



**Technische
Universität
Braunschweig**



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Faserverbundleichtbau
und Adaptronik



Charakterisierung von UD Kohlenstofffasermaterial zur Beheizung von Faserverbund-Heizsystemen

Studienarbeit

an der technischen Universität Braunschweig

Verfasser/in: Kristin Blanken

Studiengang: Maschinenbau

Matr.-Nr.: 4876535

Erstprüfer/in: Prof. Dr.-Ing. Christian Hühne (TU Braunschweig - iAF)

Betreuer/in: Patrick Scholle, M. Sc. (TU Braunschweig - iAF)

Betreuer/in: Alexander Pototsky, M. Sc. (DLR)

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Arbeit selbstständig und unter ausschließlicher Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel erstellt zu haben.

Die Arbeit wurde im Rahmen des Masterstudiums an der Technischen Universität Braunschweig erstellt und bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Braunschweig, den

Sperrvermerk

Die vorliegende Studienarbeit von Kristin Blanken mit dem Titel „Charakterisierung von UD Kohlenstofffasermaterial zur Beheizung von Faserverbund-Heizsystemen“ enthält vertrauliche Daten des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt.

Diese Studienarbeit darf nur vom Erst- und Zweitgutachter sowie berechtigten Mitgliedern des Prüfungsausschusses eingesehen werden. Eine Vervielfältigung und Veröffentlichung der Studienarbeit ist auch auszugsweise nicht erlaubt.

Ausnahmen von dieser Regelung bedürfen einer ausdrücklichen Genehmigung des Verfassers sowie des Unternehmens DLR.

Braunschweig, den XXXXXXXX

(Unterschrift betriebl. Betreuer)

(Unterschrift Student)

(Unterschrift Hochschulbetreuer)

Inhaltsverzeichnis

Abstract	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
Abbildungsverzeichnis.....	VII
Tabellenverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
2 Grundlagen zur Flugzeugvereisung.....	2
2.1 Eisbildung.....	2
2.2 Schutzprinzipien am Flugzeug	3
2.2.1 Pneumatisch-mechanisches Eisschutzsystem.....	3
2.2.2 Chemisches Eisschutzsystem	4
2.2.3 Thermisches Eisschutzsystem	5
3 Projektgrundlagen.....	7
3.1 Widerstandsheizsysteme.....	7
3.2 Ergebnisse bisheriger Arbeiten.....	8
3.3 Elektrische Eigenschaften der Kohlenstofffaser	9
4 Versuchsaufbau I.....	12
4.1 Verwendete Materialien	12
4.2 Probenfertigung.....	14
4.3 Versuchsdurchführung	17
4.3.1 Widerstandsmessung.....	17
4.3.2 Thermografie und Temperatursensoren.....	18
4.4 Ergebnisauswertung	20
5 Versuchsaufbau II.....	29
5.1 Verwendete Materialien	30
5.2 Probenfertigung.....	30
5.3 Versuchsdurchführung	31
5.3.1 Widerstandsmessung.....	31
5.3.2 Thermografie.....	32

5.4	Ergebnisauswertung	32
6	Zusammenfassung	38
7	Ausblick	39
8	Literaturverzeichnis	40
	Anhang A	44
	Anhang B	45

Abstract

Abkürzungsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Vereisungsrisiko in Abhängigkeit der Temperatur und Höhe [3]	3
Abbildung 2 Pneumatisch-mechanische Enteisungsmatten [7]	4
Abbildung 3 A321 Eisverhütungssystem mit Zapfluftentnahme [1]	6
Abbildung 4 Aufbau der Flügelvorderkanten-Widerstandsheizung der Boeing 787 [10]	7
Abbildung 5 Entwickelte Flügelvorderkante im Projekt LDAinOp [12]	8
Abbildung 6 Strompfad a) in Faserrichtung b) transversal c) in Dickenrichtung [21].....	10
Abbildung 7 Schematischer Laminataufbau - Versuchsaufbau I.....	14
Abbildung 8 Vakuumaufbau a) Laminat mit Korkumrandung b) inklusive Druckblech.....	15
Abbildung 9 a) Fertiger Vakuumaufbau b) Aufbau im Autoklaven.....	15
Abbildung 10 Harzaustritt nach Aushärtung.....	16
Abbildung 11 a) M20-System ohne Fehlstellen b) 8552-System mit harzarmen Bereichen ...	16
Abbildung 12 Probenstreifen a) Oberseite b) Unterseite mit Verstärkungselement.....	16
Abbildung 13 Versuchsaufbau I Widerstandsmessung.....	17
Abbildung 14 Thermografie Messanordnung	19
Abbildung 15 Korrelation zwischen theoretischen und realen Messwerten – 8552 AS4, 50mm Probenbreite	22
Abbildung 16 Korrelation zwischen theoretischen und realen Messwerten - 8552 IM7, 20mm Probenbreite	22
Abbildung 17 Anordnung der Basalebenen bei a) hochsteifen C-Fasern b) hochfesten C- Fasern [30].....	23
Abbildung 18 Ersatzschaltbild Reihenschaltung 90°-Proben	24
Abbildung 19 Thermografiemessung, Probenbreite 50mm, Faserorientierung a) 0° b) 30° c) 45° d) 60° e) 90°.....	26
Abbildung 20 Ungleichmäßige Erwärmung der Probe durch Faserwinkelorientierung	27
Abbildung 21 Kurvenkonzepte	29
Abbildung 22 a) laminiertes Kurvenkonzept 1 b) laminiertes Kurvenkonzept 2	30
Abbildung 23a) Probenprogramm nach Autoklavzyklus b) genietete Probe	31
Abbildung 24 Kurvenvariante auf Stoß laminiert mit einer Faserwinkelorientierung von 30°	33
Abbildung 25 Kurvenkonzepte a) Kupfermesh 0° b) Kupfermesh 30° c) U-Profil 0° d) U-Profil 30° e) Stoß 0° f) Stoß 30° g) Überlappung 0° h) Überlappung 30°	36

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Verwendete Materialien - Versuchsaufbau I.....	13
Tabelle 2 Autoklavzyklus - Versuchsaufbau I	14
Tabelle 3 Widerstandsmessungen M20/IM7 in kΩ.....	20
Tabelle 4 Widerstandsmessungen 8552/IM7 in kΩ	20
Tabelle 5 Widerstandsmessungen 8552/AS4 in kΩ	20
Tabelle 6 Spezifische Widerstände	24
Tabelle 7 Prozentualer Anteil der beheizten Querschnittsfläche bezogen auf die Gesamtfläche.....	27
Tabelle 8 Thermografie-Messergebnisse, M20 IM7, 50mm Probenbreite	28
Tabelle 9 Stellwerte Thermografiemessung Kurvenproben	32
Tabelle 10 Widerstandsmessung Kurvenproben	33
Tabelle 11 Thermografie-Messergebnisse Kurvenvarianten	37
Tabelle 12 Bewertungsmatrix Kurvenvarianten.....	37
Tabelle 13 M20 IM7: Spannungs- und Stromstärkewerte bei P=3W	45
Tabelle 14 8552 IM7: Spannungs- und Stromstärkewerte bei P=3W	45
Tabelle 15 8552 AS4: Spannungs- und Stromstärkewerte bei P=3W	45

1 Einleitung

2 Grundlagen zur Flugzeugvereisung

2.1 Eisbildung

Die Eisbildung am Flugzeug wird hauptsächlich durch die vorherrschenden Umgebungsbedingungen beeinflusst. Liegt bei ausreichender Luftfeuchtigkeit die Temperatur in einem Bereich zwischen 0°C und -40°C, so ist eine Vereisung prinzipiell möglich. Durch fehlende Kristallisationskeime in der Luft können die Wassertropfen auch noch bei Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes im flüssigen Aggregatzustand vorliegen. Treffen diese unterkühlten Wassertropfen dann auf die Flugzeugoberfläche bildet sich dort sofort ein Eisansatz. [1] Je nach Tropfengröße und Temperatur bilden sich unterschiedliche Formen von Eis aus.

Das sogenannte Klareis entsteht durch größere Tropfen, die bei einer Temperatur von 0°C bis -10°C auf der Oberfläche gefrieren. Der Vereisungsprozess läuft relativ langsam ab, wodurch sich das Eis weitflächiger ausbreiten kann und eine dichte, feste Schicht auf der Tragfläche bildet. Da Klareis am stärksten die aerodynamische Form der Flügelvorderkante verändert, gilt es als besonders kritisch. Eine weitere Form stellt das Raueis dar. Hierbei gefrieren kleinere Tropfen sehr schnell, sodass sich das Eis hauptsächlich auf die Flügelvorderkante beschränkt und nicht über die gesamte Tragfläche verteilt. Zudem ergeben sich Lufteinschlüsse im Eis, welche dafür sorgen, dass das Eis undurchsichtig erscheint und eine reduzierte Dichte aufweist, was die Entfernung des Eises im Vergleich zum Klareis erleichtert. Typische Temperaturen für die Entstehung von Raueis liegen im Bereich von -10°C bis -20°C. Als Mischeis wird die Kombination von Klar- und Raueis bezeichnet. Diese Form der Vereisung tritt sehr häufig auf, da oft sowohl kleine als auch große Wassertropfen in der Luft vorhanden sind.

Neben den meteorologischen Faktoren haben aber auch die Dauer der Vereisung, die Flügelform sowie die Geschwindigkeit des Flugzeuges einen Einfluss auf die Rate der Eisbildung. [2] [3]

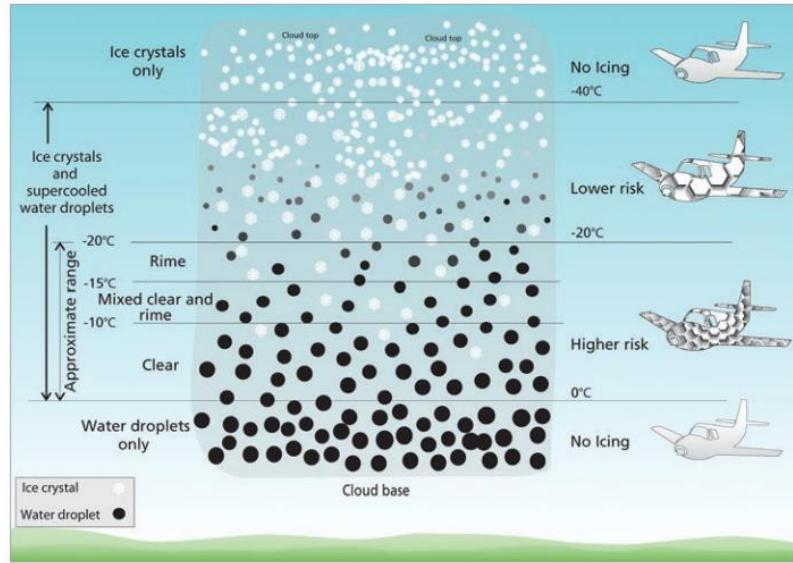


Abbildung 1 Vereisungsrisiko in Abhängigkeit der Temperatur und Höhe [3]

2.2 Schutzprinzipien am Flugzeug

Um die Entstehung eines Eisansatzes am Flugzeug zu verhindern und somit die Flugfähigkeit zu gewährleisten, finden verschiedene Enteisungssysteme in der Praxis Anwendung. Generell können diese Schutzprinzipien in zwei Kategorien eingeteilt werden - das Anti-Icing und das De-Icing. Beim Anti-Icing wird sichergestellt, dass sich zu keinem Zeitpunkt Eis auf den Oberflächen bilden kann. Es handelt sich somit um eine präventive Maßnahme. Energiesparender ist es, einen gewissen Vereisungsgrad zuzulassen und diesen dann periodisch zu entfernen. Dieses Prinzip nennt sich De-Icing. [4]

Weiter lassen sich die Enteisungssysteme nach ihrer Wirkungsweise unterteilen. So gibt es pneumatisch-mechanische, chemische, sowie thermische Systeme, welche im Folgenden genauer erläutert werden sollen.

2.2.1 Pneumatisch-mechanisches Eisschutzsystem

Bei dem pneumatisch-mechanischen System wird die Eisentfernung mit Hilfe von Enteismatten realisiert. Diese Matten aus flexilem Material können periodisch auf- und abgepumpt werden, wodurch die Eisschicht aufgebrochen wird und dadurch die Haftung zur Oberfläche verliert. Das Aufpumpen muss in einem kurzen Zeitintervall erfolgen, da nur so eine hohe Effizienz gewährleistet werden kann. Das Abpumpen ist erforderlich, um der Tragfläche nach erfolgter Enteisung wieder die aerodynamische Form zu verleihen. Die Vorteile des Systems bestehen darin, dass es energiesparend sowie kostengünstig ist und zudem ein gutes Leichtbaupotenzial aufweist. Jedoch kann

es nur als De-Icing System eingesetzt werden, wodurch Abweichungen von der optimalen Aerodynamik in Kauf genommen werden müssen. [1] Nachteilig ist auch, dass die Enteisungsmatten in regelmäßigen Abständen getauscht werden müssen und die Enteisung bei schweren Bedingungen nicht immer vollständig gewährleistet werden kann. [5]

Eine weitere Methode den Eisansatz mechanisch zu entfernen ist mittels Vibrationen. Hierbei soll das Eis ohne weitere Wärmezufuhr in Schwingungen versetzt werden, sodass es sich von den Tragflächen ablöst. Dieses Prinzip ist jedoch lediglich in den unversteiften Bereichen der Tragfläche einsetzbar. [6]

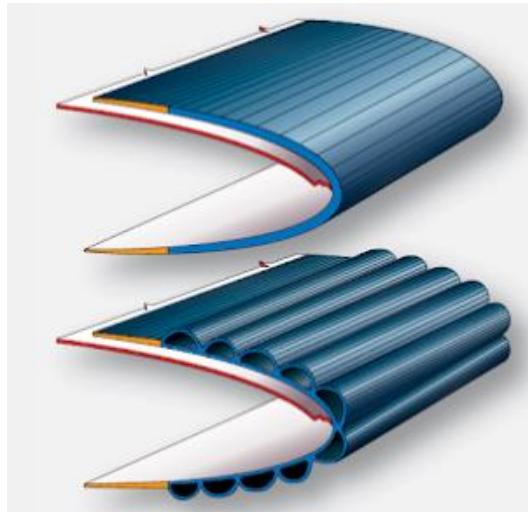


Abbildung 2 Pneumatisch-mechanische Enteisungsmatten [7]

2.2.2 Chemisches Eisschutzsystem

Die chemischen Eisschutzsysteme arbeiten mit Flüssigkeiten, die den Gefrierpunkt von Wasser auf bis zu -60°C herabsetzen (freezing point depressant, FPD). Heutige Frostschutzmittel bestehen vorwiegend aus einer Mischung von Glykol und Wasser. Sie können sowohl vor als auch während des Fluges aufgebracht werden. Bei der Enteisung bzw. der Eisprävention am Boden wird die Glykol-Mischung von außen auf die betroffenen Stellen aufgetragen. Bei der in-flight-Anwendung wird die Enteisungsflüssigkeit bei Bedarf mit Hilfe einer Pumpe aus einem Tank durch die poröse Flügelvorderkante gedrückt und so entstandenes Eis entfernt und ein erneutes Ansetzen verhindert. Diese Methode dient damit sowohl als De-Icing als auch als Anti-Icing-Anwendung. [8]

Nachteil hierbei ist, dass das Frostschutzmittel während des Fluges in einem separaten Tank mitgeführt wird. Dadurch erhöht sich nicht nur das Fluggewicht, auch die Einsatzdauer des Eisschutzsystems ist je nach Größe des Tanks beschränkt. Zusätzlich

dazu sind die Umweltbelastung und die Verschmutzung des Grundwassers durch die Chemikalien problematisch. [9]

2.2.3 Thermisches Eisschutzsystem

Den heutigen Standard bei Großflugzeugen kennzeichnen vor allem thermische Zapfluftsysteme. Diese lassen sich in drei Gruppen unterteilen. Zum einen sind das die Verdampfungssysteme (evaporative anti-icing systems), bei denen so viel Wärme bereitgestellt wird, dass ein potenzieller Eisansatz direkt verdampft wird. Die Nassfließsysteme (running-wet anti-icing systems) sind energiesparender, da die auftreffenden Wassertropfen nicht verdampft werden, sondern als flüssiges Wasser an den Tragflächen entlang fließen und sich erst in den hinteren Bereichen Eis bilden kann (runback ice). An kritischen Stellen sollten diese Systeme somit vermieden werden. Neben den genannten Anti-Icing Methoden gibt es noch die zyklischen Enteisungssysteme (cyclic de-icing systems), bei denen die Flügelvorderkante nur periodisch erhitzt wird, um die Anhaftung zwischen Oberfläche und Eis aufzuheben.

