und erfordert möglicherweise spezielle Techniken oder Werkzeuge. In Untersuchungen zeigt sich jedoch, dass sich das Befestigen des Kupferdrahts auf dem rCF-Vlies im Vergleich zum Aufkleben des Klebebands als deutlich komplexer gestaltet. Für erste Versuche zur generellen Eignung wurden die Kupferdrähte mit Hilfe von Tackernadeln im rCF-Vlies befestigt.

- **Aufdampfen von Metallpartikeln auf das rCF-Vlies:** Ein weiteres mögliches Kontaktierungskonzept ist das Aufdampfen von Metallpartikeln auf das rCF-Vlies mittels des Thermischen Verdampfens. Es besteht die Möglichkeit, dass die Metallpartikel durch das Eindringen in das Vlies deutlich größere Kontaktflächen ausbilden können und somit die Leitfähigkeit verbessern. Die Verbindung mit einer Stromquelle kann über das Löten der Leiter auf die aufgedampfte Metallschicht erreicht werden. Erste Untersuchungen zur Machbarkeit haben jedoch gezeigt, dass die aufgedampften Schichten nach mehreren Durchläufen keine ausreichende Dicke zeigen, um eine verlässliche Kontaktierung herstellen zu können. Zudem ist der Prozess der Herstellung aufwändig und kostenintensiv. Für eine weitere Betrachtung im Rahmen dieses Projekts eignet sich dieses Kontaktierungsverfahren nicht.



Abbildung 5.1: Mögliche Kontaktierungsvarianten der rCF-basierten Heizelemente mittels Kupferklebeband (links), Kupfergarn (Mitte) und aufgedampften Metallpartikeln (rechts)

5.2 Auslegung des Flächenheizelementes

Ziel des Arbeitspakets ist die Auslegung des Flächenheizelements entsprechend der erarbeiteten Anforderungen aus Arbeitspaket 1.1. Zunächst werden dafür die elektrischen Eigenschaften verschiedener Heizelementarchitekturen untersucht. Die zentrale, zu optimierende Kenngröße ist der Widerstand der Heizelemente. Über das Ohmsche Gesetz

$$U = R \cdot I \quad 5-1$$

ist der Widerstand R mit der Spannung U sowie der Stromstärke I verknüpft und wirkt aufgrund des ersten Jouleschen Gesetzes unmittelbar auf die entstehende Wärmeenergie:

$$Q_w = I^2 \cdot R \cdot t = \frac{U^2}{R} \cdot t \quad 5-2$$

Die Optimierung des Widerstands erfolgt anhand der in Tabelle 5-1 gezeigten Parameter. Durch die Variation des Flächengewichts des rCF-Vlies, der Ausrichtung der rCF-Vlieslagen, der Länge der Kontaktfläche, dem Abstand zwischen den Elektroden sowie der Kontaktierungsvariante und deren Position wird ein Einfluss auf den Widerstand der Heizelemente erwartet.

Tabelle 5-1: Untersuchte Parameter zur Optimierung des Widerstands des Heizelements

Vliesgrammatur / g/m ²	10	20	30
Ausrichtung der rCF-Lagen	0°	90°	0°/90°
Länge der Heizelemente / cm	25	50	
Breite der Heizelemente / cm	15	25	35 50
Kontaktierungsvariante	Kupferklebeband		Kupferkabel
Kontaktposition	Oben		Mitte

Im ersten Schritt erfolgt die Untersuchung der ausgewählten Kontaktierungsvarianten aus dem vorherigen Arbeitspaket. Es werden Heizelemente mit Kupferkabel sowie Kupferklebeband hergestellt, um den Einfluss der Kontaktierung auf die elektrischen Eigenschaften der Heizelemente zu analysieren.

Anschließend wird die Kontaktierungsposition variiert. Die Positionierung der Kontaktierung mittig zwischen statt auf den Vlieslagen kann ebenfalls den elektrischen Widerstand des Heizelements beeinflussen (siehe Abbildung 5.2).



Abbildung 5.2: Variation der Position der Kontaktierung oben (links) oder mittig (rechts)

Durch die Vergrößerung der Kontaktfläche verringert sich der Kontaktwiderstand, was den Stromfluss durch das Heizelement vereinfacht. Es wird erwartet, dass sich dieses Verhalten auch bei der Untersuchung der hergestellten rCF-basierten Heizelemente zeigt.

Zusätzlich werden unterschiedliche Vliesgrammaturen sowie mehrere Ausrichtungsvarianten untersucht, um den Einfluss der Dichte und der herstellungsbedingten Anisotropie des rCF-Vlies auf die elektrischen Eigenschaften und der daraus resultierenden Temperaturentwicklung des Heizelements zu untersuchen. Der mögliche Einfluss der Dichte auf den Widerstand des Heizelements beruht auf der in größerer Zahl vorhandenen Kontaktstellen, die einen gleichmäßigen, unbehinderten Stromfluss und somit auch eine gleichmäßige Wärmeverteilung im Heizelement erzielen können.

Abbildung 5.3 zeigt die Ausrichtungsvarianten der Heizelemente. Bezugspunkt ist die Maschinenrichtung des rCF-Vlies, welche durch die Pfeile gekennzeichnet ist. Es wird unterschieden, ob die Maschinenrichtung parallel (0°) oder orthogonal (90°) zur Kontaktierungsfläche liegt. Jedes Heizelement besteht aus zwei Vlieslagen in der entsprechenden Ausrichtung. Lediglich der Kreuzverbund ($0^\circ/90^\circ$) kombiniert beide Ausrichtungsvarianten. Da sich im Produktionsprozess mehr Fasern entlang der Maschinenrichtung ausrichten, ist das Verhalten des rCF-Vlieses richtungsabhängig. Diese Anisotropie in der Faserverteilung führt dazu, dass ein Widerstandsunterschied zwischen den Ausrichtungsvarianten erwartet wird.

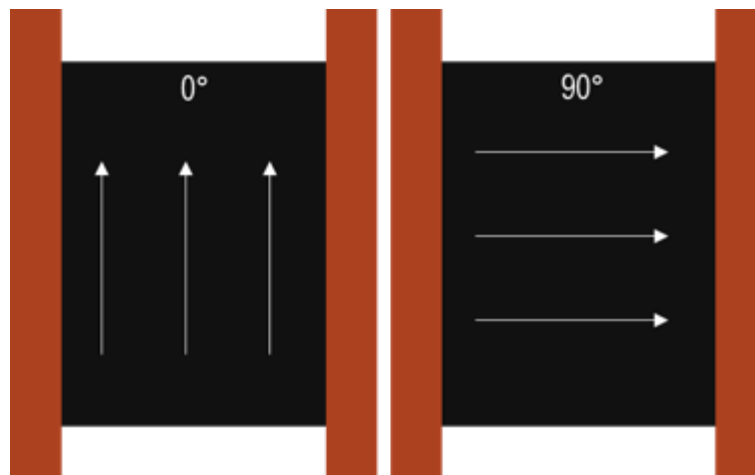


Abbildung 5.3: Ausrichtung der rCF-Vliese im Heizelement

Gleiches gilt für die Änderung der Länge der Kontaktstellen. Die Vergrößerung der Kontaktfläche kann auch in diesem Fall zu einer Verbesserung der Stromleitung und somit einem geringeren Widerstand führen. Zusätzlich wird ein Einfluss der Breite des Heizelements bzw. dem Abstand zwischen den Elektroden auf den Widerstand erwartet.

5.3 Herstellung des Flächenheizelements

Nach der Aufstellung des Versuchsplans erfolgt die Herstellung der verschiedenen Flächenheizelemente gemäß den definierten Parametern aus dem vorherigen Arbeitspaket. Um eine sichere, elektrische Isolierung zu gewährleisten, müssen die kontaktierten rCF-Vliese in einen elektrisch isolierenden Verbund eingebettet werden. Im Zuge der Werkstoffauswahl in AP 2 wurde zusätzlich zum Einsatz des elektrisch isolierenden Glasfasergewebes ein Epoxidharzsystem, aufgrund der hohen Temperaturbeständigkeit für die Anwendung im Heizelement ausgewählt. Durch die Verwendung von rCF-Vliesen bietet sich der Einsatz typischer Fertigungsverfahren aus dem Bereich der FKV-Verarbeitung für duromere Matrixpolymere an. Im Projekt wurde das Resin Transfer Moulding (RTM), Handlaminieren und das Prepreg-Pressen für die Herstellung der Heizelemente in Betracht gezogen. Eine sorgfältige Behandlung der Kontaktierung ist bei der Herstellung von Heizelementen von besonderer Bedeutung, um Beschädigungen der Kontaktierung während des Fertigungsprozesses zu vermeiden.

Im ersten Schritt wurde der Einsatz des RTM-Verfahrens für die Herstellung der Flächenheizelemente untersucht. Es zeigten sich jedoch einige Herausforderungen bei der Fertigung. Da die Enden der Kontaktierung nicht mit dem elektrisch

isolierenden Polymer in Kontakt kommen dürfen, müssen diese während der Fertigung aus dem Werkzeug herausgeführt werden. Jedoch ist dann aufgrund der Geometrie des Werkzeugs keine Abdichtung möglich, was aufgrund des unzureichenden Vakuums zu porösen, qualitativ minderwertigen Bauteilen führt. Zudem ist die Fertigung mittels RTM mit hohem zeitlichen und somit auch finanziellem Aufwand verbunden, so dass sich dieses Verfahren nicht für die Herstellung der Heizelemente eignet.

Handlaminieren ist ein manuelles Fertigungsverfahren für Faserverbundwerkstoffe (FKV), bei dem Harz als Matrixpolymer schichtweise auf konfektionierte Faserlagen aufgetragen wird.

Zur Imprägnierung der Faserlagen mit Harz sind eine Reihe von Arbeitsschritten erforderlich, die sorgfältig durchgeführt werden müssen, um eine hohe Qualität zu gewährleisten. Zunächst muss der Harz- und Härteranteil exakt berechnet und sorgfältig abgewogen werden, bevor beide Komponenten gründlich miteinander vermischt werden können. Um eine optimale Mischung zu erreichen, empfiehlt es sich, das Gemisch für mindestens 15 Minuten im Vakuum zu entgasen. Die kontaktierten rCF-Vlieslagen werden zwischen jeweils eine Lage elektrisch isolierendem Glasfasergewebe platziert und lagenweise mit dem reaktiven Matrixpolymer durchtränkt. Das Einarbeiten des Matrixpolymers in die Faserhalbzeuge erfolgt vorsichtig mit einer Rolle, um eine optimale Imprägnierung zu gewährleisten. Dabei ist eine gleichmäßige Verteilung des Gemisches über die gesamte Fläche der Faserhalbzeuge von größter Bedeutung. Die Aushärtung der Heizelemente erfolgt unter einem Druck von 1 bar zwischen beheizten Werkzeugplatten mit einer Temperatur von 130°C für 30 Minuten. Handlaminierete Heizelemente zeichnen sich durch eine gute Oberflächenqualität aus, jedoch erfordert die Fertigung viel Handarbeit. Dies resultiert in einem zeitaufwändigen Herstellungsprozess und stellt somit keine industrielle Alternative dar. Ein weiterer Nachteil des Handlaminierens besteht darin, dass Heizelemente tendenziell einen höheren Gehalt an Poren aufweisen. Diese Poren können möglicherweise die Eigenschaften der Heizelemente beeinflussen.

