

IB 131-2015/038

***Bewertung kohlenstoffbasierter Füllstoffe zur
Absorption von Radarstrahlung in
Verbundwerkstoffen von Rotorblättern einer
Windkraftanlage***

Lucas Kirsch



**Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik
Braunschweig**

05 / 2015

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

IB 131-2015/038

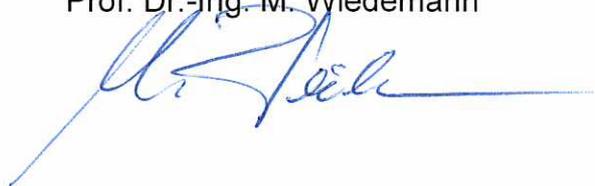
***Bewertung kohlenstoffbasierter Füllstoffe zur Absorption
von Radarstrahlung in Verbundwerkstoffen von Rotorblättern
einer Windkraftanlage***

Braunschweig, 05, 2015

Der Bericht umfasst:

87 Seiten

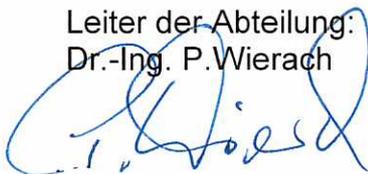
Institutsleiter:
Prof. Dr.-Ing. M. Wiedemann



Verfasser:
Lucas Kirsch



Leiter der Abteilung:
Dr.-Ing. P. Wierach



Betreuer:
Jürgen Mosch





Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt



Masterarbeit zur Erlangung des Akademischen Grades

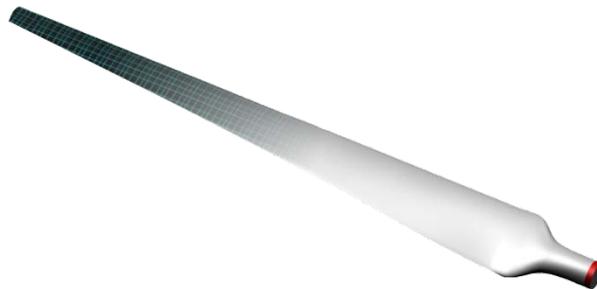
Master of Science (M. Sc.)

im Studiengang

Luft- und Raumfahrttechnik

an der Technischen Universität Berlin

*„Bewertung kohlenstoffbasierter Füllstoffe zur Absorption von Radarstrahlung in
Verbundwerkstoffen von Rotorblättern einer Windkraftanlage“*



Vorgelegt von: Lucas R. Kirsch

Matr.-Nr.: 310779

20. März 2015

Erstgutachter:

Professor Dr.-Ing. R. Schuhmann

Technische Universität Berlin

Zweitgutachter

Professor Dr.-Ing. M. Wiedemann

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

DANKSAGUNG

Mein besonderer Dank gilt **Herrn Professor Dr. Rolf Schuhmann** und **Herrn Dipl.-Ing. Jürgen Mosch** für die vielen hilfreichen Anregungen und Diskussionen, die sehr zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Auch möchte ich **Herrn Professor Dr. Martin Wiedemann** für die Rolle als Zweitgutachter danken.

Des Weiteren gilt mein besonderer Dank **Herrn Dr. Erich Kemptner** und **Herrn Dr. Ali Eren Culhaoglu** vom Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme, Aufklärung und Sicherheit in Oberpfaffenhofen für die Durchführung der Hohlleitersmessungen und ihre Geduld, Fragen auch über die etwas größere Distanz hin zu beantworten. Auch gilt mein Dank **Frau Dipl.-Ing. Jutta Hesselbach** für die Betreuung der Dispergierversuche am Institut für Partikeltechnik.

Herrn Leon Braun möchte ich für seine tatkräftige Unterstützung bei der GFK-Fertigung danken.

Darüber hinaus danke ich allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Abteilung Multifunktionswerkstoffe am Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik für die angenehme Atmosphäre.