Bei allen Methoden wird die Zapfluft vom Triebwerk über ein Antiice Ventil durch ein Rohrsystem in die Flügelvorderkante geleitet. Das sogenannte Piccolo Rohr sorgt für eine gleichmäßige Verteilung der heißen Luft im Eisschutzsystem. Die verbrauchte Zapfluft wird nach Durchlauf der Flügelvorderkante an der Unterseite dieser wieder ausgestoßen. [1]

Durch die Entnahme der Zapfluft ergeben sich jedoch einige Nachteile. So kommt es beispielsweise zu einer reduzierten Triebwerksleistung, da die Zapfluft nun nicht mehr als Massestrom für den Schub genutzt werden kann. Des Weiteren wird durch das Ausstoßen der heißen Luft an der Unterseite der Flügelvorderkante Lärm erzeugt und es entsteht ein erhöhter Luftwiderstand, welcher sich negativ auf den Kraftstoffverbrauch auswirkt. Zusätzlich dazu ist die Regelung der Temperatur der Zapfluft beschränkt, sodass eine kontrollierte Einstellung schwierig ist. [10]

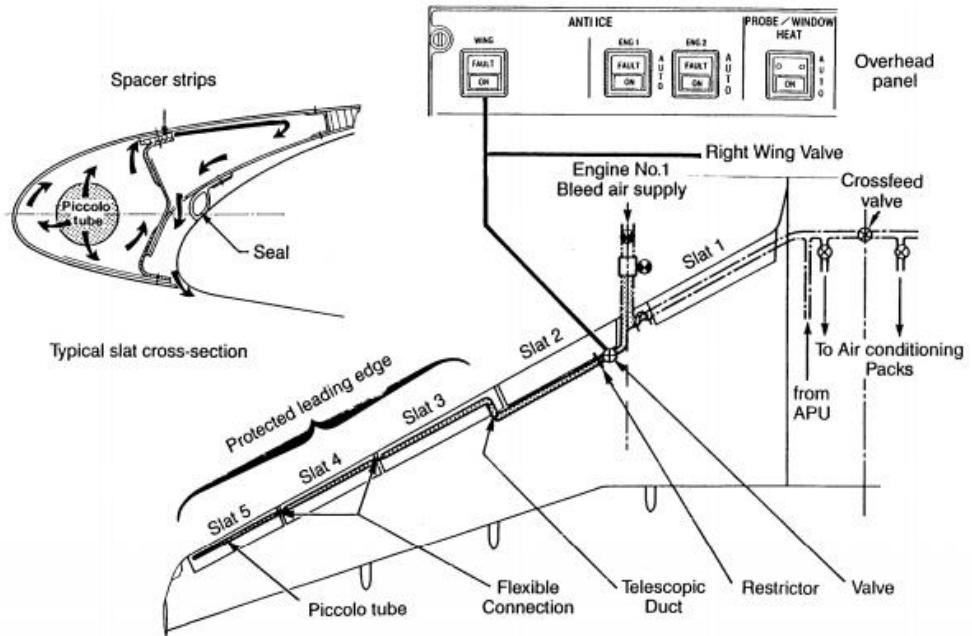


Abbildung 3 A321 Eisverhütungssystem mit Zapfluftentnahme [1]

Ein alternatives thermisches Eisschutzsystem bildet die integrierte Widerstandsheizung. Diese findet bereits Anwendung in der Boeing 787 und soll die Nachteile der Zapfluftvariante ausgleichen. [11] Da die Weiterentwicklung einer Widerstandsheizung Gegenstand dieser Arbeit ist, wird im Folgenden genauer auf Funktionsweise, Aufbau sowie Vor- und Nachteile eingegangen.

3 Projektgrundlagen

Ziel des Projektes ist die „Herstellung einer funktionsfähigen enteisbaren Flügelvorderkante“. Realisiert werden soll das Vorhaben mit einer Widerstandsheizung, deren Heizelemente aus Kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) bestehen. Diese übernehmen dabei nicht nur die Funktion der Wärmeerzeugung, sondern sind auch Teil der Struktur. [12]

3.1 Widerstandsheizsysteme

Widerstandsheizungen erzeugen Wärme, indem ein hochohmiger elektrischer Leiter von Strom durchflossen wird. Die Umwandlung der elektrischen Energie in Wärmeenergie erfolgt direkt im Heizleiter, weshalb an diesen besondere Anforderungen gestellt werden. Hierzu zählen unter anderem ein hoher spezifischer Widerstand, ein geringer Temperaturkoeffizient, ein geringer Wärmeausdehnungskoeffizient und eine gute Beständigkeit gegen hohe Temperaturen. [13]

Das Prinzip der Widerstandsheizung dient auch dem Enteisungsschutz der Boeing 787 als Grundlage. Alle Slats dieses Flugzeugtypen sind mit einem solchen Heizsystem ausgestattet. Jedes Heizelement unterteilt sich noch einmal in vier bis acht Segmente, die die einzelnen Heizzonen bilden. Der allgemeine Aufbau ist in Abbildung 4 schematisch dargestellt.

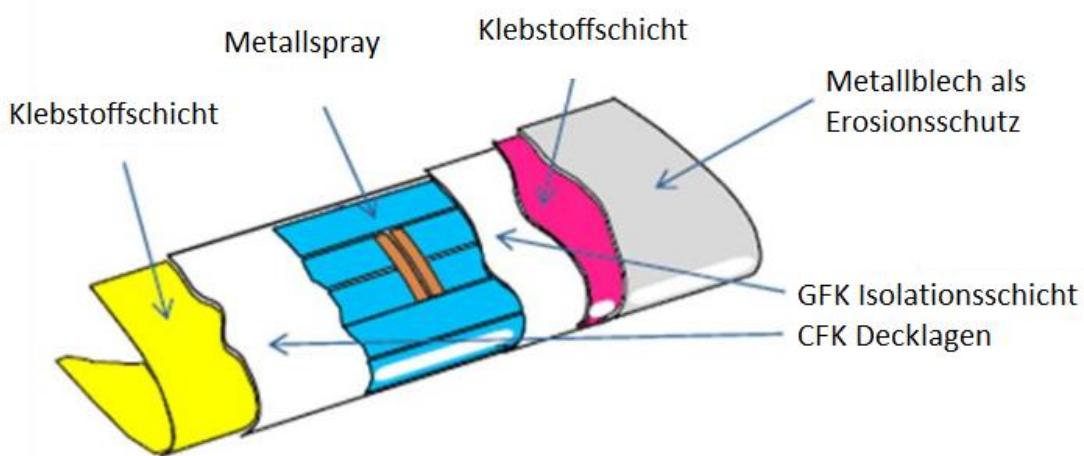


Abbildung 4 Aufbau der Flügelvorderkanten-Widerstandsheizung der Boeing 787 [10]

Das von GKN Aerospace entwickelte System setzt sich zusammen aus einer 15 Lagen dicken CFK-Schicht, auf die eine Isolationslage aus Glasfaser aufgebracht wird. Diese dient dem Korrosionsschutz und verhindert einen Kurzschluss der Metalllage mit der

leitenden CFK-Schicht. Die Metallschicht wird mittels eines Sprays auf der GFK-Lage appliziert. Nach erfolgtem Auftrag kühlst das flüssige Metall ab und verfestigt sich. Über Kabelanschlüsse werden die besprühten metallischen Elemente dann mit der Bordelektronik verknüpft. Es folgt eine weitere Lage GFK und eine 15 Lagen dicke Schicht aus CFK. Der Aufbau schließt mit einem verklebten Metallblech ab, welches für eine aerodynamisch glatte Oberfläche sorgt und als Erosionsschutz dient. [14]

Wie bereits in Kapitel 2.2.3 beschrieben sollen die Nachteile des Zapfluftsystens durch den Einsatz einer Widerstandsheizung beseitigt werden. Bei der Boeing 787 konnten durch das Wegfallen des Zapfluftsystens beispielsweise mehrere Komponenten eingespart werden. Hierzu zählen unter anderem der pneumatische Motor, der APU Startmotor, der Grundlastverdichter, der Vorkühler, verschiedene Leitungen, Ventile und Luftkontrollsysteme, sowie Leckagen- und Überhitzungsdetektionssysteme. Die Eliminierung dieser Komponenten führt neben der Gewichtseinsparung zu einer Reduzierung der mechanischen Komplexität, was wiederum zu einem verringerten Wartungsaufwand und einer besseren Zuverlässigkeit der Systeme beiträgt. [15] Die zum Betreiben des elektrischen Heizsystems notwendigen Generatoren minimieren zwar die Gewichtsvorteile wieder etwas, weitere Vorteile bieten dafür aber die Möglichkeit der kontrollierten Einstellung der Temperatur sowie die Lärmreduzierung.

3.2 Ergebnisse bisheriger Arbeiten

Die beim DLR entwickelte Heizung besitzt im Gegensatz zur Widerstandsheizung von Boeing elektrische Leiter aus Kohlenstofffasern. Das Heizsystem ist in sechs separat ansteuerbare U-förmige Heizzonen unterteilt. Der grundsätzliche Aufbau ist in Abbildung 5 zu erkennen.

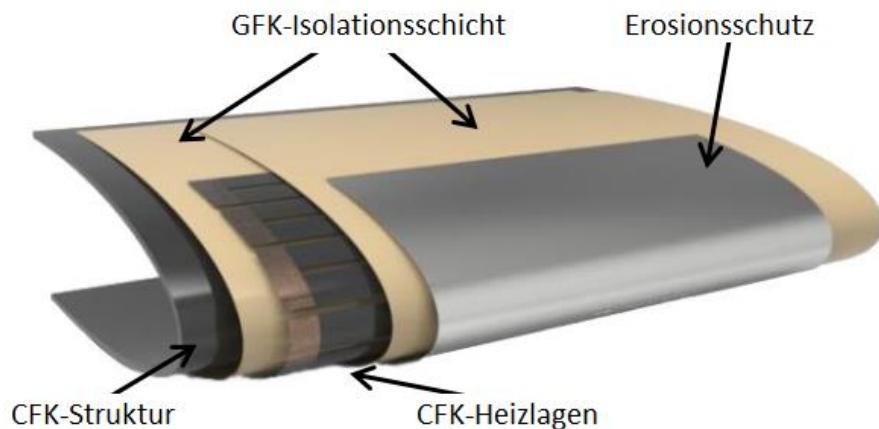


Abbildung 5 Entwickelte Flügelvorderkante im Projekt LDAinOp [12]

Die Gemeinsamkeiten der beiden entwickelten Konzepte stellen die Isolation der Heizelemente mittels GFK-Lagen und der metallische Erosionsschutz zur verbesserten Aerodynamik dar. Neben dem verwendeten Heizlagenmaterial liegt der größte Unterschied vor allem in der Fertigungsweise. Während bei Boeing die Verbindungsstelle des Erosionsschutzes mit der GFK-Schicht, sowie das Fügen der Heizung mit der restlichen Struktur über einen separaten Klebefilm realisiert wird, ist die Fertigung beim Projekt des DLR vollständig integral.

Zur gleichmäßigen und flächigen Einleitung des Stroms in die CFK-Rovings werden diese im Anschlussbereich mit einem Kupferdrahtgeflecht bestückt. Ein Fehlen des Kupferdrahtgeflechts hätte zur Folge, dass der Strom lediglich in einen Teil der Kohlenstofffasern geleitet werden würde, wodurch die vollständige Heizstreifenbreite nicht genutzt werden könnte und die Entstehung von Hotspots begünstigt würde. Die Kontaktierung des Heizsystems erfolgt über einen Kupferniet, welches durch einen Kabelschuh an die Stromquelle angeschlossen ist.

3.3 Elektrische Eigenschaften der Kohlenstofffaser

Jedes Material weist in Abhängigkeit der Atomdichte und der Anzahl der freien Elektronen einen spezifischen Widerstand auf. Dieser ist temperaturabhängig und wird deshalb grundsätzlich bei einer Temperatur von 25°C angegeben. Der Kehrwert dieses spezifischen Widerstandes (ρ) wird als Leitfähigkeit (κ) bezeichnet. [16]

$$\rho = \frac{1}{\kappa} \quad (1)$$

Der elektrische Widerstand (R) eines Leiters kann anhand des spezifischen Widerstandes, der Länge (l) sowie dem Querschnitt (A) des Leiters errechnet werden. [17]

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} \quad (2)$$

Mit Erhöhung der Leiterlänge steigt der elektrische Widerstand, da die Bewegung der Elektronen auf einer längeren Strecke stärker behindert wird. Derselbe Effekt tritt auf, wenn der Leiterquerschnitt reduziert wird. [18]

Die elektrischen Eigenschaften der Verbundpartner Faser und Matrix unterscheiden sich stark. Während die Kunststoffmatrix elektrisch isolierend ist, hat die Kohlenstofffaser eine elektrische Leitfähigkeit in Faserrichtung von etwa $2 \cdot 10^5$ bis $3 \cdot 10^5$ ($\Omega \cdot m$)⁻¹. Kohlenstofffasern sind damit verhältnismäßig gute Leiter (vgl. Kupfer: $5,96 \cdot 10^7$ ($\Omega \cdot m$)⁻¹). Quer zur Faserrichtung ist die Leitfähigkeit mit einem Wert von

$3,3 \cdot 10^2 (\Omega \cdot m)^{-1}$ geringer. [19] Im Verbund stellt sich somit in Abhängigkeit vom Faservolumengehalt und der Orientierung der Fasern eine starke Anisotropie ein. Unter Zuhilfenahme der Mischungsregeln kann die Leitfähigkeit des gesamten Verbundes parallel und quer zur Faserrichtung abgeschätzt werden, wobei σ_0 : Leitfähigkeit des Verbundes in Faserrichtung, σ_{90} : Leitfähigkeit des Verbundes quer zur Faserrichtung, σ_f : Leitfähigkeit der Faser, σ_m : Leitfähigkeit der Matrix und φ_f : Faservolumengehalt sind.

$$\sigma_0 = \sigma_f \cdot \varphi_f + \sigma_m \cdot (1 - \varphi_f) \quad (3)$$