Eine weitere Möglichkeit zur Herstellung der Heizelemente ist das Prepreg-Pressen. Dabei handelt es sich um ein Fertigungsverfahren zur Herstellung von Faserverbundwerkstoffen (FKV) mit vorimprägnierten Faserplatten, den sogenannten Prepregs. Im Prepreg-Pressverfahren werden die Prepregs in eine Form gelegt und unter hohem Druck und Temperatur ausgehärtet. Durch die Kombination von Harz und Faser wird eine sehr hohe Festigkeit und Steifigkeit des Endprodukts erreicht. Im Vergleich zum Handlaminieren ist das Verfahren zur Herstellung von Heizelementen mit Prepregs fertigungstechnisch besser umsetzbar.

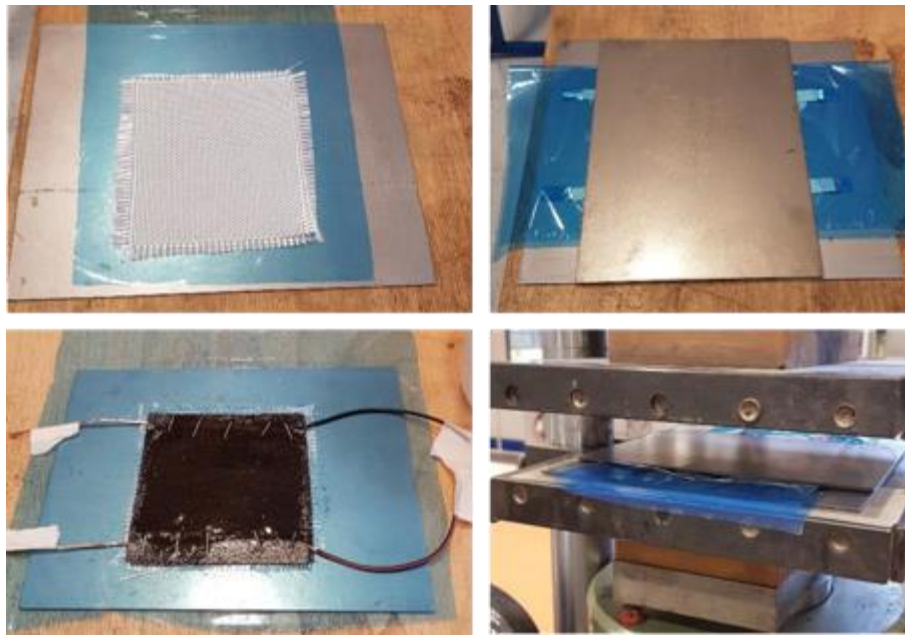


Abbildung 5.4: Herstellung eines Hezelements mittels Handlaminieren

Zunächst werden die Prepregs sowie das rCF-Vlies konfektioniert. Es werden jeweils zwei Lagen Glasfaser-Prepregs beidseitig auf die gestapelten rCF-Vliese aufgebracht. Der gestapelte Verbund wird anschließend mit einer Rolle bearbeitet, um mögliche Luftpockets zu vermeiden, die einen Einfluss auf die Eigenschaften des Hezelements haben können. Das Harz der Prepregs ist hochviskos, so dass die gestapelten Lagen gegen Verrutschen gesichert sind, was den Transfer des Verbunds in das beheizte Werkzeug der Presse vereinfacht. Die Behandlung der Werkzeugflächen mit Trennmittel oder der Einsatz von Trennfolie ist sinnvoll, um eine einfache Entformung der Hezelemente aus dem Werkzeug zu erreichen. Das in der Presse befindliche Werkzeug ist auf eine Verarbeitungstemperatur auf 130 °C temperiert. Die Einstellung der Presskraft erfolgt kraft geregelt und beträgt 1 bar. Die Hezelemente werden 30 Minuten ausgehärtet.

Gegenüber dem Handlaminieren bietet das Verfahren mehrere Vorteile, wie zum Beispiel eine höhere Genauigkeit und Reproduzierbarkeit, eine bessere Qualität der Oberflächenstruktur sowie eine kürzere Fertigungszeit. Daher erfolgt die Herstellung der Flächenhezelemente im weiteren Verlauf des Projekts mit Hilfe des Prepreg-Pressens.

5.4 Validierung der Leistungsdaten des Flächenheizelements

Nach erfolgter Kontaktierung und Herstellung der Flächenheizelemente werden die elektrischen Leistungsdaten, wie der Widerstand sowie die Wärmeentwicklung bei entsprechenden elektrischen Randbedingungen untersucht. Gleichzeitig erfolgt die Validierung der gleichmäßigen Wärmeverteilung durch Untersuchungen mit einer Thermographiekamera. Die gezeigten Temperatur-Zeit-Diagramme werden im Rahmen der Thermographieuntersuchungen aufgezeichnet. Die Ergebnisse werden zur iterativen Optimierung der Auslegung der Flächenheizelemente genutzt und die Untersuchungen für die jeweiligen Varianten erneut durchgeführt.

Die Widerstandsmessungen erfolgen auf indirektem Weg über die Messung der anliegenden Spannung und des fließenden Stroms über das Datenerfassungssystem Genesis 3i des Herstellers HBM. Die Berechnung des Widerstands erfolgt nach dem Ohmschen Gesetz

$$U = R \cdot I \quad 5-1)$$

Als Stromquelle für sämtliche Messungen wurde das Schaltnetzteil SPS9400 des Herstellers Manson mit einer Spannung von 12 V genutzt.

Kontaktierungsvariante

Die Konzeptentwicklung in AP 3.1 hat zwei mögliche Konzepte zur Umsetzung hervorgebracht, deren Einfluss auf den elektrischen Widerstand der Heizelemente anhand der Ergebnisse in Abbildung 5.5 gezeigt wird. In den hergestellten Heizelementen wird rCF-Vlies mit einer Grammatur von 20 g/m² eingesetzt und bei der Herstellung ein Pressdruck von 1 bar verwendet.

Es ist zu sehen, dass die Messergebnisse des Widerstands bei der Kontaktierung mit Kupferkabeln deutlich höher liegen als bei gleichen Heizelementen gleichen Aufbaus, deren Kontaktierung auf dem Einsatz von leitfähigem Kupferklebeband basiert. Dieser Sachverhalt beruht auf der konstant ausgeprägten Kontaktfläche, die aus dem Applizieren und Verpressen des Kupferklebebands mit einer Kunststoffrolle resultiert. Die effektive Kontaktfläche ist im Vergleich zum Kupferkabel deutlich größer.

Aufgrund der geringeren Widerstandswerte und der fertigungstechnischen Randbedingungen wurde die Verwendung von Kupferklebeband anstelle des Kupferkabels für die weiteren Untersuchungen in diesem Forschungsvorhaben gewählt.

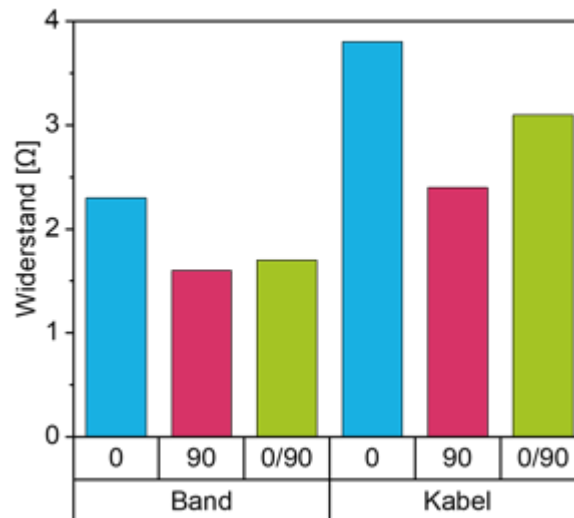


Abbildung 5.5: Ermittelte Widerstände der Kontaktierungsalternativen unter Berücksichtigung der Ausrichtung der rCF-Vlieslagen bei 20 g/m²

Position der Kontaktierung

Die Kontaktierung mittels Kupferklebeband erfolgt auf einer der beiden rCF-Vlieslagen, die im Heizelement verwendet werden. Die zweite Lage des rCF-Vlies kann oberhalb oder unterhalb der kontaktierten Lage erfolgen, so dass zwei Varianten der Positionierung unterschieden werden. Entweder befindet sich das Kupferband zwischen beiden Lagen, hier bezeichnet als Mitte, oder aber oberhalb der Lagen (Oben).

Durch die mittige Positionierung kann eine Vergrößerung der Kontaktfläche des Heizelements erreicht werden. Dies zielt auf die Verringerung des Kontaktwiderstands ab. In Abbildung 5.6 sind die Widerstandsmessergebnisse in Abhängigkeit der Position und der Ausrichtungsvariante dargestellt.

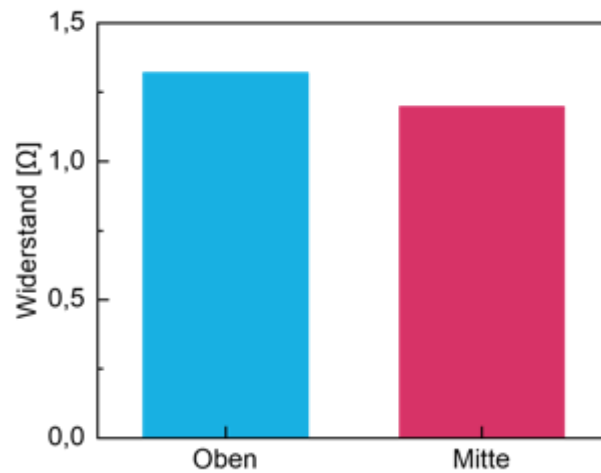


Abbildung 5.6: Einfluss der Position des Kupferklebebands auf den Widerstand der Heizelemente

Es ist zu erkennen, dass die Position des Kupferklebebands einen Einfluss auf den Widerstand hat. Durch die mittlere Positionierung und der mutmaßlichen Vergrößerung der Kontaktfläche werden insgesamt geringere Widerstände erzielt als bei der Variante „Oben“. Infolge der Widerstandsänderung weist das Heizelement mit mittiger Kontaktierung eine höhere Leistung auf, was sich im zugehörigen Temperatur-Zeit-Diagramm als Unterschied der Maximaltemperatur nach 5 Minuten ablesen lässt.

Im weiteren Verlauf des Projekts wurde die mittige Positionierung für die Herstellung der Heizelemente angewendet.

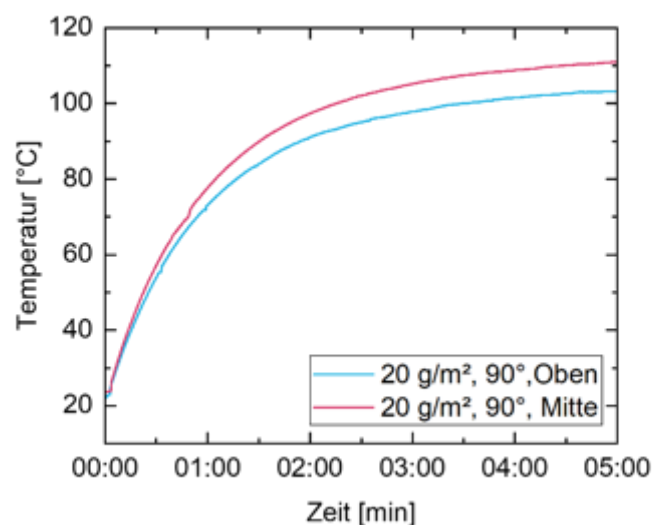


Abbildung 5.7: Temperatur-Zeit-Diagramm der Heizelemente mit variiertem Kontaktierungsposition

Vliesgrammatur

Abbildung 5.8 zeigt die Ergebnisse der Widerstandsmessungen der unterschiedlichen rCF-Vliesgrammaturen. Es ist zu erkennen, dass dieser bei einem Flächengewicht von 10 g/m² mit 5,29 Ω deutlich höher ist als bei den Varianten mit Grammaturen von 20 bzw. 30 g/m² mit 1,19 Ω sowie 1,18 Ω. Dies ist auf die geringe Dichte des 10 g/m²-Vlies zurückzuführen, da in diesem Fall die Anzahl der Kontaktstellen zwischen den Fasern untereinander deutlich geringer ist. Der Stromfluss wird dadurch behindert, woraus hohe Widerstandswerte resultieren. Die Erhöhung der Grammatur hat einen deutlichen Einfluss auf das elektrische Verhalten der Heizelemente, jedoch ist zwischen den 20 und 30 g/m²-Varianten nur ein geringer Unterschied erkennbar. Die weiteren Ausrichtungsvarianten zeigen analoges Verhalten. Das aus der Thermographiemessung der oben genannten Heizelemente resultierende Temperatur-Zeit-Diagramm (Abbildung 5.9) zeigt den deutlichen Einfluss der Grammatur des Heizelements auf die erreichbare Temperatur. Bei Betrachtung der Thermographieaufnahmen sind Unterschiede zwischen den verwendeten Grammaturen erkennbar. Während die 20 und 30 g/m²-Heizelemente eine homogene Wärmeverteilung aufweisen, sind bei der 10 g/m²-Variante gleicher Ausrichtung deutliche Temperaturunterschiede zu erkennen. Möglicherweise resultieren diese Temperaturunterschiede im Heizelement aus herstellungsbedingten Schwankungen. Es ist sowohl denkbar, dass das rCF-Vlies produktionsbedingt Dichteschwankungen unterliegt, weshalb es zu lokalen Widerstandsschwankungen durch die Änderung der möglichen Kontaktstellen kommt. Zudem besteht die Möglichkeit, dass Lufteinschlüsse oder Poren bei der Verarbeitung der Heizelemente in Kombination mit Prepregs zu einer lokalen Erhöhung des Widerstands des Heizelements durch weniger Kontaktstellen bzw. dem Auftreten von Störstellen im Vlies führt. Die Erhöhung des Widerstands schlägt sich dann in einer lokalen Temperaturabweichung nieder. Die vorliegenden Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass das rCF-Vlies mit einem geringen Flächengewicht von 10 g/m² nicht für den Einsatz in Heizelementen geeignet ist. Aufgrund dessen wird bei den weiteren Untersuchungen auf die Fertigung von Heizelementen auf Basis dieser Vliesgrammatur verzichtet.

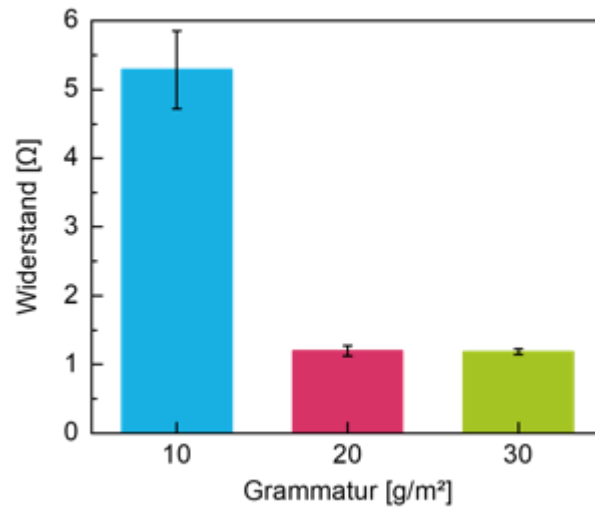


Abbildung 5.8: Ermittelter Widerstand der Grammaturen des rCF-Vlies bei einer Ausrichtung von 90°

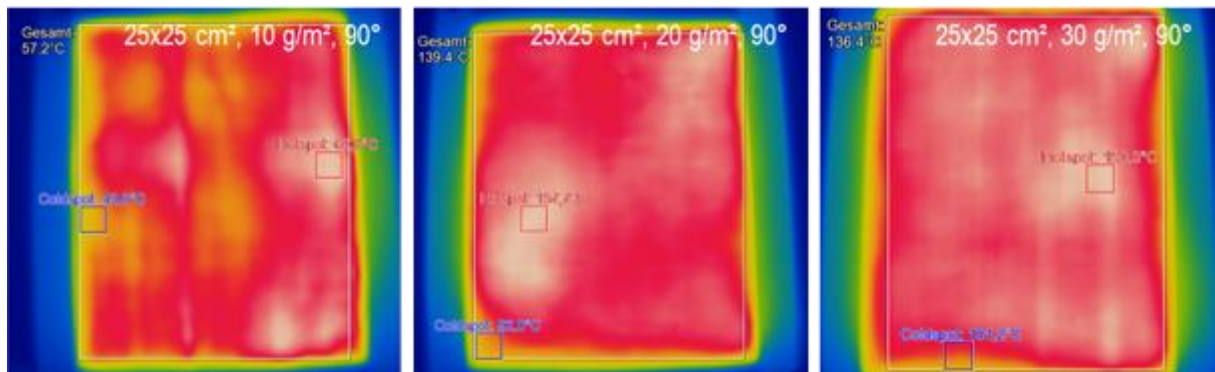
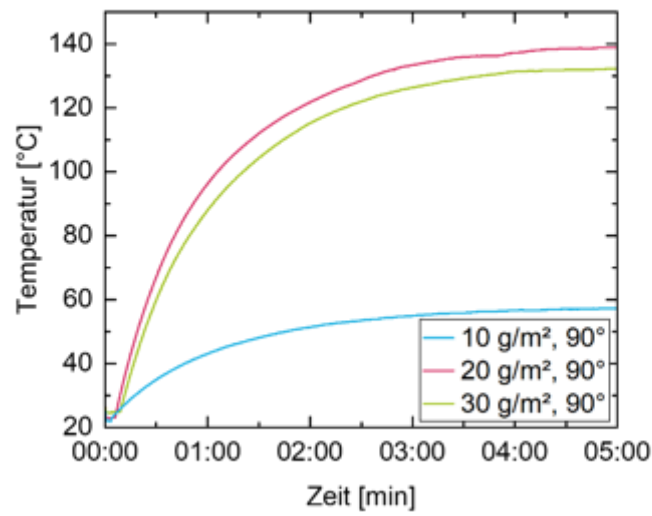


Abbildung 5.9: Temperatur-Zeit-Diagramm und Thermographieaufnahmen der Heizelemente unterschiedlicher Grammaturen aus Abbildung 5.8

Vliesausrichtung

Abbildung 5.10 zeigt die Messergebnisse des Widerstands der Heizelemente in Abhängigkeit der Ausrichtung bei einem Flächengewicht von 20 g/m². Herstellungsbedingt ist ein höherer Faseranteil entlang der Maschinenrichtung des rCF-Vlies ausgerichtet. Die Ergebnisse zeigen, dass aus der Änderung der Ausrichtung der Lagen (vgl. Abbildung 5.3) ebenfalls Widerstandsänderungen resultieren. Da in 90°-Richtung mehr Fasern orthogonal zu den Kontaktstellen liegen, wird der Stromfluss im Heizelement erleichtert, weshalb der Widerstand dieser Heizelemente geringer ausfällt. Liegen rCF-Vlieslagen im Kreuzverbund [0°/90°] vor, liegt der Widerstand zwischen beiden uniaxialen Ausrichtungsvarianten. Das aus der Thermographiemessung der oben genannten Heizelemente resultierende Temperatur-Zeit-Diagramm (Abbildung 5.9) zeigt den deutlichen Einfluss der Ausrichtung des Heizelements auf die erreichbare Temperatur. Bei Betrachtung der Thermographieaufnahmen sind keine Unterschiede zwischen den Heizelementen mit entsprechender Ausrichtung erkennbar.