Da die Leitfähigkeit der Matrix annähernd null ist, kann die Formel wie folgt vereinfacht werden:

$$\sigma_0 = \sigma_f \cdot \varphi_f \quad (4)$$

$$\sigma_{90} = \frac{\sigma_f \cdot \sigma_m}{\sigma_f \cdot \varphi_f + \sigma_m \cdot (1 - \varphi_f)} \quad (5)$$

Bei einer Vereinfachung der Formel (5) würde die Leitfähigkeit quer zur Faserrichtung theoretisch null werden. In der Praxis konnte jedoch nachgewiesen werden, dass der Verbund auch in transversaler Richtung leitet. Erklärt werden kann diese Leitfähigkeit mit der imperfekten Ausrichtung der Fasern. Die gewundenen Faserverläufe sorgen dafür, dass die Fasern untereinander in Kontakt treten, sodass über die Berührungsstellen Strom fließen kann. Die Leitfähigkeit in transversaler Richtung ist um den Faktor 10^{-3} geringer als parallel zur Faser. In Dickenrichtung reduziert sich die Leitfähigkeit aufgrund der harzreichen interlaminaren Schichten etwa um den Faktor 10^{-4} . [20]

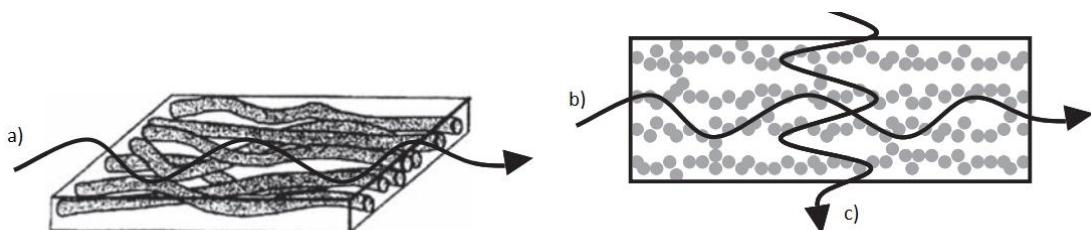


Abbildung 6 Strompfad a) in Faserrichtung b) transversal c) in Dickenrichtung [21]

Neben den geometrischen und materialspezifischen Faktoren hat, wie oben bereits erwähnt, auch die Temperatur einen Einfluss auf den elektrischen Widerstand. Generell werden elektrische Leiter in Heiß- und Kaltleiter unterteilt. Bei Kohlenstofffasern handelt es sich, im Gegensatz zu den metallischen Werkstoffen, um Heißleiter. Kohlenstofffasern haben damit einen negativen Temperaturkoeffizienten,

der dafür sorgt, dass mit steigender Temperatur der Widerstand reduziert, bzw. die Leitfähigkeit erhöht wird. Die Widerstandsänderung kann nach folgender Formel berechnet werden:

$$R_{T2} = R_{T1} \cdot (1 + \alpha(T_2 - T_1) + \beta(T_2 - T_1)^2) \quad (6)$$

R_{T1} steht dabei für den Widerstand bei der Temperatur T_1 , R_{T2} für den Widerstand bei der Temperatur T_2 , α für den Temperaturkoeffizienten erster Ordnung und β für den Temperaturkoeffizienten zweiter Ordnung. Der Temperaturkoeffizient erster Ordnung liegt für Kohlenstofffasern bei $-2 \cdot 10^{-4} \frac{1}{K}$ und für Kupfer bei $3,93 \cdot 10^{-3} \frac{1}{K}$. Bis Temperaturen von 100°C kann der quadratische Temperaturkoeffizient vernachlässigt werden, sodass sich die Formel wie folgt vereinfacht: [22]

$$R_{T2} = R_{T1} \cdot (1 + \alpha(T_2 - T_1)) \quad (7)$$

Der Vorteil von Heißleitern besteht darin, dass die Entstehung von Hotspots und das Überhitzen der Leiter verringert werden, da mit steigender Temperatur der Widerstand und somit auch die Wärmeentwicklung abnehmen.

Bei der zu entwickelnden Widerstandsheizung kann dieses Verhalten jedoch weitestgehend vernachlässigt werden, da die Temperaturen und somit der Effekt verhältnismäßig gering ausfallen.

4 Versuchsaufbau I

Anhand von Tests soll der Einfluss verschiedener Parameter auf den Widerstandswert der CFK-Heizstreifen ermittelt werden. Hierfür werden zwei unterschiedliche Versuchsaufbauten gewählt, welche im Folgenden genauer erläutert werden. Nach erfolgter Fertigung der Proben werden diese mittels zweier Methoden vermessen, die Ergebnisse dokumentiert und anschließend analysiert.

Im ersten Versuchsaufbau wird der Einfluss des Materials und der Faserorientierung auf eine rechteckige Probengeometrie untersucht. Hierfür werden unterschiedliche CFK-Materialien herangezogen und der Faserwinkel variiert. Zusätzlich dazu werden verschiedene Probenbreiten gefertigt, um den Einfluss des geometrischen Faktors zu berücksichtigen.

Die zu fertigenden Proben bestehen jeweils aus einer Lage CFK, welche oben und unten von je drei isolierenden Lagen GFK umschlossen wird. In den Anschlussbereichen wird ein Drahtgewebe aus Kupfermesh verlegt, in welches auch die Kupfernieten zur Stromeinleitung gesetzt werden.

4.1 Verwendete Materialien

Insgesamt sollen drei unterschiedliche CFK-Materialien untersucht werden. Das Material wurde dabei so gewählt, dass der Einfluss des Harzsystems und der des Fasertyps getrennt voneinander beurteilt werden können. Während beim ersten und zweiten Material die Faser identisch ist, gleichen sich beim zweiten und dritten Material die verwendete Matrix. Die verwendeten Materialien und deren Eigenschaften sind in Tabelle 1 zusammengetragen. [23] [24] [25]

Tabelle 1 Verwendete Materialien - Versuchsaufbau I

Material Eigenschaft	1. UD Prepreg	2. UD Prepreg	3. UD Prepreg	Glasfaser Prepreg	Kupfer- Mesh
Material- bezeichnung	M20/34%/ 134/IM7	8552-IM7- 35%-134	8552-AS4- 35%-134	M21/56%/ 1080	
Fasertyp	IM7	IM7	AS4	1080	
Harzsystem	M20	8552	8552	M21	
Nominales Flächengewicht	203 $\frac{\text{g}}{\text{m}^2}$	206,15 $\frac{\text{g}}{\text{m}^2}$	206,15 $\frac{\text{g}}{\text{m}^2}$	109 $\frac{\text{g}}{\text{m}^2}$	
Nominaler Faservolumengehalt	58%	57,7%	57,42%	28,2%	
Harzanteil in Gewichtsprozent	34%	35%	35%		
Nominale Dicke einer Lage	0,129 mm	0,131 mm	0,13 mm	0,066 mm	

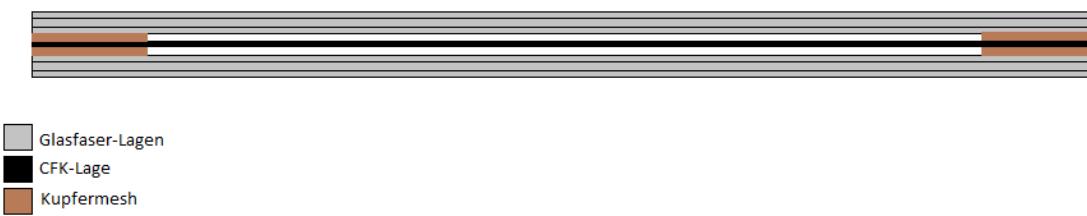
Da die Probenplatten aus einem Verbund von CFK und GFK bestehen, musste sichergestellt werden, dass die Materialkombinationen chemisch kompatibel sind. Sowohl bei der 8552-Matrix der beiden CFK-Prepregs als auch bei der M21-Matrix des GFK-Prepregs handelt es sich um Epoxidharzsysteme, die bei einer Temperatur von 180°C aushärten. Ein Vermischen der Systeme ist damit unbedenklich. Auch bei dem M20-System handelt es sich um ein Epoxidharz, welches aber im Gegensatz zu den anderen Systemen bereits bei einer Temperatur von 130°C aushärtet. Um eine Schädigung bzw. ein Zersetzen des Materials während des Autoklavzyklus auszuschließen, wurden deshalb vorab DSC Messungen mit dem M20 Prepreg durchgeführt. Hierbei konnte nachgewiesen werden, dass sich das Material erst deutlich später zersetzt und ein Aushärten bei 180°C somit auch bei dieser Materialkombination unproblematisch ist. Die DSC Messergebnisse können dem Anhang entnommen werden. Alle Probenplatten wurden folglich nach dem in Tabelle 2 gezeigten Zyklus ausgehärtet: [25]

Tabelle 2 Autoklavzyklus - Versuchsaufbau I

Abschnitt	Gesamtzeit [h:min]	Abschnittszeit [h:min]	Aufheizrate [K/min]	Temperatur [°C]	Absolutdruck [bar]
Start	0:00	-	-	20	
Temperatur-aufbau	1:20	1:20	1-2	20-180	7
Aushärten	3:20	2:00	-	180±5	7
Abkühlen	3:50	0:30	2-5	<80	7

4.2 Probenfertigung

Für die Probenfertigung wurde das benötigte Material zunächst aufgetaut. Anschließend wurden die CFK- und GFK-Zuschnitte mit einer Größe von 140x250mm und das Kupfermesh mit den Abmaßen 20x250mm am Cutter zugeschnitten. Das Laminieren erfolgt nach dem Aufbau, der der schematischen Zeichnung in Abbildung 7 entnommen werden kann.



Für den Vakuumaufbau wurde das Werkzeug mit Trennfolie ausgelegt, auf der dann die Lagenpakete platziert werden konnten. Um ein Auslaufen des Harzes zu verhindern wurde eine Umrundung aus Korkstreifen hergestellt. Eingangs gefertigte Druckbleche wurden anschließend in Trennfolie gewickelt und auf dem Aufbau positioniert. Die Abmaße der Druckbleche sind etwa 2-3 Millimeter kleiner als die der Lagenpakete, sodass eine flächige Komprimierung sichergestellt wird.

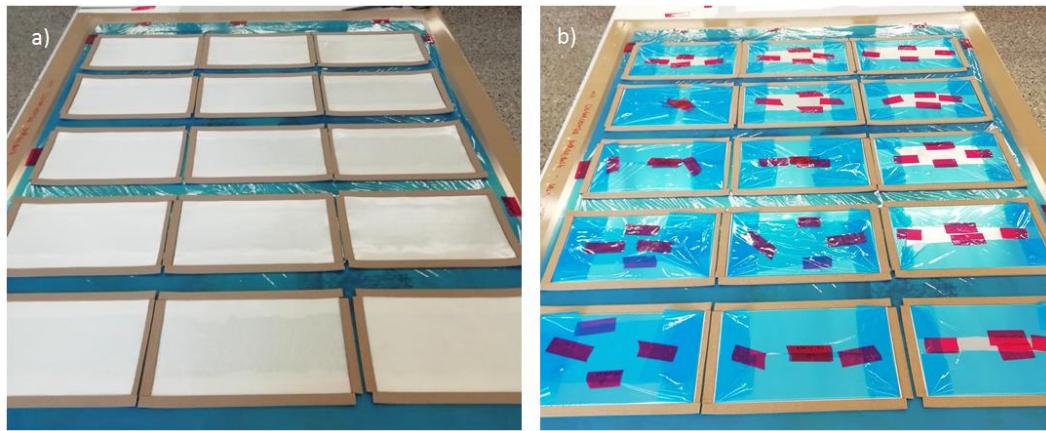


Abbildung 8 Vakuumaufbau a) Laminat mit Korkumrandung b) inklusive Druckblech

Um eine vollständige Evakuierung eingeschlossener Luft und der während der Aushärtung entstehenden Gase zu gewährleisten, wird ein Absauggewebe über die Platten gelegt. Im letzten Schritt wird die Vakuumfolie mittels Kittband über dem Aufbau angebracht und der Vakuumstutzen gesetzt. Der gesamte Vakuumaufbau wird dann im Autoklaven mit dem in Tabelle 2 beschriebenen Zyklus ausgehärtet.

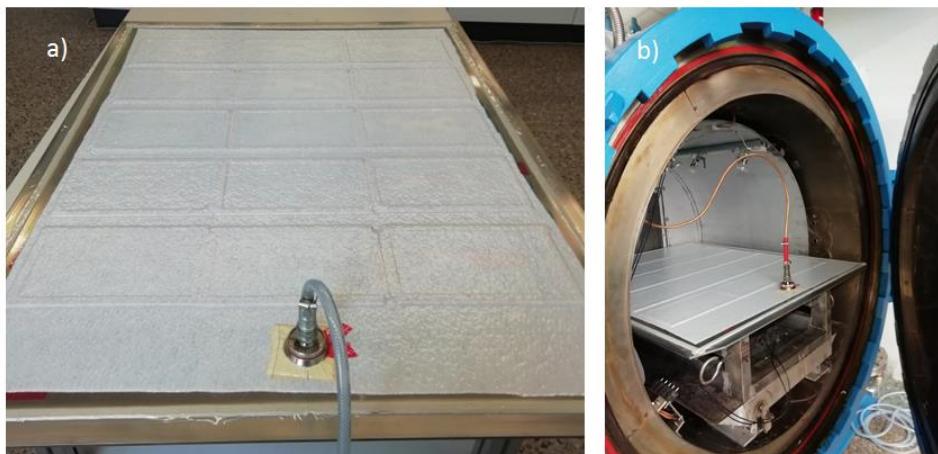


Abbildung 9 a) Fertiger Vakuumaufbau b) Aufbau im Autoklaven

Nach Entnahme der Platten aus dem Autoklaven wurde direkt ersichtlich, dass während der Aushärtung ein starker Harzaustritt stattgefunden hat. Beim Entformen hat sich dies vor allem bei den Platten mit dem 8552-Harzsystem gezeigt. Hier konnten im Bereich des Kupfermeshs vermehrt harzarme Stellen ausgemacht werden. Bei den Platten, die mit dem M20-Harzsystem gefertigt wurden, konnten hingegen keinerlei Abweichungen vom Sollzustand festgestellt werden. Grund hierfür könnte die frühere Aushärtung der CFK-Lage bei bereits 130°C sein. Da die harzarmen Stellen nur in den Randbereichen und nicht in der für die Messung relevanten CFK-Schicht aufgetreten sind, wurden die Proben als ausreichend gut eingestuft. Für folgende Tests muss der

Vakuumaufbau jedoch angepasst werden, um einen erneuten Harzverlust zu vermeiden.



Abbildung 10 Harzaustritt nach Aushärtung

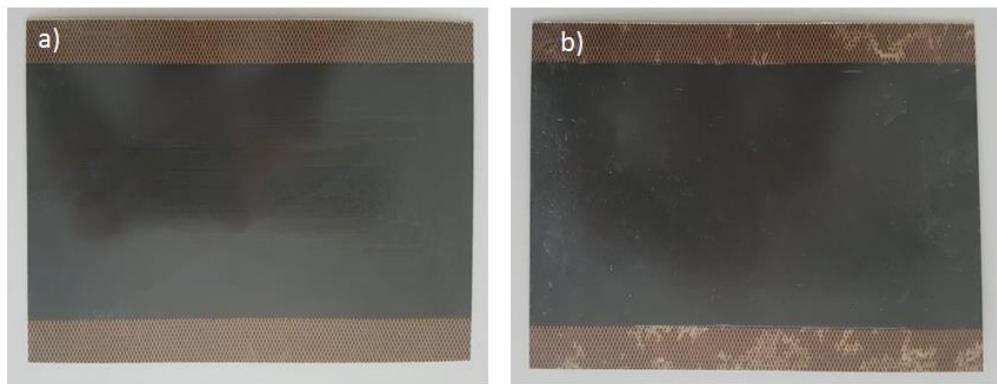


Abbildung 11 a) M20-System ohne Fehlstellen b) 8552-System mit harzarmen Bereichen

Die Platten wurden schließlich unter Verwendung eines Diamantsägeblatts in 10 bis 50 mm breite Streifen gesägt. Für die Stromeinleitung wurden 4,1 mm große Löcher im Bereich des Kupfermeshs gebohrt. Die Proben wurden letztlich mittels Kupfer-Blindnieten mit Flachkopf (DIN7337 Form A) gefügt. Die Niete weisen einen Durchmesser von 4mm und eine Nietschaftlänge von 10mm auf und wurden von der Firma BRALO bereitgestellt. Zusätzlich eingebrachte Verstärkungselemente aus CFK mit einer Dicke von 1mm sollen eine Beschädigung der 0,4mm dünnen Proben an der Nietstelle verhindern.

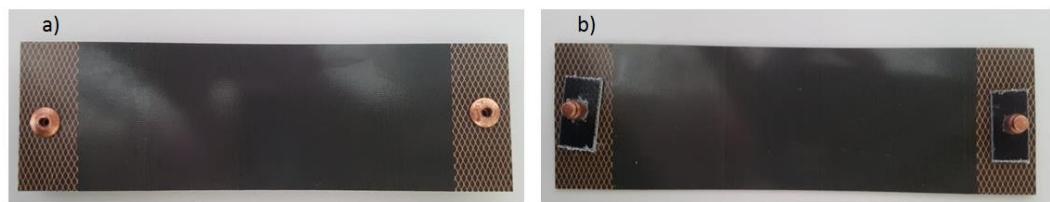


Abbildung 12 Probenstreifen a) Oberseite b) Unterseite mit Verstärkungselement

4.3 Versuchsdurchführung

Um differenzierte Aussagen über die Eigenschaften der gefertigten Proben zu erhalten, sollen diese anhand von zwei unterschiedlichen Auswertungsmethoden untersucht werden. Die Prinzipien der jeweiligen Methoden werden im Folgenden genauer erläutert.

4.3.1 Widerstandsmessung

Zunächst soll der Widerstand der Proben gemessen werden. Hierfür wird das DC Milliohm Meter GOM-805 von GW Instek verwendet. Bei einem Prüfstrom von 1 A misst dieses Gerät mit einer Genauigkeit von 0,05%. Die Proben werden über Krokodilklemmen an den Kupfernieten angeschlossen, sodass der Widerstand ermittelt werden kann. Der Versuchsaufbau kann der Abbildung 13 entnommen werden. Generell stellt der Widerstand (R) den Quotienten aus Spannung (U) und Stromstärke (I) dar.

$$R = \frac{U}{I} \quad (8)$$



Abbildung 13 Versuchsaufbau I Widerstandsmessung

4.3.2 Thermografie und Temperatursensoren

Bei der zweiten Auswertungsmethode soll mit Hilfe einer Wärmebildkamera und Temperatursensoren die Wärmeverteilung, sowie die Temperaturentwicklung der Proben analysiert werden.

Das Prinzip der Thermografie beruht auf dem physikalischen Stefan-Boltzmann-Gesetz. Dieses besagt, dass jeder Körper in Abhängigkeit seiner Temperatur Energie in Form von infraroter Strahlung abgibt. Das ausgestrahlte Spektrum des Körpers verschiebt sich mit zunehmender Temperatur immer weiter in den energiereichereren kurzweligen Bereich. Über Infrarotsysteme mit integrierten Detektoren kann diese Strahlung in elektrische Signale konvertiert und aus den erhaltenen Informationen Angaben zur Temperatur gewonnen werden. [26]

Um den Einfluss der atmosphärischen Strahlung bei größeren Entfernungen möglichst gering zu halten, werden die Messungen in einem ausgewählten Wellenlängenbereich von ca. 8 bis 14 µm durchgeführt. In diesem Bereich ist die von der Atmosphäre emittierte Eigenstrahlung und somit der Fehler verhältnismäßig klein. [27]

Die für diese Untersuchungen verwendete Thermografie-Kamera ist die FLIR AX5 3335995. Diese misst mit einer Genauigkeit von etwa X°C. Als Stromquelle wurde die Power Supply PSI8720-15 von Elektro-Automatik genutzt. Die Messanordnung kann der Abbildung 14 entnommen werden. Der Abstand der Kamera zur Probe betrug bei jeder durchgeführten Messung 0,21m.

Zur Überführung der reflektierten Strahlung in einen dazugehörigen Temperaturwert, muss zunächst der Emissionsgrad (ϵ) der Probe bekannt sein. Dieser gibt das Verhältnis der emittierten Strahlung eines realen Körpers (Φ_r) zur emittierten Strahlung eines idealen „Schwarzen Strahlers“ (Φ_s) an. Es können somit Werte zwischen 0 und 1 angenommen werden. [28]

$$\epsilon = \frac{\Phi_r}{\Phi_s} \quad (9)$$

Für die Ermittlung dieses Wertes wird ein Temperatursensor auf der Probe befestigt, welcher die aktuelle Temperatur der Probe misst. Der Wert des Emissionsgrades wird dann in den Einstellungen der Software FLIR ResearchIR so lange variiert, bis die angezeigte Temperatur der Thermografiemessung mit der realen Temperatur der Probe übereinstimmt. Nach erfolgter Ermittlung des Emissionsgrades, sind alle weiteren Messungen ohne Temperatursensor durchführbar. Der ermittelte Emissionsgrad der Proben lag in diesem Fall bei 0,98.

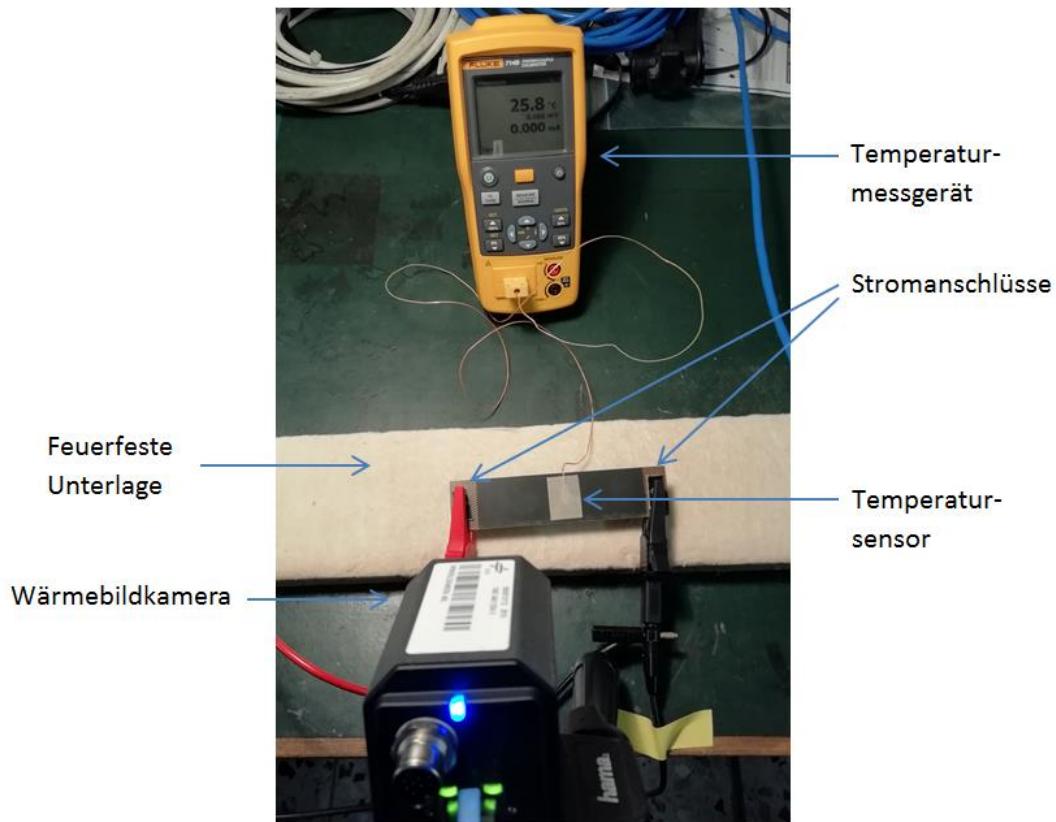


Abbildung 14 Thermografie Messanordnung

Bei den durchgeföhrten Messungen wurden bei jeder Probe die Spannung und die Stromstärke so eingestellt, dass eine vorgegebene Leistung von 3 Watt erreicht wurde.

Die Leistung (P) wird aus dem Produkt von Spannung (U) und Stromstärke (I) gebildet.

$$P = U \cdot I \quad (10)$$

Unter Einbeziehung der Formel (8) ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$P = R \cdot I^2 \quad (11)$$

Durch Umstellen der Formel (11) kann somit die Stromstärke wie folgt berechnet werden:

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}} \quad (12)$$

Durch Einsetzen der berechneten Stromstärke, sowie der vorgegebenen Leistung in die Formel (10) kann damit die benötigte Spannung berechnet werden, die angelegt werden muss. Die Spannungs- sowie Stromstärkewerte sind dem Anhang angefügt.

4.4 Ergebnisauswertung

Ziel der beschriebenen Versuchsaufbauten war es, den Einfluss des Materials, der Faserorientierung sowie der Probenbreite zu charakterisieren. Des Weiteren stand die Entwicklung einer Formel im Vordergrund, mit der vorab der Widerstandswert berechnet werden kann.

Die Ergebnisse der Widerstandsmessung sind in den Tabelle 3Tabelle 4Tabelle 5 zusammengetragen und sollen im Folgenden genauer diskutiert werden.

Tabelle 3 Widerstandsmessungen M20/IM7 in kΩ

Faserorientierung Probenbreite	0°	30°	45°	60°	90°
10 mm	0,0020	0,7899	2,0375	3,4324	5,569
20 mm	0,0010	0,5172	0,7001	2,8643	4,968
30 mm	0,0007	0,4241	0,7394	2,6429	4,266
40 mm	0,0005	0,0745	0,6492	2,4969	3,849
50 mm	0,0004	0,0653	0,6258	2,0493	3,203

Tabelle 4 Widerstandsmessungen 8552/IM7 in kΩ

Faserorientierung Probenbreite	0°	30°	45°	60°	90°
10 mm	0,00194	0,382	0,7893	1,1217	1,8321
20 mm	0,00094	0,154	0,3791	0,8405	1,0839
30 mm	0,00065	0,131	0,3383	0,6297	1,0614
40 mm	0,00049	0,067	0,2513	0,3216	0,9338
50 mm	0,00039	0,027	0,1778	0,3407	0,7547

Tabelle 5 Widerstandsmessungen 8552/AS4 in kΩ

Faserorientierung Probenbreite	0°	30°	45°	60°	90°
10 mm	0,0021	0,0909	0,1844	0,2720	0,4964
20 mm	0,0010	0,0412	0,1098	0,1665	0,2991
30 mm	0,0007	0,0326	0,0746	0,1118	0,2238
40 mm	0,0005	0,0174	0,0547	0,0860	0,1747
50 mm	0,0004	0,0078	0,0323	0,0643	0,1284

Als Ausgangspunkt für die zu entwickelnde Formel, diente zunächst die Formel (2). Um den Einfluss der Faserorientierung (α) zu berücksichtigen, wurde diese wie folgt modifiziert.

	$R = \rho_0 \cdot \cos(\alpha) \cdot \frac{l}{b \cdot d} + \rho_{90} \cdot \sin(\alpha) \cdot \frac{l}{b \cdot d}$	(13)
--	--	------

Die Länge, Breite, sowie die Dicke der leitenden CFK-Lage waren vorgegeben. Zur Ermittlung der spezifischen Widerstände ρ_0 und ρ_{90} wurden die Widerstandsmesswerte für die Proben mit 0° und 90° Faserorientierung aus den Tabelle 3Tabelle 4Tabelle 5 eingesetzt und die Formel umgestellt.

Ein Abgleich mit den übrigen Messungen (30° , 45° , 60°) zeigt jedoch, dass die Formel den Sachverhalt nicht zufriedenstellend abbildet, sodass eine Anpassung der Formel erforderlich ist. Schaut man sich die Transformationsgleichungen der klassischen Laminattheorie an, so fällt auf, dass dort die Winkelfunktionen mit der vierten Potenz eingehen. [29] Wird dieser mathematische Sachverhalt auf die Formel (13) übertragen, ergibt sich folgender Zusammenhang.

	$R = \rho_0 \cdot \cos(\alpha)^4 \cdot \frac{l}{b \cdot d} + \rho_{90} \cdot \sin(\alpha)^4 \cdot \frac{l}{b \cdot d}$	(14)
--	--	------

Zur besseren Anschaulichkeit wurden Graphen erstellt, die den Zusammenhang zwischen den theoretischen und den experimentell ermittelten Widerständen aufzeigen. Zwei repräsentative Graphen werden hier beispielhaft diskutiert, alle weiteren sind dem Anhang zu entnehmen.

In Abbildung 15 ist erkennbar, dass die entwickelte Formel den tatsächlichen Sachverhalt sehr gut abbildet. Lediglich der Widerstand bei der 60° -Probe weicht um ein Hunderstel vom Sollwert ab. Bei den 30° - und 45° -Proben ist die Abweichung verschwindend gering. Abbildung 16 verdeutlicht wiederum, dass nicht alle Messwerte mit so hoher Genauigkeit vorhergesagt werden können. Hierbei liegen alle Messwerte höher als theoretisch angenommen. Diese Abweichungen ergeben sich zum einen durch Fertigungstoleranzen (Probenbreite, Faserorientierung, Nietverbindung, etc.) und zum anderen durch Messungenauigkeiten. Trotz dieser Toleranzen bildet die entwickelte Formel den Großteil der gemessenen Werte zufriedenstellend ab. Um die Formel vollständig zu verifizieren müsste ein umfangreicheres Probenprogramm mit baugleichen Proben erstellt werden. Aufgrund der begrenzten Zeitvorgabe, war es im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht möglich weitere Tests durchzuführen.