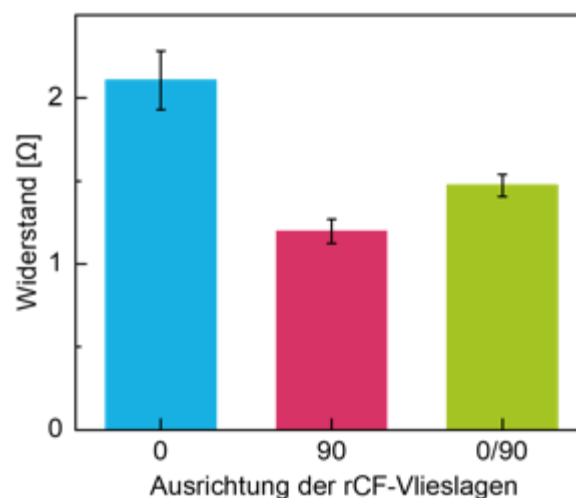


Abbildung 5.10: Ermittelter Widerstand bei verschiedener Ausrichtung bei einer Grammatur des rCF-Vlies von 20 g/m²

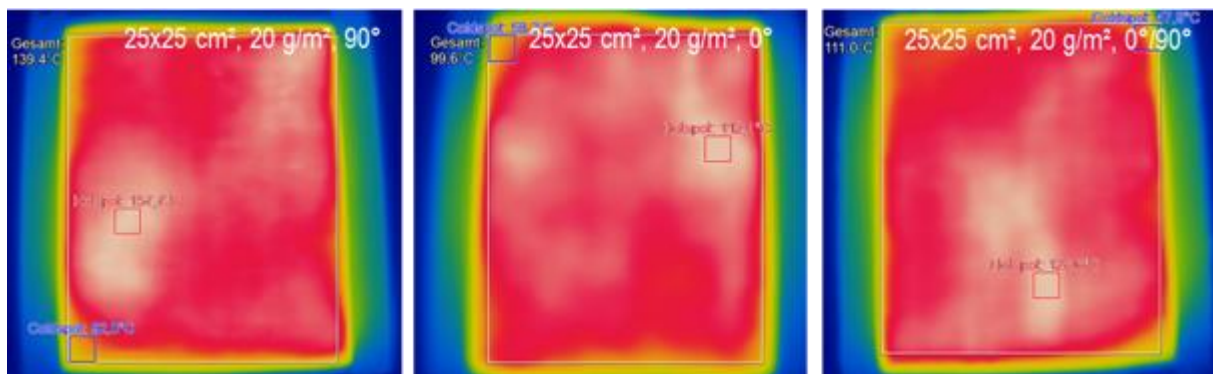
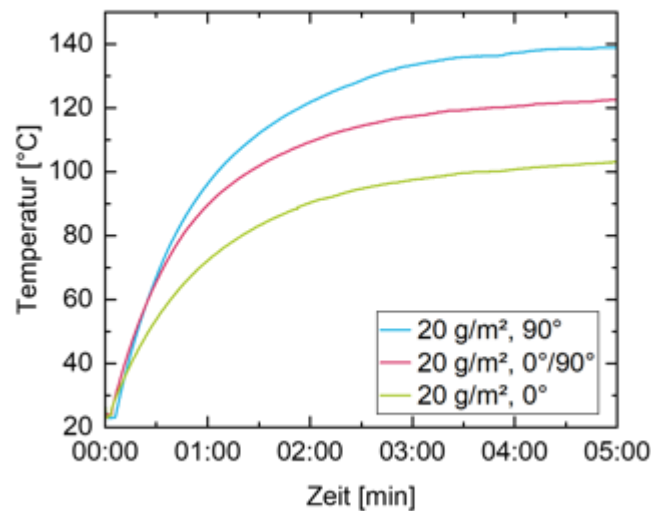


Abbildung 5.11: Temperatur-Zeit-Diagramm und Thermographieaufnahmen der Heizerelemente unterschiedlicher Ausrichtung

Größe der Heizerelemente

Infolge der Veränderung der Breite der Heizerelemente beziehungsweise des Abstands zwischen den Kontaktstellen sowohl bei gleichbleibender als auch bei Verlängerung der Kontaktfläche sind Widerstandsänderungen zu verzeichnen. In Abbildung 5.12 ist die Variation der Breite der Heizerelemente zwischen den Elektroden bei gleichbleibender Kontaktlänge der Heizerelemente von 25 cm zu sehen. Beispielhaft werden nur die Heizerelemente mit einem Flächengewicht von 20 g/m² und der Ausrichtung von 90° gezeigt. Von 15 cm auf 25 cm Breite bzw. Abstand zwischen den Elektroden steigt der Widerstand um 79,11 %, während die Vergrößerung der Breite auf 35 cm eine Erhöhung um 62,5 % nach sich zieht. Es zeigt sich, dass der Widerstand, wie erwartet, von der Länge des Leiters (rCF-Vlies) abhängig ist. Die Heizerelemente mit variiertem Flächengewicht und Aus-

richtung weisen analoges Verhalten auf. In den Thermographieaufnahmen in Abbildung 5.13 zeigt sich, dass die Homogenität der Wärmeentwicklung im Heizelement von dem Verhältnis zwischen Kontaktlänge und dem Abstand zwischen den Elektroden abhängig ist. Je größer der Abstand zwischen den Elektroden bei gleichbleibender Kontaktlänge ist, desto inhomogener ist die Wärmeverteilung im Heizelement insbesondere in der Mitte des Heizelements.

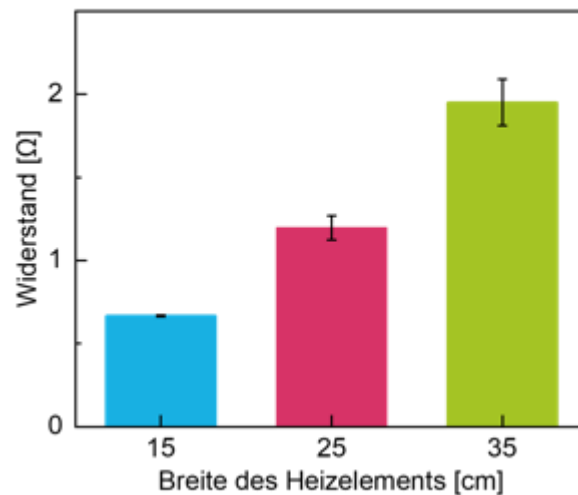


Abbildung 5.12: Ermittelter Widerstand der Heizelemente mit definierter Breite bei einer Kontaktlänge von 25 cm mit einem Flächen-gewicht von 20 g/m² bei 90°-Ausrichtung

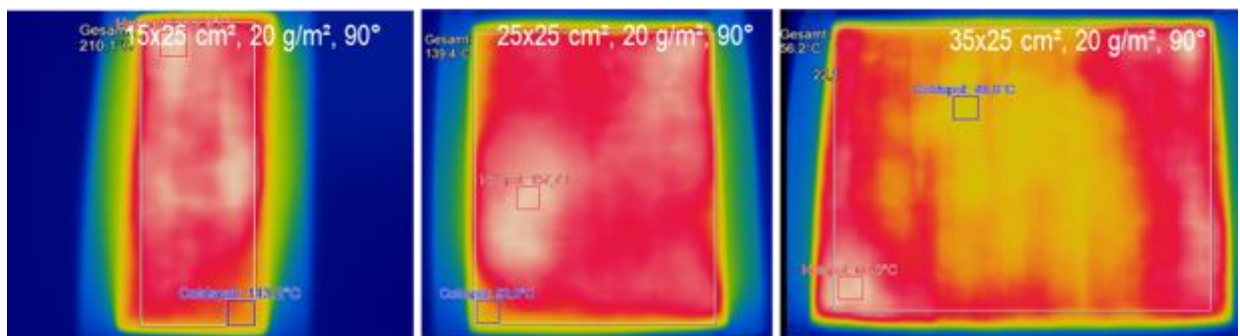
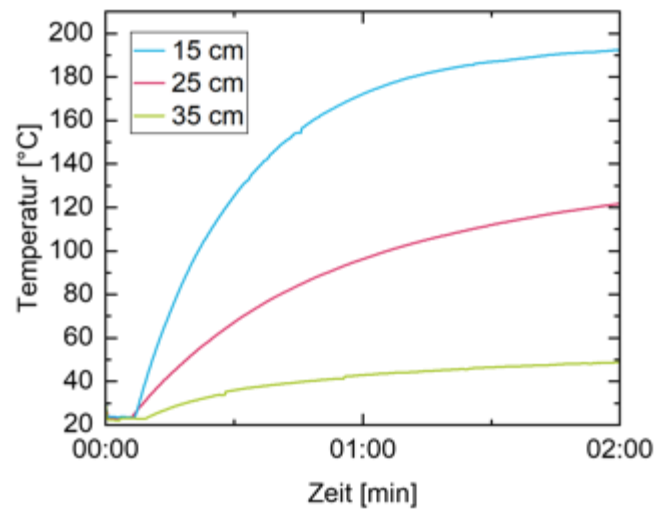


Abbildung 5.13: Temperatur-Zeit-Diagramm und Thermographieaufnahmen der Heizelemente unterschiedlicher Breite bei einer Kontaktlänge von 25 cm

Zusätzlich wurden Heizelemente mit einem konstanten Verhältnis zwischen Kontaktlänge und Elektrodenabstand von 1:1 gefertigt, deren Widerstandsmessergebnisse in Abbildung 5.14 zu sehen sind. Durch die Vervierfachung der Fläche von $12,5^2 \text{ cm}^2$ auf 25^2 cm^2 bzw. von 25^2 cm^2 auf 50^2 cm^2 steigt der Widerstand um 21,21 % bzw. 37,5 % an. Die Veränderung des Widerstands fällt bei diesen Varianten niedriger aus als bei größerem bzw. kleinerem Verhältnis zwischen Kontaktlänge und Breite des Heizelements. Die Temperatur-Zeit-Kurven zeigen deutliche Temperaturunterschiede an. Heizelemente mit geringer Breite und Kontaktlänge weisen sehr niedrige Widerstände auf, die mit hohen Aufheizraten zu Temperaturen oberhalb von 200 °C führen. Diese Temperaturbereiche liegen oberhalb des Einsatzbereichs des verwendeten Epoxidharzsystems, weshalb Ausgasungen und Rauchentwicklung bei längerem Betrieb dieser Heizelemente entstehen. Die Thermographiemessungen wurden daher nach 30 s abgebrochen. Folglich sind diese Heizelemente mit einem Widerstand von weniger als $1 \text{ }\Omega$ nicht für den Einsatz in der beheizbaren Hybridstruktur geeignet.