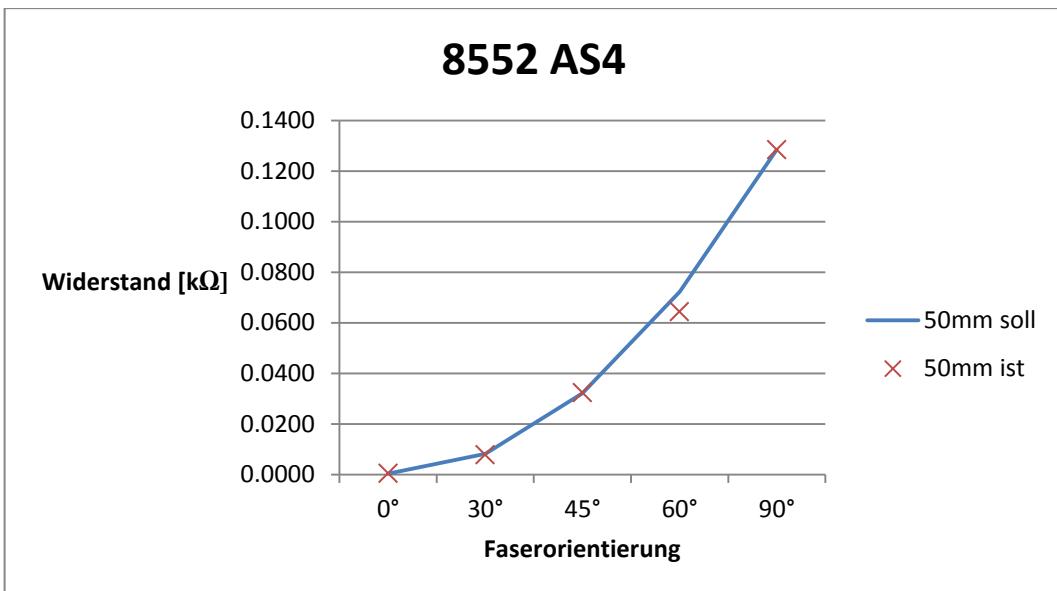


Abbildung 15 Korrelation zwischen theoretischen und realen Messwerten – 8552 AS4, 50mm Probenbreite

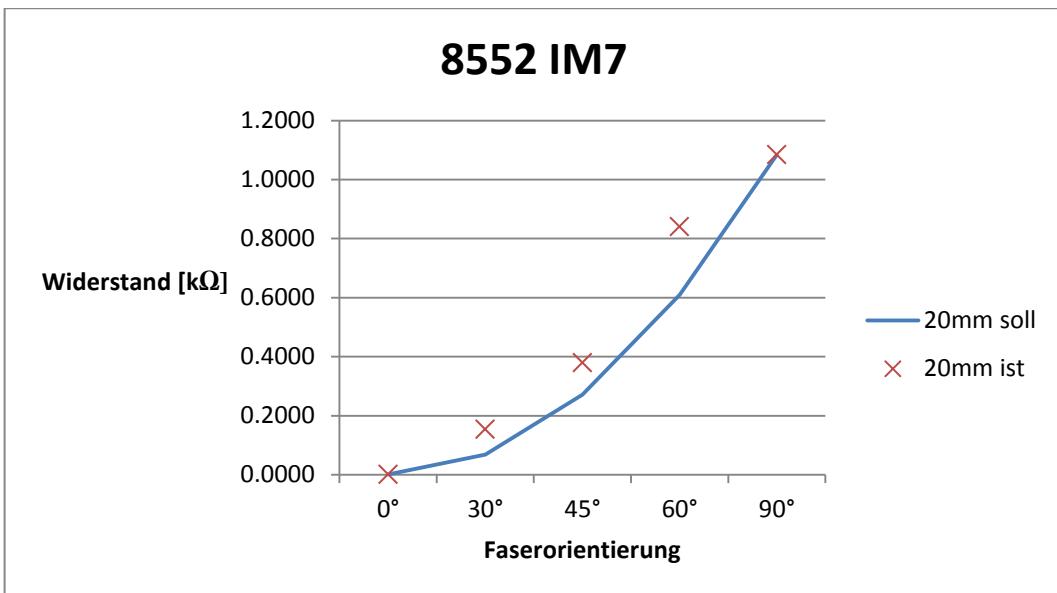


Abbildung 16 Korrelation zwischen theoretischen und realen Messwerten - 8552 IM7, 20mm Probenbreite

Die weitere Auswertung der erstellten Formel hat gezeigt, dass der spezifische Widerstand in 0° Richtung unabhängig von der Probenbreite wie zu erwarten einen annähernd konstanten Wert annimmt. Generell lässt sich festhalten, dass sich die spezifischen Widerstände der unterschiedlichen Materialien in Faserrichtung nur geringfügig unterscheiden. Bei den Materialien M20 IM7 und 8552 IM7 ist diese Erkenntnis naheliegend, da die gleiche Fasersorte eingesetzt wird. In 0° Richtung kann der Widerstand als Parallelschaltung verstanden werden, wobei der Einfluss der Fasern entscheidend und der des Harzes weitestgehend vernachlässigbar ist. Der spezifische

Widerstand des Materials 8552 AS4 liegt minimal höher als die spezifischen Widerstände der anderen Materialien. Grund hierfür könnten die unterschiedlichen Steifigkeiten der Fasertypen sein, denn je nach Fasertyp besitzen die Kohlenstofffasern eine hierfür spezifische Mikrostruktur. Während die Basalebenen hochsteifer Fasern annähernd perfekt in Faserrichtung ausgerichtet sind, erlangen hochfeste Fasern ihre mechanischen Eigenschaften durch Querverbindungen zwischen den Fasersträngen. Das führt dazu, dass Fasern mit einem hohen E-Modul auch eine bessere Leitfähigkeit bzw. einen geringeren Widerstand aufweisen. [30]

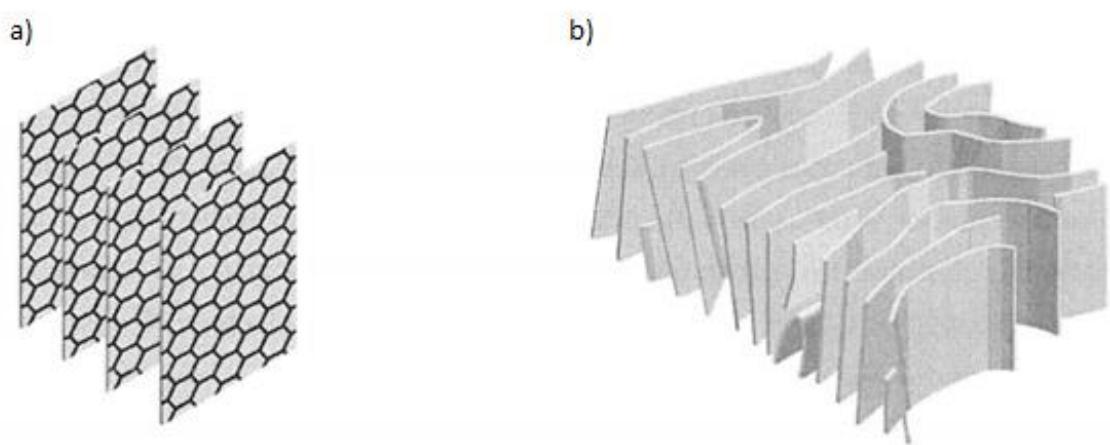


Abbildung 17 Anordnung der Basalebenen bei a) hochsteifen C-Fasern b) hochfesten C-Fasern [30]

Die AS4 Faser ist mit einem E-Modul von 231 GPa gegenüber der IM7 Faser mit einem E-Modul von 276 GPa weniger steif. [31] [32] Dadurch könnte auch der höhere spezifische Widerstand begründet werden. Insgesamt ist der Unterschied in der Steifigkeit sowie in der Leitfähigkeit jedoch verhältnismäßig gering. Ein Vergleich von Fasertypen, die sich in ihren mechanischen Eigenschaften stärker unterscheiden könnte diese Annahme weiter untermauern.

Auch bei den 90° Proben wurde zunächst erwartet, dass der spezifische Widerstand unabhängig von der Probenbreite ist. Anhand der gemessenen Werte wurde jedoch deutlich, dass der spezifische Widerstand in 90° Richtung mit zunehmender Probenbreite ebenfalls zunimmt.

Tabelle 6 Spezifische Widerstände

	M20 IM7		8552 IM7		8552 AS4	
	ρ_0 [$10^{-5} \Omega \cdot m$]	ρ_{90} [$\Omega \cdot m$]	ρ_0 [$10^{-5} \Omega \cdot m$]	ρ_{90} [$\Omega \cdot m$]	ρ_0 [$10^{-5} \Omega \cdot m$]	ρ_{90} [$\Omega \cdot m$]
10mm	2,580	0,0718	2,5414	0,0240	2,73	0,0065
20mm	2,580	0,1281	2,4628	0,0284	2,60	0,0078
30mm	2,709	0,1651	2,5545	0,0417	2,73	0,0087
40mm	2,580	0,1986	2,5676	0,0489	2,60	0,0091
50mm	2,580	0,2066	2,5545	0,0494	2,60	0,0083
\emptyset	2,6058	n.a.	2,5362	n.a.	2,652	n.a.

Bei der Thermografiemessung konnte gezeigt werden, dass sich die Proben mit der 90° Faserwinkelorientierung nicht gleichmäßig aufheizen. Betrachtet man das Ersatzschaltbild des Aufbaus, kann dieses vereinfacht als Reihenschaltung von Matrix und Faser aufgefasst werden. Hierbei ist der Widerstand der nichtleitenden Matrix um Größenordnungen größer als der Widerstand der Faser quer zur Faserrichtung. Da auch der Widerstand der Faser in 0°-Richtung um etwa drei Zehnerpotenzen geringer ist als der in 90°-Richtung, stellt den Weg des geringsten Widerstandes somit der in Faserrichtung dar. Fließt der Strom nun bevorzugt in diese Richtung, wird bei den Proben mit größerer Breite ein weiterer Weg zurückgelegt, als bei den schmaleren. Damit ergibt sich kein einheitlicher spezifischer Widerstand, sondern eine Abhängigkeit des Wertes von der Probenbreite.



Abbildung 18 Ersatzschaltbild Reihenschaltung 90°-Proben

Der Vergleich zwischen den drei verwendeten Materialien hat gezeigt, dass sich bei den gemessenen Widerständen quer zur Faserrichtung, anders als in 0°-Richtung, größere Unterschiede ergeben (Vgl. Tabelle 3, Tabelle 4, Tabelle 5). Hierbei haben vor allem das Harz, die Leitfähigkeit quer zur Faser und die Schlichte einen Einfluss auf den Gesamtwiderstand. Mit welchen Anteilen die einzelnen Faktoren eingehen, kann jedoch mit den gegebenen Mitteln nicht genau bestimmt werden. Hierfür müssten zusätzliche Informationen über die Leitfähigkeit des Harzes, die Zusammensetzung der Schlichte, die Leitfähigkeit quer zur Faser sowie die Anzahl der Faserkontakte innerhalb des Verbundes bekannt sein. Aus den experimentell ermittelten Daten wird dennoch

ersichtlich, dass das M20 IM7 Material die größten Widerstände in 90°-Richtung aufweist. Es kann also davon ausgegangen werden, dass die Leitfähigkeit des M20 Harzes geringer ist, als die des 8552 Systems. Das Material 8552 AS4 weist in 90°-Richtung die geringsten Widerstände auf. Da das Harzsystem mit dem des Materials 8552 IM7 identisch ist, muss hierfür die Leitfähigkeit quer zur Faser bzw. die Schichte, die die Faser ummantelt verantwortlich sein.

Antiproportionaler Zusammenhang zwischen Leitfähigkeit in Faserrichtung und quer dazu?

Nach erfolgter Auswertung der Widerstandsmessungen, können die Thermografie-Ergebnisse analysiert werden. Wichtige Messgrößen sind hierbei die durchschnittliche Temperatur der Probe, minimale und maximale Temperaturen, sowie die Standardabweichung. Die Diskussion der Messergebnisse soll aufgrund der Vielzahl an Proben repräsentativ an einer Probenreihe durchgeführt werden. Alle weiteren Daten können dem Anhang entnommen werden. Für die Ermittlung der charakteristischen Temperaturwerte wurde jeweils nur der Bereich betrachtet, der sich bei Stromdurchfluss erhitzt hat.

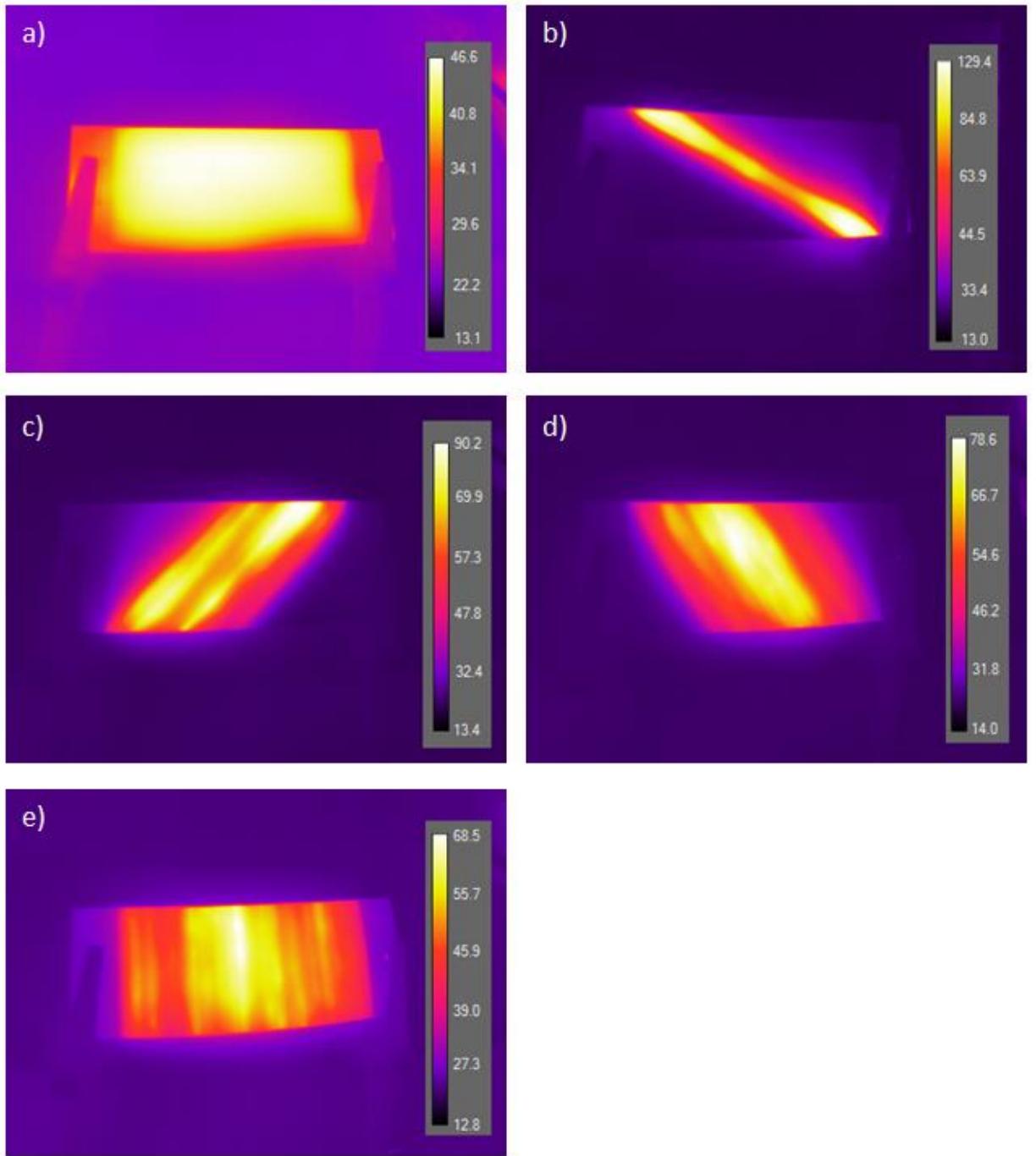


Abbildung 19 Thermografiemessung, Probenbreite 50mm, Faserorientierung a) 0° b) 30° c) 45° d) 60° e) 90°

Wie auf der Abbildung 19 zu erkennen ist, heizt sich lediglich die 0°-Probe gleichmäßig auf, da die Fasern dort in Flussrichtung des Stroms liegen. Bei den Proben mit Winkelorientierung von 30°, 45° und 60° entstehen jeweils Eckbereiche, die nicht vom Strom durchflossen werden. Aufgrund dieser Bereiche verkleinert sich die zu beheizende Querschnittsfläche (A) wie in Formel (15) dargestellt.