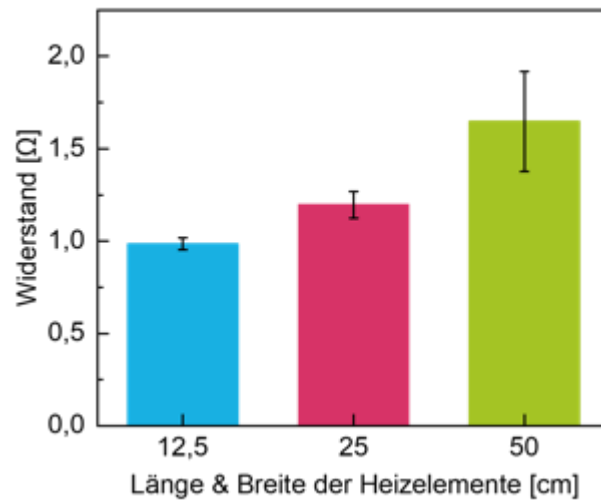


Abbildung 5.14: Ermittelter Widerstand der Heizelemente mit definierter Länge & Breite mit einem Flächengewicht von 20 g/m² bei 90°-Ausrichtung

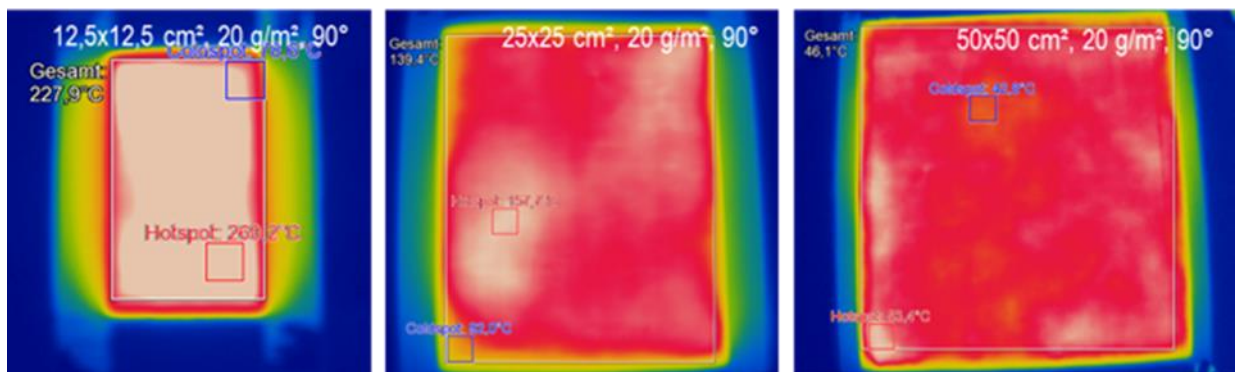
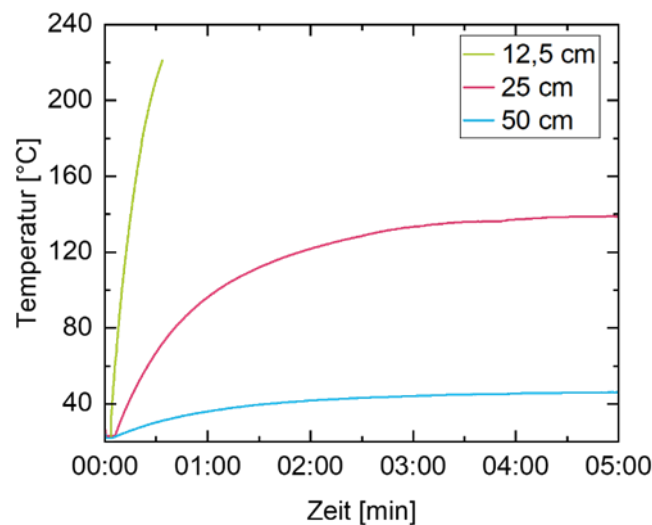


Abbildung 5.15: Temperatur-Zeit-Diagramm und Thermographieaufnahmen der Heizelemente mit definierter Länge und Breite

Unter Berücksichtigung der gewonnenen Erkenntnisse zum elektrischen Verhalten der Heizelemente kann je nach Anwendung ein geeignetes Heizelement entwickelt werden. Das Ziel ist die Erreichung eines Widerstands zwischen 1 und 2 Ω , die bei Bestromung mit 12 V zu ausreichender Wärmeentwicklung bei moderater Aufheizrate führen. Dies kann durch den Einsatz von zweilagigem 20 oder 30 g/m² Vlies in der 90°-Ausrichtung erzielt werden. Bezüglich der Größe der Heizelemente ist darauf zu achten, dass das Verhältnis zwischen Kontaktlänge und Elektrodenabstand weder zu groß noch zu klein ist. Für die Herstellung der Demonstratoren werden Heizelemente mit einer Grammaturn von 20g/m² und einer Ausrichtung von 90° mit geometrischen Abmessungen von 25² cm² sowie 50² cm² verwendet.

6 AP 4 – Demonstratorentwicklung

Im Arbeitspaket 4 steht die Entwicklung, Fertigung und Validierung des Demonstrators für den Einsatz in einem Campingfahrzeug im Fokus. Zum Ende des Arbeitspakets liegt der fertige Demonstrator sowie ein Nachweis der Funktionsfähigkeit vor.

6.1 Anforderungsgerechte Auslegung einer Bodenstruktur mit integriertem Heizelement

Zunächst erfolgt die Auslegung der Bodenstruktur des Campingfahrzeugs anhand der in Arbeitspaket 1.1 erarbeiteten Anforderungen und Lastfällen sowie der ausgewählten Werkstoffe aus Arbeitspaket 1.2. Ein wichtiger Aufgabenbereich ist die simulative Optimierung des hybriden Lagenaufbaus der ausgewählten Werkstoffe sowie des Flächenheizelements. Dabei werden insbesondere die Reihenfolge der Einzellagen sowie deren Dicke in Bezug auf mechanische und thermische Eigenschaften des Demonstrators simulativ ausgelegt.

Die Werkstoffauswahl in AP 2 dient als Basis für die Auslegung der Hybridstruktur. Die Auswahl entsprechender Schichtdicken wurde auch unter Berücksichtigung von Materialverfügbarkeit und Fertigungsrandbedingungen getätigt. Zur Berechnung und Bewertung der mechanischen Durchbiegung wurde ein Finite-Elemente Modell in Anlehnung an den Prüfstand (siehe Abbildung 6.7) erstellt. Das Modell besteht aus einem 2D-Schalenmodell, welche zentrisch durch eine kreisförmige Flächenlast beaufschlagt wird. Der Betrag der Flächenpressung folgt aus der Masse von 100 kg und der projizierten Auflage des kugelförmigen Impaktors zu $p = 0,3924\text{ MPa}$. Die Auflage entlang der Außenkante der Platte wird durch eine Festlagerung senkrecht zur Plattenebene abstrahiert. Die Modellabmessungen, sowie die Randbedingungen sind in Abbildung 6.1 zusammengefasst. Als Referenz für die Auslegung der Lagen des hybriden Demonstrators dient eine Bodenplatte aus Sperrholz mit einer Dicke von 15 mm . Für die Hybridstruktur wird ein Aufbau mit gleichem Platzbedarf im Fahrzeug angestrebt. Ein möglicher Lagenaufbau umfasst Holzdecklagen mit jeweils 4 mm sowie einem Polymerkern mit einer Dicke von 7 mm . Die berechnete Durchbiegung dieser Variante ist im Vergleich zu Referenz in Abbildung 6.2 gegenübergestellt.

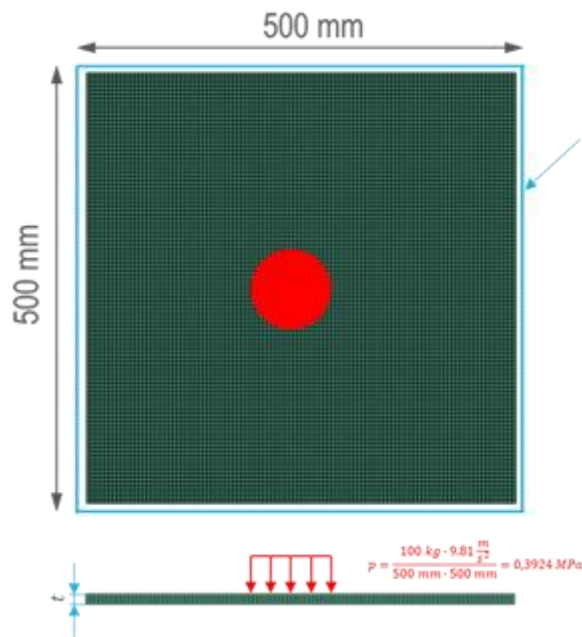


Abbildung 6.1: Aufbau und Randbedingungen des Finite-Elemente Modells zur Berechnung und Bewertung der Durchbiegung unter statischer Belastung

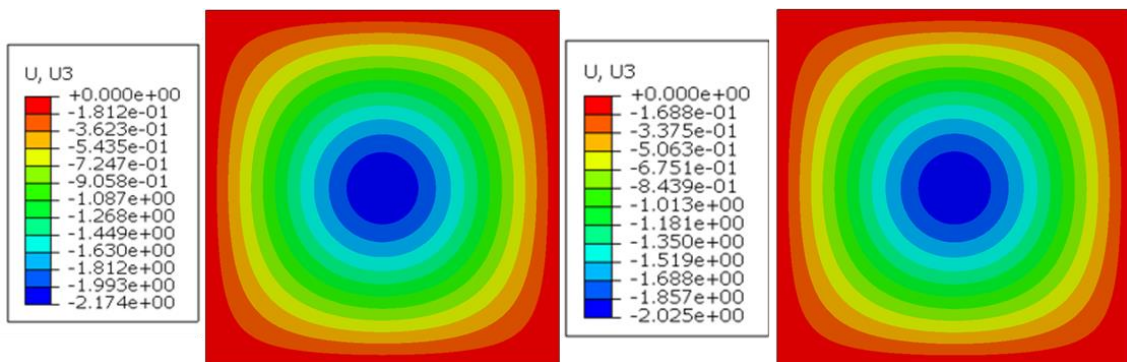


Abbildung 6.2: Simulativ berechnete Durchbiegung der Referenz (links) und des hybriden Demonstrators (rechts)

Die maximale Durchbiegung tritt im oben dargestellten Lastfall in der Mitte des Demonstrator auf. Diese beträgt bei der Referenz 2,02 mm, während die hybride Variante eine Durchbiegung von 2,17 mm aufweist. Der hybride Demonstrator erweist sich als steifigkeitsäquivalente Variante der Bodenplatte, so dass dieser Lageraufbau für die Fertigung als Demonstrator gewählt wird.

Zusätzlich zur mechanischen Simulation wurde zur Bewertung des thermischen Verhaltens des Schichtaufbaus ein ebenes (2D) Finite-Elemente Modell aufgebaut. Die instationäre Temperaturverteilung folgt durch die Vorgabe eines elektrischen Potentials an den freien Rändern. Die Ermittlung des elektrischen Wider-

stands erfolgte invers an einem 0,5 mm dicken rCF-Vlies, dessen Temperaturänderung unter Vorgabe eines elektrischen Potentials von 10 V anhand der Thermographiemessungen erfasst wurde.

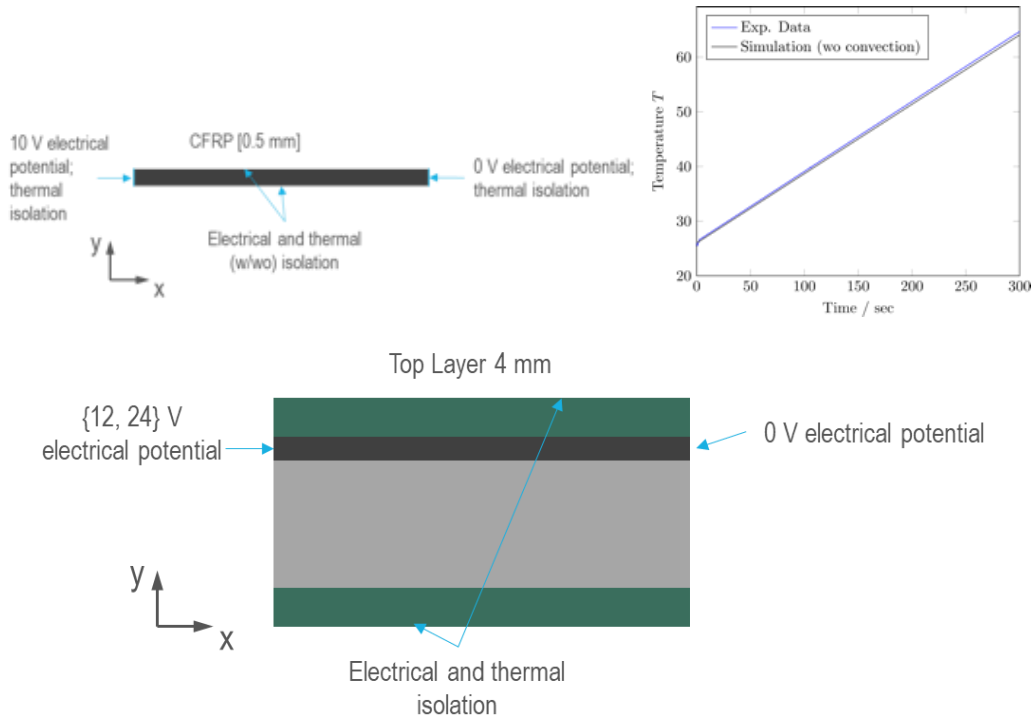


Abbildung 6.3: Definition des ebenen Finite-Elemente Modells zur Bewertung des thermischen Verhaltens unter Vorgabe eines elektrischen Potentials von 10 V

Der schematische Aufbau des ebenen Modells ist in Abbildung 6.3 dargestellt. Mit der ermittelten elektrischen Leitfähigkeit wurde der oben genannte Laminataufbau hinsichtlich Aufheizverhalten und Temperaturverteilung untersucht. In dem ebenen Modell wurde dazu eine Potentialänderung auf das Kohlenstofffaservlies aufgegeben. Für die restlichen Elemente des Aufbaus sind keine elektrischen Leitfähigkeiten hinterlegt, so dass diese Schichten vereinfachend als elektrisch isolierend angenommen wurden. Die inverse Kalibrierung der elektrischen Leitfähigkeit hat darüber hinaus gezeigt, dass die freie Konvektion an den Außenkanten vernachlässigbar ist. Entsprechend ist dies in den nachfolgenden Berechnungen übernommen worden. Der thermische Kontakt zwischen den einzelnen Schichten ist als ideal-leitend angenommen worden.

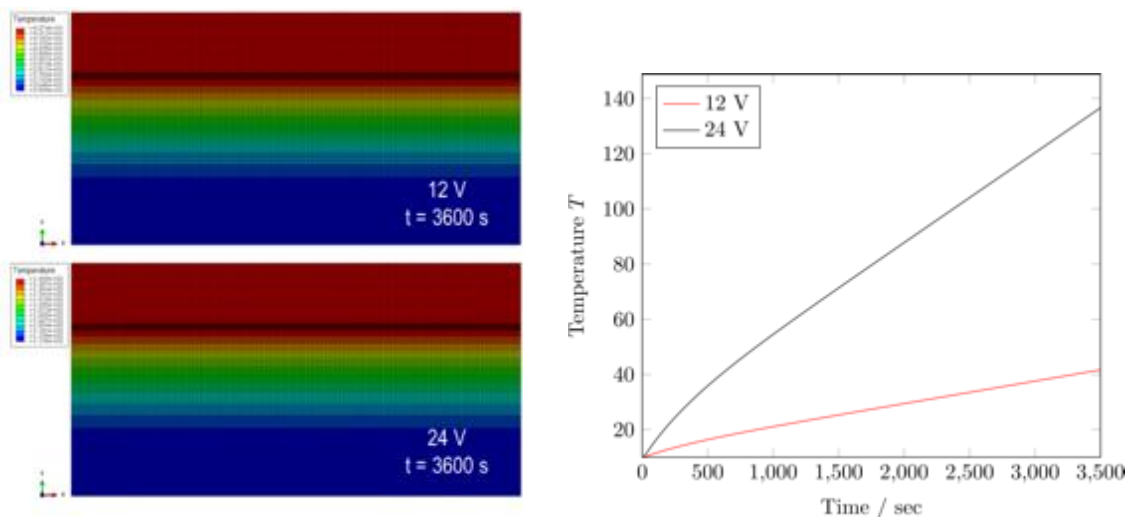


Abbildung 6.4: Theoretische Temperaturverteilung in Dickenrichtung des Hybridverbunds mit einer Dicke von 15 mm

In Abbildung 6.4 ist die simulativ ermittelte Temperaturverteilung innerhalb des hybriden Schichtverbunds für die elektrischen Potentiale von 12 V und 24 V dargestellt. Es stellt sich nach einer Dauer von 3600 s der gezeigte Zustand ein. Der Polymerschaumkern trägt zur ausreichenden thermischen Isolierung im Simulationsmodell bei.

6.2 Demonstratorfertigung und Eigenschaftvalidierung

Im Rahmen des Arbeitspakets liegt der Fokus auf der Fertigung des Demonstrators. Eine besondere Herausforderung ist dabei die Skalierung des Demonstrators sowie das Fügen der Einzellagen des hybriden Werkstoffverbunds. Zudem muss die Dimensionierung des einzelnen Flächenheizelements berücksichtigt werden. Es besteht die Möglichkeit pro Demonstrator ein großflächiges Heizelement einzusetzen oder aber auf mehrere in Reihe und parallel geschalteter, kleinerer Heizelemente zurückzugreifen.

Im zweiten Teil des Arbeitspaketes werden entsprechend der Anforderungsliste aus AP 1 Tests und Untersuchungen am Demonstrator durchgeführt, um so dessen Funktionalität zu validieren. Je nach Anforderung werden dazu beispielsweise mechanische Tests aber unter anderem auch Untersuchungen zur gleichmäßigen Wärmeverteilung, den Isolierungseigenschaften und der Brandsicherheit des Demonstrators durchgeführt. Am Ende dieses Arbeitspakets liegt der funktionsfähige Demonstrator mit validierten Eigenschaften vor.

Fertigung des Demonstrators

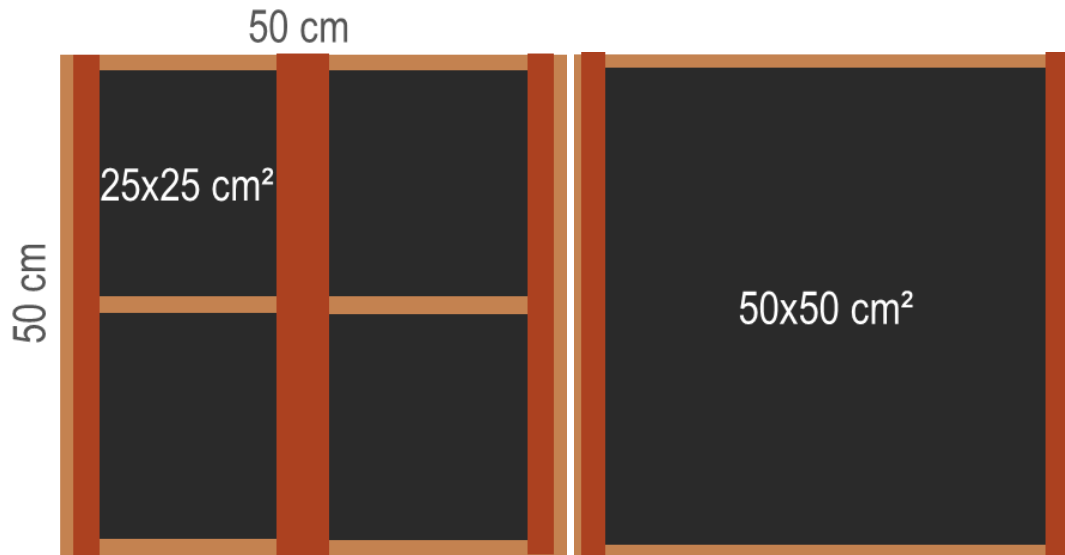


Abbildung 6.5: Layout der Demonstratoren bestehend aus Heizelementen (schwarz) mit Kontaktierung aus Kupferklebeband (dunkelbraun).

Im Rahmen des Arbeitspakets wurden zwei Demonstratoren mit einer Größe von 50 x 50 cm² hergestellt, wobei in einem Demonstrator lediglich ein Heizelement mit einer Abmessung von 50 x 50 cm² und beim anderen Demonstrator mehrere parallel und in Reihe geschaltete kleinere Heizelemente mit 25 x 25 cm² (siehe Abbildung 6.5) verwendet wurden. Um die Fügeverbindung zwischen Holz und Polystyrolschaum zu realisieren, wurde der epoxidbasierte Holzklebstoff aufgetragen und unter Druck ausgehärtet, ohne die Druckfestigkeit des Polymerschaums zu überschreiten. Anschließend wurden die in Reihe und parallel geschalteten Heizelemente durch Klemmverbindungen kontaktiert, um den Kontakt zur Stromquelle des Demonstrators herstellen zu können. Für das Erreichen einer vorgegebenen Zieltemperatur wurde ein Thermosensor in der Mitte des Demonstrators in einer dafür vorgesehenen Aussparung im Polymerschaum platziert und in den Heizregler zurückgeführt. Der Heizregler regelt die Temperatur durch das Öffnen und Schließen des Stromkreises. Die Heizelemente sowie die obere Holzlage wurde ebenfalls mittels Klebstoffauftrag gefügt und unter Druck für 12 Stunden ausgehärtet. Nachfolgend wurde die Messung der realen Leistungsdaten des Demonstrators mit den theoretischen Berechnungen (siehe Tabelle 6-1) verglichen, um sicherzustellen, dass die Heizelemente sowie die Kontaktierung intakt sind.