	$A = \left(l - \frac{b}{\tan(\alpha)}\right) \cdot b$	(15)
--	---	------

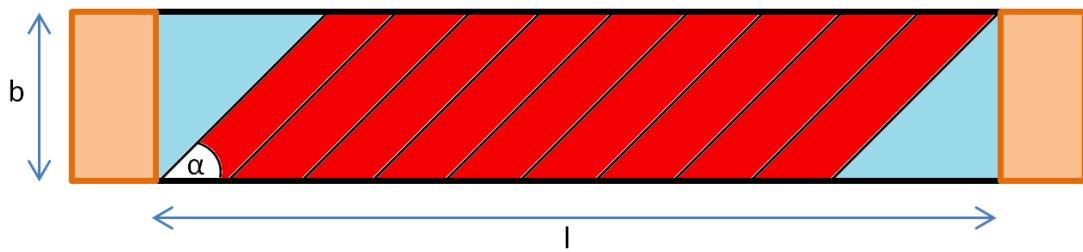


Abbildung 20 Ungleichmäßige Erwärmung der Probe durch Faserwinkelorientierung

Für die Proben ergeben sich daraus die in Tabelle 7 aufgeführten prozentualen Anteile der beheizten Querschnittsfläche, bezogen auf die Gesamtfläche. Es wird deutlich, dass mit zunehmender Breite der Proben, der Anteil der unbeheizten Bereiche steigt.

Tabelle 7 Prozentualer Anteil der beheizten Querschnittsfläche bezogen auf die Gesamtfläche

Probenbreite Faserwinkel	10mm	20mm	30mm	40mm	50mm
0°	100%	100%	100%	100%	100%
30°	82,7%	65,4%	48,0%	30,7%	13,4%
45°	90,0%	80,0%	70,0%	60,0%	50,0%
60°	94,2%	88,5%	82,7%	76,9%	71,1%
90°	100%	100%	100%	100%	100%

Betrachtet man unter diesem Aspekt die gemessenen Temperaturwerte aus Tabelle 8, wird der Zusammenhang schnell ersichtlich. Bei der 50mm breiten 30°-Probe wird im Vergleich zur 0°-Probe nur etwa $\frac{1}{7}$ der Querschnittsfläche beheizt, die restlichen rund 85% bleiben hingegen kalt. Damit ergeben sich auch mehr als doppelt so hohe Temperaturen, da bei gleicher zugeührter Leistung die Flächenleistungsdichte ($\frac{W}{m^2}$) steigt. Bei den schmaleren Proben tritt dieser Effekt entsprechend auch auf, fällt aber auf Grund der flächenmäßig kleineren „toten Bereiche“ geringer aus. Eine beliebige Erhöhung der Breite bei Proben mit einer Faserwinkelorientierung zwischen 30° und 60° ist demnach nicht sinnvoll, da dadurch ein hoher Anteil an ungenutztem Material das Gewicht sowie die Kosten des Heizsystems steigern würde. Bei der Probe mit einer Faserwinkelorientierung von 90° treten diese unbeheizten Bereiche nicht auf. Dennoch ist anhand der Thermografieaufnahmen aus Abbildung 19 e) zu erkennen, dass die Temperaturentwicklung ungleichmäßig ist. Aufgrund der Übergänge von Faser zu Matrix und den damit einhergehenden Widerstandssprüngen lässt sich diese Unregelmäßigkeit erklären.

Tabelle 8 Thermografie-Messergebnisse, M20 IM7, 50mm Probenbreite

	Mittelwert	Maximum	Minimum	Standardabw.
0°	43,9°C	47,6°C	34°C	2,8°C
30°	88,6°C	131,1°C	35,1°C	16,7°C
45°	65,1°C	91,3°C	37,4°C	9,4°C
60°	57,2°C	79,5°C	30,2°C	10,9°C
90°	51,2°C	69,4°C	28,1°C	5,9°C

Zusammenhang Widerstand Temperaturrentwicklung erklären → auf den ersten Blick
kein plausibler Zusammenhang

5 Versuchsaufbau II

Während bei dem ersten Versuchsaufbau der Einfluss des Materials und der Faserorientierung an einer rechteckigen Probengeometrie untersucht wurde, sollen im zweiten Experiment die Effekte bei einem U-förmigen Kurvenstück analysiert werden. Für die Tests wurden vier unterschiedliche Kurvenkonzepte entwickelt. Diese sind schematisch in der folgenden Abbildung dargestellt.

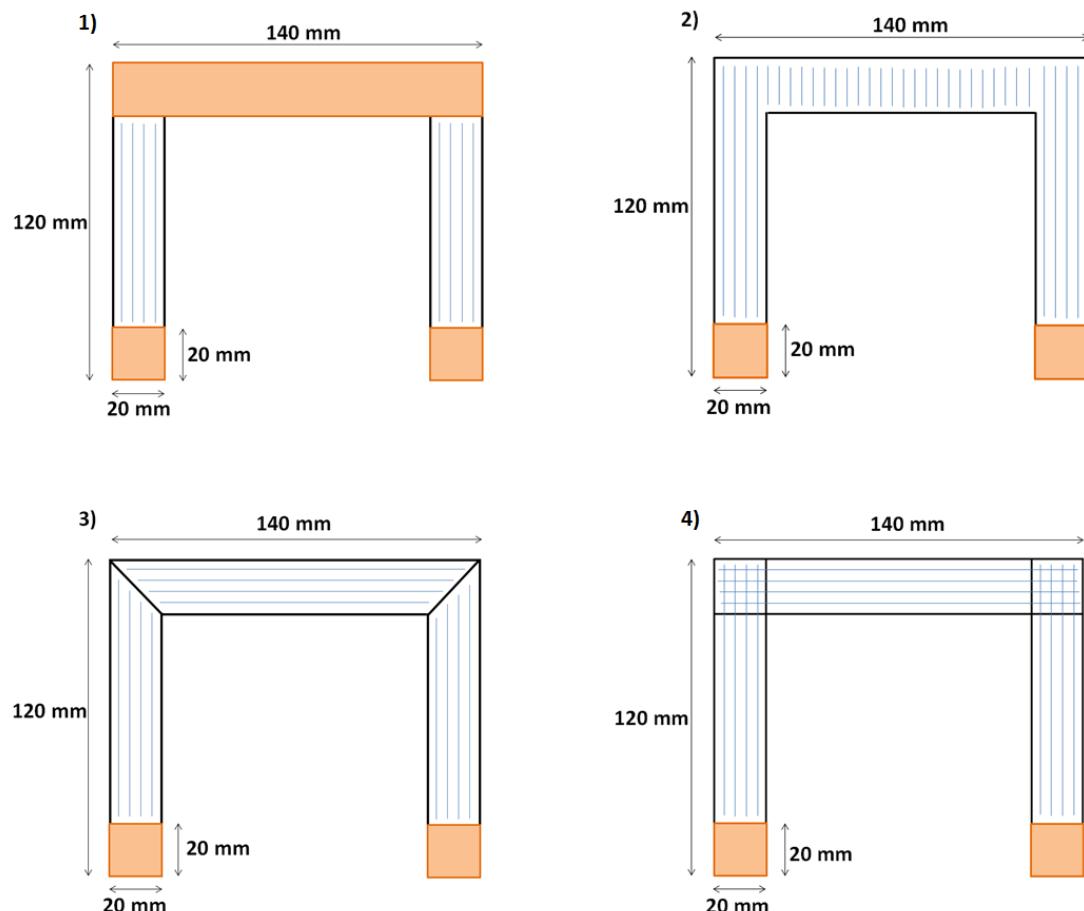


Abbildung 21 Kurvenkonzepte

Die orange hinterlegten Bereiche stellen das Kupfermesh dar, welches in den Anschlussbereichen für eine gleichmäßige Einleitung des Stroms in die Kohlenstoffschicht sorgt. Bei der ersten Variante fungiert das Kupfermesh zusätzlich als Leiter zwischen den Schenkeln des U-Profs. Während Variante zwei aus einem Stück geschnitten wird, sind die Varianten drei und vier jeweils dreiteilig. Hierbei werden die Zuschnitte entweder auf Stoß laminiert [3]) bzw. in den Winkeln überlappt [4]).

Alle vier Varianten stellen potentielle Gestaltungsmöglichkeiten des finalen Heizkonzeptes dar. Anhand verschiedener Kriterien sollen die Vor- und Nachteile der Konzepte identifiziert und so das Optimum ermittelt werden.

5.1 Verwendete Materialien

Da in diesem Versuchsaufbau nicht die unterschiedlichen Materialien im Vordergrund stehen, sondern der Fokus auf der geometrischen Gestaltung der Heizzonen liegt, wurde die Auswahl auf ein CFK-Prepreg begrenzt. Zur Anwendung kamen hierbei das CFK-Gelege 8552-IM7-35%-134, das GFK-Gewebe M21/56%/1080, sowie das Kupfermesh. Die Materialdaten können der Tabelle 1 entnommen werden. Auch der Autoklavzyklus stimmt mit dem aus Tabelle 2 überein.

5.2 Probenfertigung

Insgesamt besteht das Probenprogramm aus acht Proben. Die Proben umfassen die vier Kurvenkonzepte aus Abbildung 21, wobei jede Variante sowohl in 0° als auch in 30° Faserorientierung gefertigt wird. Erster Schritt der Probenfertigung ist analog zum Versuchsaufbau I das Auftauen, sowie das Zuschneiden des Materials am Cutter. Nach erfolgter Fertigung der Zuschnitte kann anschließend mit dem Laminieren begonnen werden. Als äußere Isolationsschicht dienen auch bei diesem Aufbau drei Glasfaserlagen mit den Abmaßen 160mm x 180mm. Auf den Vorder- und Rückseiten der Schenkel der CFK U-Profile werden jeweils vier 20mm x 20mm große Kupfermesh Quadrate angebracht.

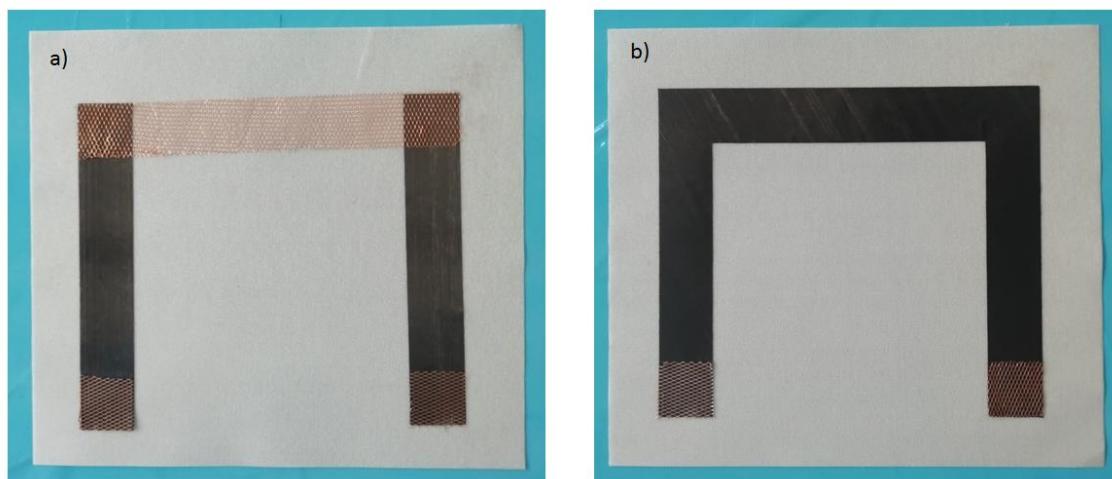


Abbildung 22 a) laminiertes Kurvenkonzept 1 b) laminiertes Kurvenkonzept 2

Anschließend kann mit dem Vakuumaufbau begonnen werden. Die Werkzeugplatte wird hierfür zunächst mit einer Trennfolie ausgelegt, auf der die Laminatpakete platziert werden. Als Harzflussbegrenzung dient wie beim Versuchsaufbau I ein Korkrand. Auch die in Trennfolie gewickelten Druckbleche werden analog zum ersten Aufbau auf die Proben gelegt. Ein Unterschied stellt die zusätzliche Verwendung einer perforierten Trennfolie sowie eines Abreißgewebes dar. Beide Hilfsmittel bedecken

den gesamten Aufbau und sollen einen erneuten Harzverlust wie bei dem ersten Fertigungsdurchlauf verhindern. Zur besseren Entlüftung folgt das Absauggewebe und abschließend die Abdichtung des Aufbaus mittels Vakuumfolie und Kittband.

Nach der Entnahme aus dem Autoklaven, konnten erneut Harzaustrittsstellen festgestellt werden. Der Harzverlust fiel jedoch geringer aus als zuvor. Auch das Entformen der Proben wurde durch den zusätzlichen Einsatz von perforierter Trennfolie und Abreißgewebe erleichtert. An den Proben selbst sind keine harzarmen Bereiche erkennbar, sodass diese besäumt und genietet werden können.

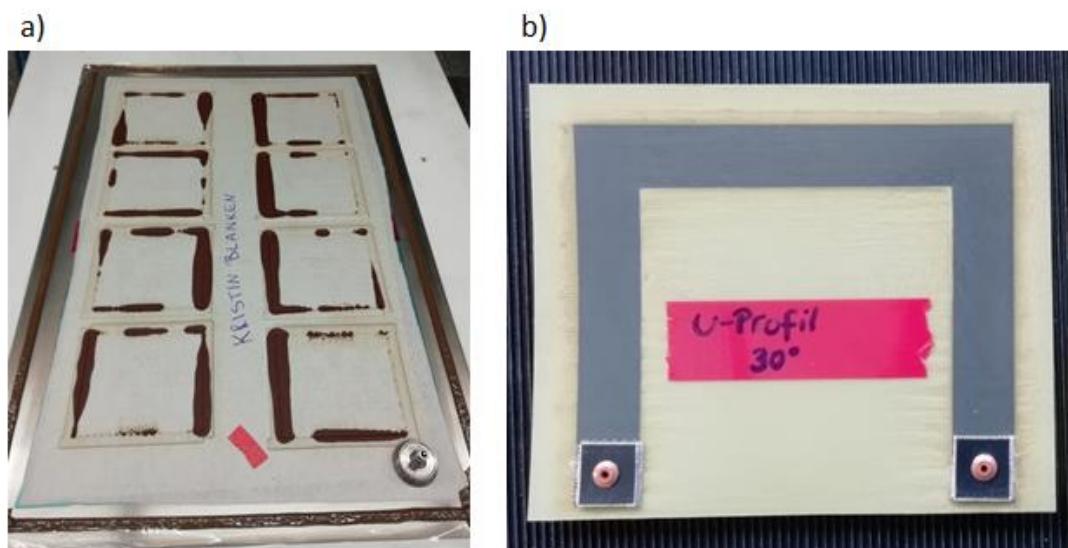


Abbildung 23a) Probenprogramm nach Autoklavzyklus b) genietete Probe

5.3 Versuchsdurchführung

Wie auch beim ersten Versuchsaufbau soll bei dem zweiten Probenprogramm sowohl der Widerstand als auch die Wärmeentwicklung mit Hilfe der Thermografiekamera analysiert werden. Anhand dieser Untersuchungen sollen dann Rückschlüsse auf die Vor- und Nachteile der jeweiligen Kurvenkonzepte geschlossen werden. Eine anschließende Beurteilung der Ergebnisse soll helfen, die geeignete Bauform für den späteren Anwendungsfall zu definieren.

5.3.1 Widerstandsmessung

Die Widerstandsmessungen der Kurvenproben wurden ebenfalls mit dem DC Milliohm Meter GOM-805 von GW Insteck durchgeführt. Der Versuchsaufbau kann dem Kapitel 4.3.1 entnommen werden.

5.3.2 Thermografie

Der prinzipielle Versuchsaufbau der Thermografiemessung entspricht dem aus Kapitel 4.3.2. Anders als bei den rechteckigen Probengeometrien wird die eingestellte Leistung in diesem Versuchsaufbau jedoch von 3W auf 5W erhöht. Da die vom Strom durchflossene Fläche zunimmt ist eine Erhöhung der Leistung erforderlich, um vergleichbare Temperaturen zu erreichen. Durch die voran gegangenen Widerstandsmessungen konnten die einzustellenden Spannungs- sowie Stromstärkewerte nicht mit ausreichender Genauigkeit berechnet werden, sondern mussten experimentell an der Power Supply PSI8720-15 von Elektro-Automatik geringfügig angepasst werden. Die eingestellten Werte sind der Tabelle 9 zu entnehmen. [Anhang?](#)

Tabelle 9 Stellwerte Thermografiemessung Kurvenproben

	Winkel	Spannung [V]	Stromstärke [A]	Leistung [W]
U-Profil	0°	75,1	0,065	4,8815
	30°	84,9	0,06	5,094
Kupfermesh	0°	2,9	1,74	5,046
	30°	38	0,13	4,94
Auf Stoß	0°	4,2	1,17	4,914
	30°	73,4	0,04	2,936
Überlappung	0°	3,7	1,37	5,069
	30°	48	0,105	5,04

Die Werte wurden bei allen Proben so gewählt, dass unter Einbeziehung einer Toleranz von etwa 3% eine Leistung von 5W zugeführt wurde, um so eine gute Vergleichbarkeit der Proben untereinander zu erzielen. Die einzige Ausnahme bildet hierbei die Probe, deren Heizlagen mit einer Faserorientierung von 30° auf Stoß laminiert wurden. Diese Probe erreicht bereits bei einer Leistung von etwa 3W so hohe Temperaturen, dass ein weiterer Anstieg zur Verbrennung der Matrix und damit zur Zerstörung der Probe geführt hätte.

5.4 Ergebnisauswertung

Ziel der Versuchsaufbauten war die Beurteilung aller Gestaltungsvarianten hinsichtlich des Erwärmungsverhaltens, der Herstellbarkeit, sowie der Reproduzierbarkeit. Zunächst werden hierfür die durchgeführten Widerstandsmessungen analysiert, die in Tabelle 10 zusammengetragen sind.

Tabelle 10 Widerstandsmessung Kurvenproben

Variante	Winkelorientierung	Widerstand [kΩ]
U-Profil	0°	1,2527
	30°	1,4555
Kupfermesh	0°	0,0016
	30°	0,3150
Auf Stoß	0°	0,0037
	30°	1,8673
Überlappung	0°	0,0028
	30°	0,4738

Da die Leitfähigkeit von Kupfer rund zwei Zehnerpotenzen höher ist als die der Kohlenstofffasern, war zu erwarten, dass der Widerstand der 0°-Kupfermesh-Variante am geringsten ist. Die Widerstände der Überlappungsvariante sind ebenfalls gering, da dort bei der 0°-Variante die Fasern stets in Flussrichtung des Stroms liegen. Im Randbereich vergrößert sich aufgrund der Überlappung der zwei CFK-Heizlagen der Querschnitt, wodurch der Widerstand ebenfalls verringert wird. Die gefertigten Proben mit einer Faserorientierung von 30° weisen jeweils entsprechend höhere Widerstände auf. Ähnlich verhält es sich mit der Variante, bei der die Lagen auf Stoß laminiert wurden. Die Fasern der 0°-Variante liegen durchgehend in Stromflussrichtung, lediglich am Übergang kann es zur Erhöhung des Widerstandes kommen, da dort vermehrt Harz zwischen die Schnittstelle gelangen kann und die Leitfähigkeit so verschlechtert wird. Besonders bei der auf Stoß laminierten Probe mit einer Faserwinkelorientierung von 30° ist dieser Effekt zu beobachten.

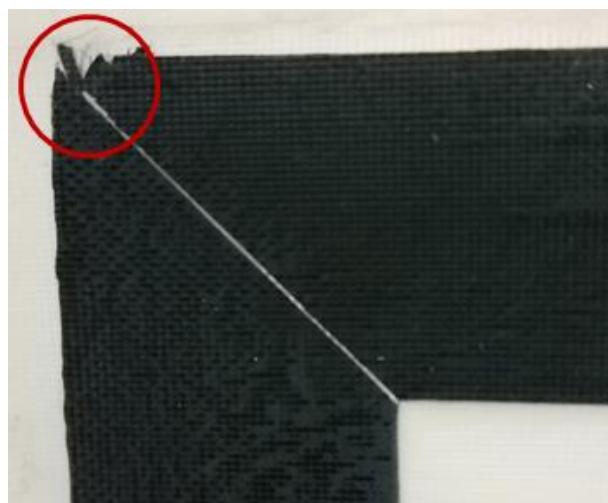


Abbildung 24 Kurvenvariante auf Stoß laminiert mit einer Faserwinkelorientierung von 30°

Abbildung 24 zeigt, dass sich ein harzgefüllter Spalt zwischen den auf Stoß laminierten CFK-Lagen gebildet hat, sodass diese ausschließlich in der oberen linken Ecke über Kohlenstofffasern verbunden sind. Der Querschnitt, über den Strom fließen kann ist somit stark verringert, was eine Erhöhung des Widerstandes mit sich zieht. Der Spalt könnte durch ungenaues Arbeiten während der Fertigung oder durch ein Verschwimmen der Lagen während der Aushärtung im Autoklaven entstanden sein.

Vergleichsweise hohe Widerstände stellen sich auch bei den U-Profil-Varianten ein. Ausschlaggebend hierfür ist, dass die Faserorientierung innerhalb des Profils relativ zum Stromfluss variiert. So liegen die Fasern entweder in 0°- oder 90°-, beziehungsweise in 30°- oder 60°-Richtung vor. Wie die Ergebnisauswertung aus dem Versuchsaufbau I bereits gezeigt hat, hat dieser Faserwinkel einen erheblichen Einfluss auf den Widerstand der Probe.

Die Ergebnisse der Thermografiemessungen aus Abbildung X unterstreichen die bereits gewonnenen Erkenntnisse noch weiter. So zeigt sich beispielsweise bei den Wärmebildern der U-Profile, dass die Erwärmung eine starke Abhängigkeit von der Faserwinkelorientierung aufweist. Der Bereich mit einer Faserwinkelausrichtung relativ zum Stromfluss von 90° und einen dadurch bedingten hohen Widerstand, erwärmt sich deutlich stärker, als die niederohmigen Schenkelseiten mit einer Orientierung von 0°. Während die durchschnittliche Temperatur der 90°-Lage bei 95,1°C liegt, entspricht die mittlere Temperatur der 0°-Lagen in etwa der Raumtemperatur. Auch bei der U-förmigen Probe mit den Winkelorientierungen von 30° und 60° zeigt sich dieses Verhalten bei der Erwärmung. Da die Differenz der unterschiedlichen Orientierungen jedoch lediglich 30° und nicht wie bei der vorangegangen Probe 90° beträgt, fällt der Effekt entsprechend geringer aus. So liegen die durchschnittlichen Temperaturen bei etwa 40°C im Bereich der 30° orientierten Schenkel und bei rund 72°C im Bereich der 60°-Ausrichtung. Außerdem kalte Ecken im Anschlussbereich und in der oberen rechten Ecke → bedingt durch Faserverlauf

Dieselben Effekte können ebenfalls bei den mittels Kupfermesh gefertigten Proben beobachtet werden. Da der Kupferstreifen eine deutlich bessere Leitfähigkeit besitzt, fällt die Erwärmung im Vergleich zu den CFK-Lagen so gering aus, dass diese mit der Thermografiekamera nicht detektiert wird. Die Erwärmung der Schenkelseiten ist vergleichbar mit den Messergebnissen aus dem Versuchsaufbau I.

Die Proben, die auf Stoß laminiert wurden, erwärmen sich vor allem an der Schnittstelle besonders stark, da dort der Übergang wie beschrieben einen größeren Widerstand aufweist. Der in Abbildung 24 gezeigten Probe konnte aus diesem Grund

lediglich eine Leistung von rund 3W, anstatt der geforderten 5W, zugeführt werden (Vgl. Tabelle 9). Auch die auf Stoß laminierte 0°-Probe erreicht bei einer Leistung von 5W eine kritische Höchsttemperatur von 139,5°C.

Die durch Überlappung gefertigten Proben weisen im Vergleich die gleichmäßigste Erwärmung auf. Die Faserorientierung in den nicht überlappenden Bereichen ist jeweils dieselbe, sodass bei gleichem Widerstand die Temperaturverteilung annähernd homogen ist. Auffällig bei der Probe, deren Lagen in 30°-Richtung verlaufen, sind vor allem die Überschneidungsbereiche, da dort die Wärmeentwicklung sehr gering ist. Erklärt werden kann dieser Effekt mit der Querschnittserhöhung hervorgerufen durch die doppelagigen CFK-Schichten. Aus der Formel (2) ist bekannt, dass eine solche Vergrößerung der Fläche mit einer Verringerung des Widerstandes einhergeht. Eine Verringerung des Widerstandes verursacht wiederum einen Abfall im Temperaturprofil. Bei den überlappenden Proben mit einer Faserwinkelorientierung von 0° ist dieser Effekt nicht so ausgeprägt. Da in diesem Bereich 0° und 90° Fasern überlagert werden, wird die Widerstandsverringerung durch die hochohmige 90° Orientierung ausgeglichen, wodurch eine weitestgehend homogene Erwärmung vorliegt. Erwärmung in den Ecken noch genau beschreiben

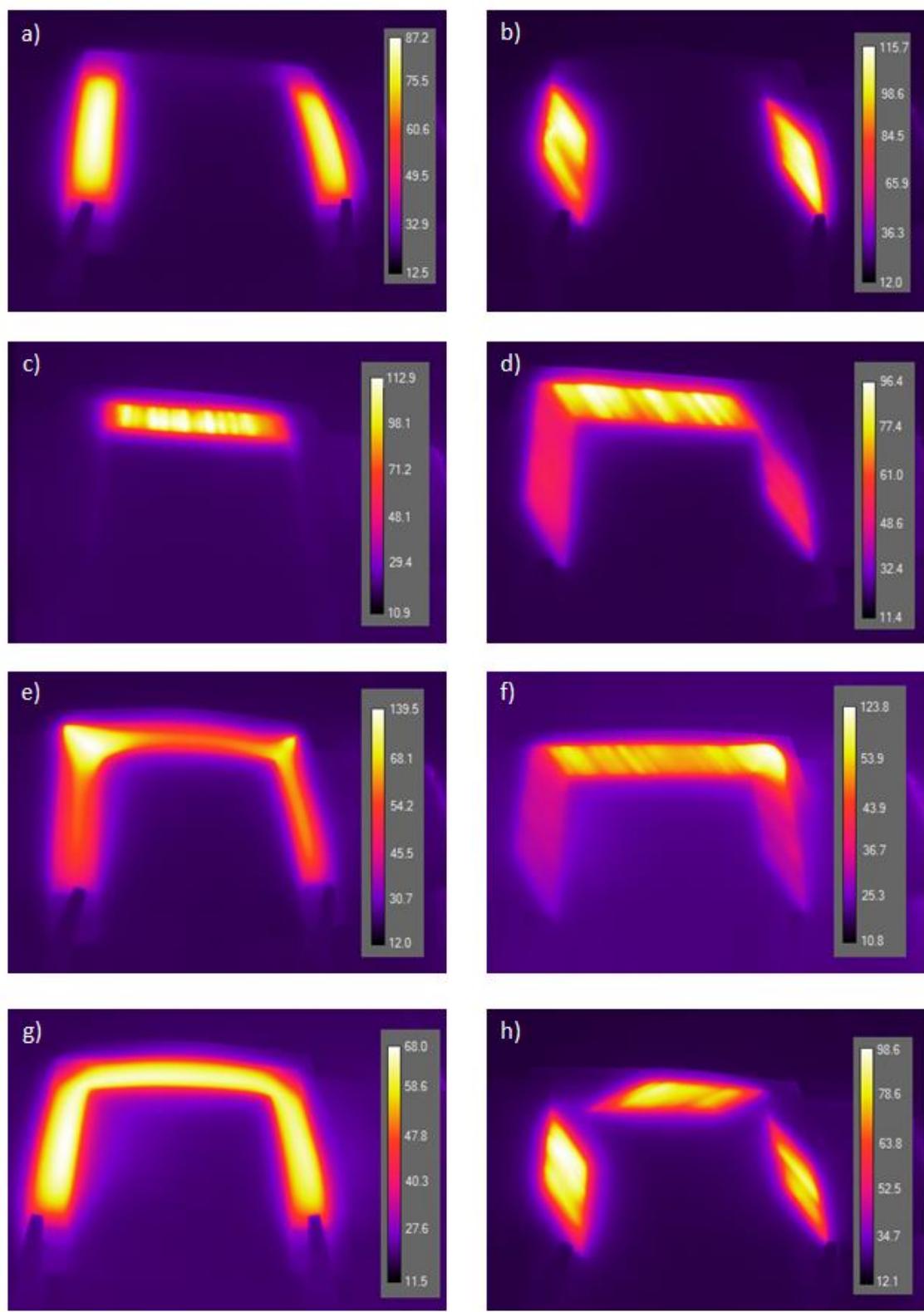


Abbildung 25 Kurvenkonzepte a) Kupfermesh 0° b) Kupfermesh 30° c) U-Profil 0° d) U-Profil 30° e) Stoß 0° f) Stoß 30° g) Überlappung 0° h) Überlappung 30°

Tabelle 11 Thermografie-Messergebnisse Kurvenvarianten

Variante	Winkel-orientierung	Mittelwert [°C]	Maximum [°C]	Minimum [°C]	Standard-abw. [°C]
U-Profil	0°	40,4	112,9	18,7	30,9
	30°	47,6	96,4	19,2	18,9
Kupfermesh	0°	56,8	87,2	22,0	22,0
	30°	54,3	115,7	19,5	32,7
Auf Stoß	0°	54,7	139,5	26,8	15,0
	30°	37,9	123,8	19,3	13,2
Überlappung	0°	56,3	68,0	26,4	8,5
	30°	51,0	98,6	21,0	21,4