Tabelle 6-1: Theoretische Leistungsdaten der Demonstratoren

	25x25 cm ²	50x50 cm ²
Anliegende Spannung U [V]	12	12
Widerstand der Heizelemente R [Ω]	1,25	1,32
Gesamtwiderstand R_{ges} [Ω]	2,5	1,32
Stromstärke I [A]	4,8	9,09
Gesamtstromstärke I_{ges} [A]	9,6	9,09
Leistung des Demonstrators [W]	115,2	109,09
Leistung/m ² [W/m ²]	460,8	436,36



Abbildung 6.6: Demonstrator während der Fertigung und im betriebsbereiten Zustand

Abbildung 6.6 zeigt einen der gefertigten Demonstratoren. Die nach der Fertigung ermittelten Widerstände der Demonstratoren stimmen mit den theoretischen Berechnungen überein. Die Verlustleistung in der Verkabelung ist vernachlässigbar klein.

Statische Prüfung des Demonstrators

Ziel der statischen Prüfung ist die Ermittlung der maximalen Durchbiegung des hergestellten Gesamtverbunds durch die Belastung durch stehende oder kniende Personen. Im Prüfaufbau wird diese Belastung des Demonstrators anhand einer definierten und in einer Gleitführung bewegten Masse mit einer Kugelkalotte abstrahiert. Das Gesamtgewicht zur Belastung des Demonstrators beträgt 101,94 kg ($\hat{=} 1000 \text{ N}$ bei $g = 9,81 \text{ m/s}^2$). Der Demonstrator wird auf die Rahmenstruktur aufgelegt. Eine auf der Unterseite angebrachte Messuhr erfasst die Durchbiegung mit Genauigkeit von 0,01 mm.

Während des Versuchs wird die Masse langsam heruntergefahren und auf die Oberfläche des Demonstrators aufgelegt, so dass der Kraftangriffspunkt in der Mitte des Demonstrators liegt. Die auftretende, relative Verschiebung wird auf der darunter befindlichen Messuhr abgelesen. Die Belastung des Demonstrators resultiert in einer Durchbiegung von 3,18 mm nach dem Auflegen der Masse. Da Holzwerkstoffe ein ausgeprägtes viskoelastisches Materialverhalten aufweisen, wird die statische Prüfung für 30 Minuten durchgeführt und mögliche zeitbedingte Veränderungen in der Durchbiegung protokolliert. Es zeigt sich jedoch, dass kein Kriechen des Werkstoffs stattfindet und somit die Durchbiegung konstant bei 3,18 mm liegt. Durchgeführte Kontrollmessungen am selben Demonstrator deuten auf das gleiche Verhalten hin.

Nach Entlastung federt der Demonstrator auf die ursprüngliche Durchbiegung zurück. Nach der Entlastung ist demnach keine bleibende Verformung festzustellen. Abbildung 6.7 zeigt den Demonstrator nach Abschluss der statischen Prüfung und es sind keine Schäden an der Decklage aufgrund der Belastung zu erkennen. Die Druckfestigkeit der Decklage ist ausreichend für die Anwendung als Fußboden.

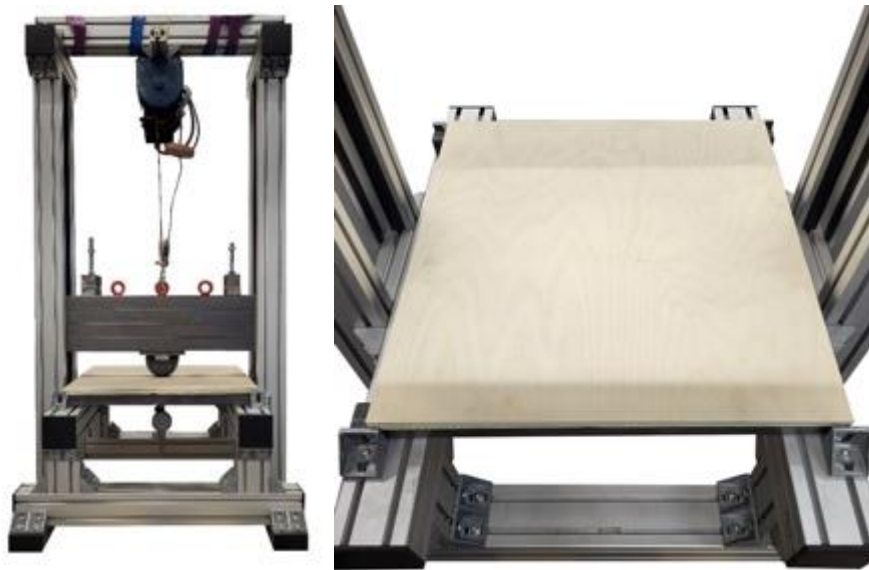


Abbildung 6.7: Demonstrator während der Belastung und dessen Oberfläche nach Abschluss der statischen Prüfung

Thermische Untersuchung

Durch die Integration des Heizelementes in die Hybridstruktur wird erwartet, dass sich die Aufheizrate verringert und sich somit erst nach längerer Zeit die Temperatur des Heizelement auch an der Oberfläche der Decklage auf Holz einstellt. In DIN EN 1264 sind Oberflächentemperaturen als Grenztemperaturen geregelt, die nicht überschritten werden dürfen:

- Daueraufenthaltsbereiche für Personen: 29°C
- Nassräume bzw. im Barfußbereich: 33°C

Aufgrund dessen wird die Temperatur der Demonstratoren mit Hilfe eines entwickelten Heizreglers der Fa.Hotset geregelt. Dieser wird bei den ersten Versuchen auf eine Zieltemperatur von 40 °C eingestellt.

Die Thermographieaufnahmen der Demonstratoren (siehe Abbildung 6.8 Abbildung 6.9) weisen unterschiedliches Verhalten auf. Da die Leistung des in Abbildung 6.8 gezeigten Demonstrators höher ist, wird folglich auch eine höhere Temperatur nach 10 Minuten Betrieb erzielt. Jedoch wird durch die Holzdecklage keine Homogenisierung der Temperatur in der Fläche erreicht, da die integrierten Heizelemente auch nach dem Einstellen der Maximaltemperatur weiterhin erkennbar sind. Aufgrund des großflächigen Heizelements ist dieser Effekt bei der Prüfung des Demonstrators aus Abbildung 6.9 nicht zu erkennen. Ein vergleichender Blick auf den Unterschied durch die thermisch isolierende Schicht aus

Polymerschaum zeigt bei beiden Varianten einen Temperaturunterschied von 9,5 °C zwischen der unisolierten Oberseite und isolierten Unterseite.

Die Temperatur-Zeit-Kurven der Demonstratoren weisen im Vergleich zu unverbauten Hezelementen eine deutlich geringe Aufheizrate auf (siehe Abbildung 6.10). Dies ist auf die zusätzliche Erwärmung der verwendeten Werkstoffe im Demonstrator zurückzuführen.

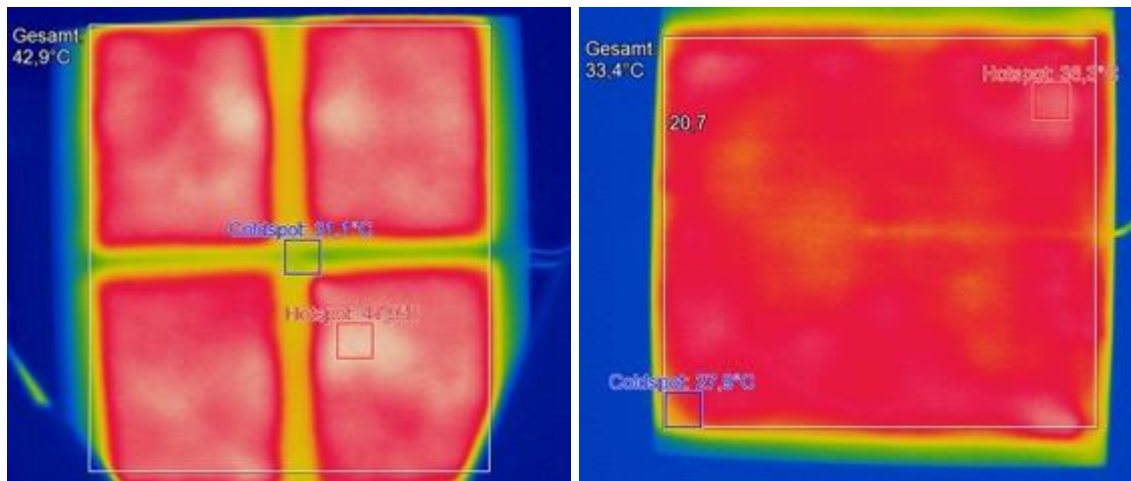


Abbildung 6.8: Thermographiaufnahmen der thermisch unisolierten Oberseite (links) und isolierten Unterseite (rechts) des Demonstrators (4x25 cm²). Die Zieltemperatur des Reglers beträgt 40°C.

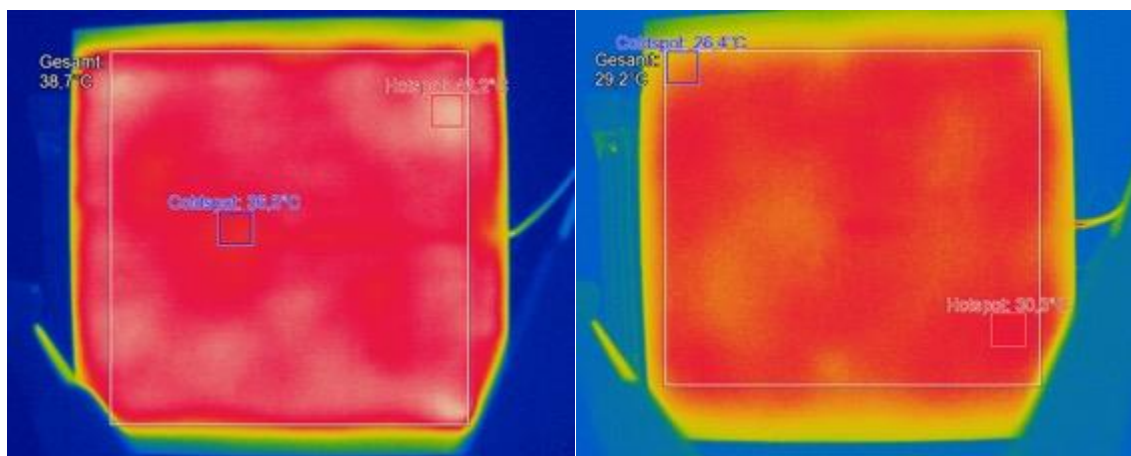


Abbildung 6.9: Thermographiaufnahmen der thermisch unisolierten Oberseite (links) und isolierten Unterseite (rechts) des Demonstrators (50x50 cm²). Die Zieltemperatur des Reglers beträgt 40°C.