Tabelle 12 Bewertungsmatrix Kurvenvarianten

	U-Profil	Kupfermesh	Auf Stoß	Überlappung
Differenzen im Temperaturprofil	-	-	--	++
Ausnutzung der Heizfläche	-	o	--	++
Fertigbarkeit	++	+	--	+
Reproduzierbarkeit	++	+	--	+

Schlussfolgerungen aus Bewertungsmatrix

6 Zusammenfassung

7 Ausblick

8 Literaturverzeichnis

- [1] Prof. Dr.-Ing. D.Scholz, „Eis- und Regenschutz,“ [Online]. Available: <http://handbuch.profscholz.de/>. [Zugriff am 2. Mai 2019].
- [2] „FlightLearnings,“ [Online]. Available: <http://www.flightlearnings.com/2012/10/29/types-of-icing-on-an-aircraft/>. [Zugriff am 3. Mai 2019].
- [3] Bureau of Meteorology, Australian Government , „Airframe Icing,“ 12. Juni 2015. [Online]. Available: <http://www.bom.gov.au/aviation/data/education/icing.pdf>. [Zugriff am 2. Mai 2019].
- [4] „Eisschutz für Flugzeuge: Neues Heizsystem bringt Eis ins Schwitzen,“ DLR, 30. Januar 2019. [Online]. Available: https://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabcid-10081/151_read-31938/#/gallery/33352. [Zugriff am 6. Mai 2019].
- [5] C. Cutler, „How Deicing Boots Work,“ Boldmethod, 15. Oktober 2015. [Online]. Available: <https://www.boldmethod.com/learn-to-fly/systems/how-deicing-boots-work/>. [Zugriff am 7. Mai 2019].
- [6] „Eiskratzen im Flugverkehr: DLR untersucht neue Methoden zur Enteisung von Flugzeugen,“ DLR, 21. Januar 2015. [Online]. Available: https://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabcid-10081/151_read-12473/#/gallery/17439. [Zugriff am 7. Mai 2019].
- [7] „Aircraft Wing and Stabilizer Deicing Systems,“ Aeronautics Guide, [Online]. Available: <https://www.aircraftsystemstech.com/2017/05/wing-and-stabilizer-deicing-systems.html>. [Zugriff am 7. Mai 2019].
- [8] „Flugzeugenteisung und Vereisungsschutz für Flugzeug und Rollfeld,“ Ultrablue - Aviation Chemicals, [Online]. Available: <http://www.ultrablue-deicing.de/>. [Zugriff am 7. Mai 2019].
- [9] M. Platthaus, „Flugzeug-Enteisungsmittel stellen Problem für das Grundwasser dar,“ Laborpraxis, 29. April 2015. [Online]. Available: <https://www.laborpraxis.vogel.de/flugzeug-enteisungsmittel-stellen-problem-fuer->

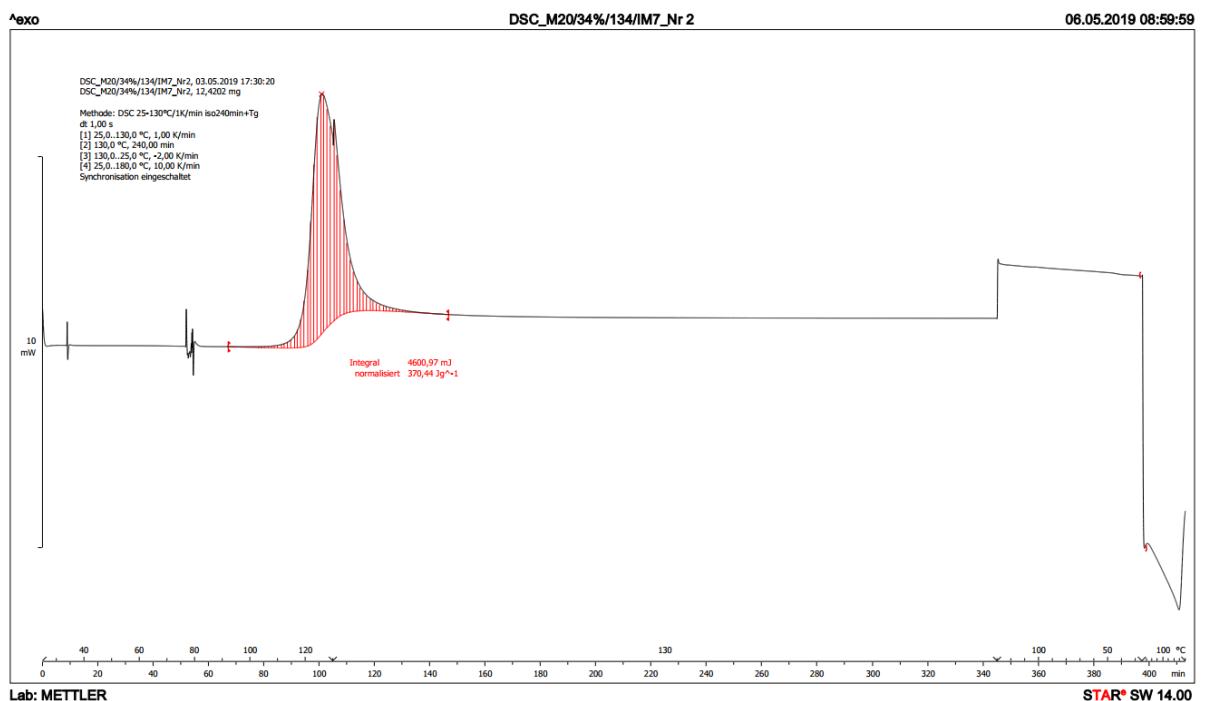
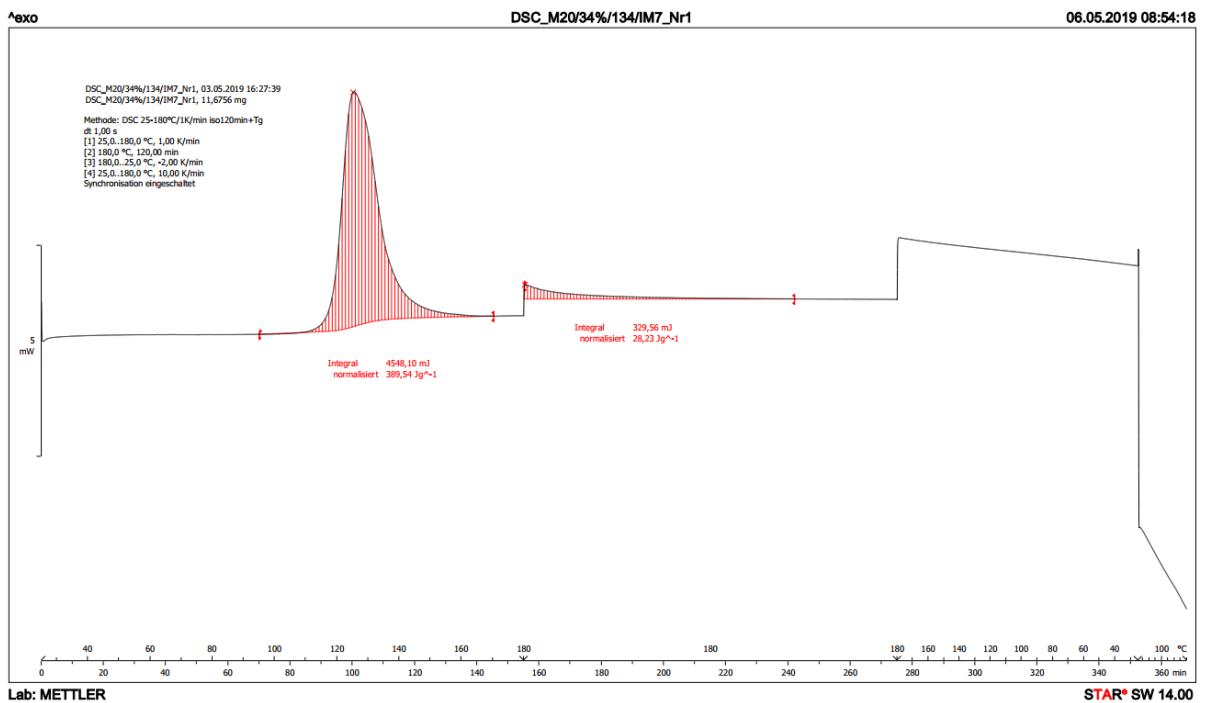
das-grundwasser-dar-a-487772/. [Zugriff am 7. Mai 2019].

- [1] A. Brooks, M. Cassissa und S. Halls, „Leading the way toward more efficient aircraft,“ GKN Technology, 17. Juli 2014. [Online]. Available: <https://studylib.net/doc/10747757/gkn-technology---leading-the-way-toward-more-efficient-ai....> [Zugriff am 7. Mai 2019].
- [1] „787 No-Bleed Systems: Saving fuel and enhancing operational efficiencies,“ Boeing, [Online]. Available: https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_4_07/article_02_4.html. [Zugriff am 8. Mai 2019].
- [1] B. Schlipf, D. Düring und A. Potozky, „LuFo 5.1 - LDAinOp - WP 2.3,“ 7. November 2] 2017.
- [1] „Berechnungsgrundlagen für elektrische Heizelemente,“ Türk+Hillinger Thermal 3] Technology, Februar 2018. [Online]. Available: https://www.tuerk-hillinger.com/wp-content/uploads/2017/09/Berechnungsgrundlagen_D.pdf. [Zugriff am 8. Mai 2019].
- [1] J. Sloan, „787 integrates new composite wing deicing system,“ Composite World, 4] 30. Dezember 2008. [Online]. Available: <https://www.compositesworld.com/articles/787-integrates-new-composite-wing-deicing-system>. [Zugriff am 8. Mai 2019].
- [1] J. Hale, „Boeing 787 - From the Ground Up,“ Aeromagazin. 5]
- [1] „Spezifischer Leitwert oder elektrische Leitfähigkeit κ (kappa),“ Elektronik 6] Kompendium, [Online]. Available: <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/grd/0201116.htm>. [Zugriff am 15. Mai 2019].
- [1] „Elektrischer Widerstand R ,“ Elektronik Kompendium, [Online]. Available: 7] <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/grd/0201112.htm>. [Zugriff am 15. Mai 2019].
- [1] „Spezifischer Widerstand ρ (rho),“ Elektronik Kompendium, [Online]. Available: 8] <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/grd/1003191.htm>. [Zugriff am 15. Mai 2019].

- [1] . A. M. Helmenstine, „Table of Electrical Resistivity and Conductivity,” ThoughtCo.,
 9] 24. September 2018. [Online]. Available: <https://www.thoughtco.com/table-of-electrical-resistivity-conductivity-608499>. [Zugriff am 14. Mai 2019].
- [2] A. Todoroki und J. Yoshida, „Electrical Resistance Change of Unidirectional CFRP
 0] Due to Applied Load,” JSME International Journal, Tokio, Japan, 2004.
- [2] K. Takahashi und T. Hahn, „Investigation of temperature dependency of electrical
 1] resistance changes for structural management of graphite/polymer composite,”
 Journal of Composite Materials, 2016.
- [2] B. Aunkofer, „Elektrischer Widerstand und Leitwert,” 16. November 2008. [Online].
 2] Available: <https://www.der-wirtschaftsingenieur.de/index.php/elektrischer-widerstand-und-leitwert/>. [Zugriff am 16. Mai 2019].
- [2] „HexPly® 8552 - Epoxy matrix (180°C/356°F curing matrix),” Hexcel® - Product Data
 3] Sheet, 2016.
- [2] „HexPly® M20 - 130°C (265°F) curing epoxy matrix,” Hexcel® - Product Data Sheet,
 4] 2015.
- [2] „HexPly® M21 - 180°C (350°F) curing epoxy matrix,” Hexcel® - Product Data Sheet,
 5] 2015.
- [2] „Berührungslose Temperaturmessung (Thermografie),” VdS Schadenverhütung,
 6] 2011.
- [2] „Thermografie,” Chemie.de, [Online]. Available:
 7] <https://www.chemie.de/lexikon/Thermografie.html>. [Zugriff am 11. Juni 2019].
- [2] A. Book, „Definition und Einfluss des Emissionsgrades bei der berührungslosen
 8] Temperaturmessung,” 2016.
- [2] „A summary of Classical Lamination Theory,” [Online]. Available:
 9] https://wstein.org/edu/2010/480b/projects/05-lamination_theory/A%20summary%20of%20Classical%20Lamination%20Theory.pdf. [Zugriff am 15. Juli 2019].
- [3] Prof. Dr. Joachim Rösler, „Vorlesungsskript: Hochtemperatur- und

- 0] Leichtbauwerkstoffe,“ Sommersemester 2019.
- [3 „Hexcel® HexTow™ AS4 Carbon Fiber,“ MatWeb - Material Property Data, [Online].
- 1] Available:
<http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=d875685373f14f79b6ed7bf0d9adcab6>. [Zugriff am 15. Juli 2019].
- [3 „Hexcel® HexTow® IM7 12K Intermediate Modulus Carbon Fiber,“ MatWeb -
- 2] Material Property Data, [Online]. Available:
<http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=0ec4ff24a0604bb2b89e492174d3bce4&ckck=1>. [Zugriff am 15. Juli 2019].

Anhang A



Anhang B

Tabelle 13 M20 IM7: Spannungs- und Stromstärkewerte bei P=3W

	0°		30°		45°		60°		90°	
	U [V]	I [A]	U [V]	I [A]	U [V]	I [A]	U [V]	I [A]	U [V]	I [A]
10mm	2,45	1,22	48,68	0,06	78,18	0,04	101,48	0,03	129,26	0,02
20mm	1,73	1,73	39,39	0,08	46,50	0,06	92,70	0,03	122,08	0,02
30mm	1,45	2,07	35,67	0,08	47,10	0,06	89,04	0,03	113,13	0,03
40mm	1,22	2,45	14,95	0,20	44,13	0,07	86,55	0,03	107,46	0,03
50mm	1,10	2,74	14,00	0,21	43,33	0,07	78,41	0,04	98,03	0,03

Tabelle 14 8552 IM7: Spannungs- und Stromstärkewerte bei P=3W

	0°		30°		45°		60°		90°	
	U [V]	I [A]								
10mm	2,41	1,24	33,85	0,09	48,66	0,06	58,01	0,05	74,14	0,04
20mm	1,68	1,79	21,49	0,14	33,72	0,09	50,21	0,06	57,02	0,05
30mm	1,40	2,15	19,82	0,15	31,86	0,09	43,46	0,07	56,43	0,05
40mm	1,21	2,47	14,18	0,21	27,46	0,11	31,06	0,10	52,93	0,06
50mm	1,08	2,77	9,00	0,33	23,10	0,13	31,97	0,09	47,58	0,06

Tabelle 15 8552 AS4: Spannungs- und Stromstärkewerte bei P=3W

	0°		30°		45°		60°		90°	
	U [V]	I [A]								
10mm	2,51	1,20	16,51	0,18	23,52	0,13	28,57	0,11	38,59	0,08
20mm	1,73	1,73	11,12	0,27	18,15	0,17	22,35	0,13	29,95	0,10
30mm	1,45	2,07	9,89	0,30	14,96	0,20	18,31	0,16	25,91	0,12
40mm	1,22	2,45	7,22	0,42	12,81	0,23	16,06	0,19	22,89	0,13
50mm	1,10	2,74	4,84	0,62	9,84	0,30	13,89	0,22	19,63	0,15