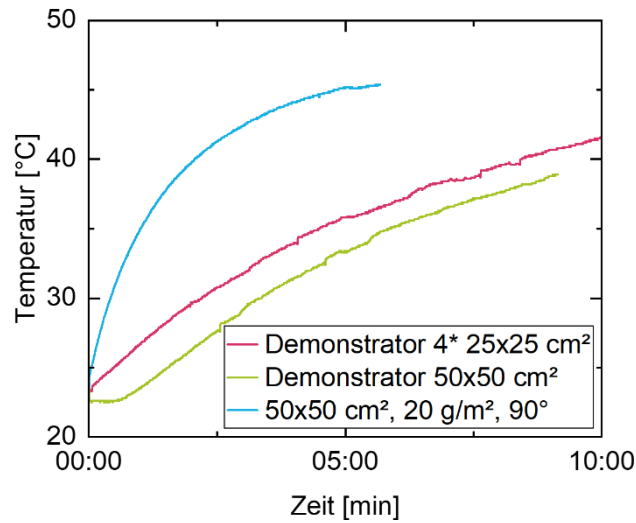


Abbildung 6.10: Temperatur-Zeit-Diagramme beider Demonstratoren und des im 50x50 cm²-Demonstrator verbauten Heizelement vor der Integration in die Hybridstruktur

In weiteren Iterationsschleifen wird die Anpassungen der Zieltemperatur des Heizreglers untersucht. Ziel ist es eine Oberflächentemperatur von 30° nicht zu überschreiten. Da die Position des Thermosensor im Demonstrator nicht zwangsläufig mit dem Bereich der höchsten Temperatur übereinstimmt, wurde die Zieltemperatur des Reglers auf 28 °C eingestellt.

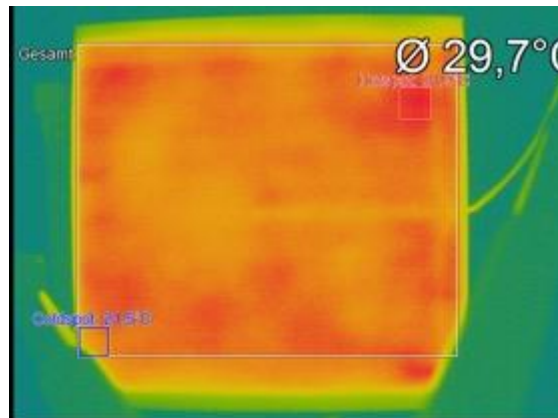


Abbildung 6.11: Thermographieaufnahme des Demonstrators bei einer Zieltemperatur von 28 °C.

Die Temperaturmessung (siehe Abbildung 6.11) ergibt für diese Einstellung des Heizreglers eine durchschnittliche Temperatur von 29,7 °C. Auch einzelne Hot-spots auf der Oberfläche des Demonstrators überschreiten nicht die für den Barfußbereich definierte Obergrenze von 33 °C.

7 Fazit

Ziel dieses Projektes war die Entwicklung einer hybriden Leichtbaustruktur mit funktionsintegriertem Heizelement für den Einsatz in der Bodenbeheizung eines Campingfahrzeugs. Dazu wurde sich die elektrische Leitfähigkeit der Kohlenstofffasern zu Nutze gemacht, um durch Bestromung Joulesche Wärme im Heizelement zu generieren.

Die zu Beginn des Projektes erarbeitete Anforderungsliste berücksichtigt die mechanischen, elektrischen und thermischen Anforderungen an die Fußbodenheizung im Campingfahrzeug. Diese Anforderungsliste wurde als Basis für die darauffolgende Auswahl der solitären Werkstoffe, die einzelne geforderte Eigenschaften abdecken und in Kombination in einem funktionsfähigen Demonstrator der Fußbodenheizung resultieren. Der Anspruch des ökologischen Leichtbaus wurde in der Auswahl der Werkstoffe, soweit möglich, berücksichtigt. Die Decklagen, die für die nötige Steifigkeit des Demonstrators sorgen, bestehen aus dem nachwachsenden Rohstoff Holz.

Anschließend erfolgte die Entwicklung des Heizelements. Es wurden zunächst verschiedene Konzepte zur elektrischen Kontaktierung der Heizelemente ausgearbeitet und auf Eignung geprüft. Es hat sich gezeigt, dass die Applikation von leitfähigem Kupferklebeband gegenüber dem Einsatz von Kupferkabeln sowie dem Aufspritzen von Metallpartikeln sowohl während der Fertigung als auch bezüglich der elektrischen Eigenschaften und der Erzielung einer konstanten, sicheren Kontaktierung von Vorteil ist. Die Kontaktierung mittels leitfähigem Kupferklebeband wurde im weiteren Verlauf für die Auslegung der Heizelemente verwendet. Die Auslegung der Heizelemente erfolgte durch Variation diverser Parameter. Dabei wurde unter anderem das Flächengewicht des rCF-Vlies, die Ausrichtung der Vlieslagen zwischen den Kontaktstellen sowie die Größe der Heizelemente variiert und deren Einfluss auf die erzielbare Heizleistung untersucht. Zudem stand die homogene Temperaturverteilung der Heizelemente im Fokus der Untersuchungen. Anhand der Thermographieaufnahmen der Heizelemente konnte gezeigt werden, dass die Nutzung von rCF-Vlies mit einem Flächengewicht von 20 sowie 30 g/m² gegenüber des rCF-Vlieses mit einer Grammaturnatur 10 g/m² eine deutlich homogenere Wärmeentwicklung hervorruft. Unter Berücksichtigung der gewonnenen Erkenntnisse zum elektrischen Verhalten der Heizelemente kann je nach Anwendung ein geeignetes Heizelement entwickelt werden. Das Ziel ist die Erreichung eines Widerstands zwischen 1 und 2 Ω , die bei Bestromung mit 12 V zu ausreichender Wärmeentwicklung bei moderater Aufheizrate führen. Dies kann durch den Einsatz von zweilagigem 20 oder 30 g/m² Vlies in

der 90°-Ausrichtung erzielt werden. Diese Varianten erreichen beim Anlegen einer Spannung von 12 V bereits Temperaturen von über 100 °C. Bezüglich der Größe der Heizelemente ist darauf zu achten, dass das Verhältnis zwischen Kontaktlänge und Elektrodenabstand weder zu groß noch zu klein ist, die besten Ergebnisse wurden mit quadratischen Heizelementen erzielt. Im nächsten Arbeitspaket wurde die Auslegung sowie die Fertigung und Validierung der Demonstratoren angestrebt. Zunächst wurde die simulative Auslegung der Einzelwerkstoffe unter Berücksichtigung des geforderten Eigenschaftsprofils durchgeführt. Es hat sich gezeigt, dass ein hybrider Aufbau mit Holzdecklagen einer Dicke von 4 mm sowie einem Polymerhartschaum mit einer Dicke von 7 mm unter Berücksichtigung der mechanischen sowie thermischen Randbedingungen für die Anwendung geeignet ist. Die Hybridstruktur ist im Vergleich zu Referenz (15 mm Sperrholz) eine steifigkeitsäquivalente Alternative.

Es wurden zwei Demonstratoren mit unterschiedlichem Aufbau der Heizelemente gefertigt, deren Eigenschaftsprofil in weiteren Untersuchungen validiert werden konnte. In einem der Demonstratoren wurde auf vier kleineren, in Reihe und parallel geschalteten Heizelementen mit einer Abmessung von ca. 25 x 25 cm² zurückgegriffen, während im anderen Demonstrator lediglich ein Heizelement mit einer Größe von 50 x 50 cm² genutzt wurde. Die Demonstratorvarianten haben einen unterschiedlichen Leistungsbedarf und unterscheiden sich auch hinsichtlich der Homogenität der Wärmeentwicklung. Es war zu erkennen, dass die Holzdeckschicht die Wärmeverteilung im aus mehreren Heizelementen bestehenden Demonstrator nicht homogenisiert, weshalb für den Einsatz ein großflächiges Heizelement besser geeignet ist. Im statischen Test als auch bei der Untersuchung der erreichbaren Temperaturentwicklung konnte daraufhin gezeigt werden, dass die gewünschten mechanischen, elektrischen und thermischen Anforderungen für den Einsatz als Fußbodenheizung erreicht werden.

Im Rahmen des Projekts ist es durch die leichtbaugerechte Auslegung des Demonstrators gelungen, dessen Masse bei gleichen Eigenschaften um ca. 45% zu senken. Für den Einsatz in einem Fahrzeug ergibt sich ein hohes Einsparpotential in der Nutzungsphase durch die funktionsintegrierte Leichtbaufußbodenheizung. Zudem wurde die Möglichkeit des Recyclings der hybriden Fußbodenheizung am Ende des Lebenszyklus betrachtet. Eine Trennung der Komponenten in die solitären Werkstoffe durch den Einsatz von Wärme ist denkbar. Da jedoch für das Fügen des Demonstrators ein epoxidbasierter Klebstoff verwendet wurde, ist eine Trennung der Komponenten bei niedriger, schonender Temperatur derzeit nicht möglich. Im Zentrum des Ausblicks stehen Untersuchungen weiterer Klebstoffsysteme, die den thermischen Belastungen im Betrieb standhalten, jedoch

eine Trennung der Werkstoffe ermöglichen. Zudem sollte im Sinne des ökologischen Leichtbaus ein Austausch des Polymerschaums durch eine nachhaltige Alternative angestrebt werden. In der Forschung sind nachhaltige Alternativen auf Basis von PLA [6] oder in Form von Holzschäumen [7] bekannt, jedoch sind diese derzeit nicht industriell verfügbar.

8 Literaturverzeichnis

- [1] M. Sauer, „Composites-Marktbericht 2019,“ Carbon Composite e.V., 2019.
- [2] M. Longana, N. Ong, H. Yu und K. D. Potter, „Multiple closed loop recycling of carbon fibre composites with the HiPerDiF (High Performance Discontinuous Fibre) method,“ *Composite Structures*, 2016.
- [3] H. Schürmann, Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [4] B. Klein, Leichtbau-Konstruktion, Wiesbaden: Vieweg & Sohn Verlag Wiesbaden, 2007.
- [5] M. F. Ashby, Materials and the Environment, Butterworth-Heinemann, 2013.
- [6] C.-C. Höhne, R. Schmidt, V. Berner, E. Metzsch-Zilligen, E. Westphal, R. Pfaendner und C. Mack, „Intrinsic flame retardancy of poly(lactic acid) bead foams,“ *Journal of Applied Polymer Science*, Bd. 138, Nr. 34, 2021.
- [7] F. Bunzel, G. Wisner, E. Stammen und K. Dilger, „Structural sandwich composites out of wood foam core and textile reinforced concrete sheets for versatile and sustainable use in the building industry,“ *Materials Today*, Bd. 31, Nr. 2, 2020.
- [8] Vgl., Komponist, *Direct Manufacturing Design Rules*. [Tonaufnahme]. Uni-Verlag. 1999.