ABSTRACT

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Radarreflexion von Rotorblättern einer Windkraftanlage im Frequenzbereich zwischen 2,7 und 3,4 GHz (ATC-Radaranlagen). Ziel der Arbeit ist es, die Reflexionsdämpfung der Rotorblätter, die aus Glasfaserkunststoff und reflektierenden Bauelementen bestehen, zu maximieren. Dafür wird in der Arbeit ein aus Impedanzschichten aufgebautes Multilayersystem in einen Glasfaserkunststoff integriert. Die Entwicklung des Multilayerabsorbers orientiert sich an den technischen und wirtschaftlichen Randbedingungen der Rotorblattfertigung. Ausgehend von diesen werden kohlenstoffbasierte Materialien zur Herstellung dünner Impedanzschichten eingesetzt, die zwischen die Glasfaserhalbzeuge des Glasfaserkunststoffes integriert werden. Bei der Herstellung der Impedanzschichten werden die kohlenstoffbasierten Materialien in unterschiedlicher Menge auf ein glasfaserbasiertes Trägermaterial aufgebracht, um die Permittivität der Impedanzschicht gezielt zu modifizieren. Die elektromagnetische Charakterisierung der Schichten erfolgt durch Hohlleiterversuche, in denen die Glasfaserkunststoffe inklusive der Impedanzschichten vermessen werden. Aus diesen Ergebnissen werden in einer computergestützten Simulation, die auf einem *Transmission-Line*-Modell basiert, die Parameter der einzelnen Schichten berechnet. Anschließend werden die Materialparameter genutzt, um einen optimierten Schichtaufbau eines Multilayerabsorbers zu bestimmen. Das Ergebnis der Arbeit ist ein Multilayerabsorber, der im Hohlleiter evaluiert wird.

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Die selbstständige und eigenhändige Anfertigung

versichere ich an Eides statt.

Lucas Kirsch

INHALTSVERZEICHNIS

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS III

ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....IV

TABELLENVERZEICHNIS..... VI

SYMBOLVERZEICHNIS..... VII

1 EINLEITUNG 1

 1.1 Hintergrund 1

 1.2 Aufgabenstellung und Struktur der Arbeit 2

2 GRUNDLAGEN 5

 2.1 Elektromagnetische Wellen..... 5

 2.2 ATC-Radaranlagen..... 8

3 STAND DER TECHNIK 10

 3.1 Faserverbundwerkstoffe im Rotorblatt..... 10

 3.2 Methoden der Reflexionsdämpfung 11

 3.3 Kohlenstoffbasierte Materialien..... 15

 3.4 Applikation von RAM in Faserverbunden 17

4 LÖSUNGSENTWURF 19

 4.1 Anforderungen und Randbedingungen des Absorbersystems 19

 4.2 Auswahl eines Vorentwurfs 21

 4.2.1 Der Absorberentwurf 21

 4.2.2 Selektion der untersuchten RAM..... 22

 4.2.3 Verfahren zur Herstellung der Impedanzschichten..... 23

5 ENTWICKLUNG DER MATHEMATISCHEN REFLEXIONSMODELLE..... 24

 5.1 Charakterisierung der Schichten 27

 5.2 Simulation des Multilayerabsorbers..... 31

 5.3 Evaluierung des Transmission Line Modells 31

6 CHARAKTERISIERUNG DER ABSORBERSCHICHTEN 37

6.1	Ausgangsmaterialien für die Herstellung der Impedanzschichten	37
6.1.1	Qualitätskontrolle der selektierten kohlenstoffbasierten Füllstoffe	37
6.1.2	Trägermaterialien	39
6.1.3	Adhensions- und Dispersionsadditive.....	40
6.2	Herstellung der Impedanzschichten	41
6.2.1	Herstellung der faserbasierten Impedanzschichten.....	42
6.2.2	Herstellung der <i>Carbon Black</i> basierten Impedanzschichten	46
6.2.3	Zwischenbewertung der Herstellungsmethoden und Fasermaterialien	49
6.3	Herstellung der GFK-Platten.....	51
6.4	Elektromagnetische Charakterisierung der Absorberschichten	56
6.4.1	Versuchsaufbau und Probekörper	56
6.4.2	Darstellung und Bewertung der Messergebnisse	58
6.4.3	Darstellung und Bewertung der Materialparameter.....	62
6.5	Mechanische Charakterisierung der Impedanzschichten	67
7	ENTWICKLUNG UND HERSTELLUNG DES MULTILAYERABSORBERS	71
7.1	Auslegung des Multilayerabsorbers	71
7.2	Herstellung und Vermessung im Hohlleiter.....	73
	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	78
	LITERATURVERZEICHNIS	83
	ANHANG	i

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ATC	Air Traffic Control
SCNT	<i>Single Walled Carbon Nanotubes</i>
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
EM	Elektromagnetisch
FVG	Faservolumengehalt
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
ILLS	<i>Interlaminar Shear Strength</i>
IPat	Institut für Partikeltechnik
PAN	Polyacrylnitril
PANFc	Geschnittene PAN-Fasern (<i>chopped</i>)
PANFm	Gemahlene PAN-Fasern (<i>milled</i>)
PiFc	Geschnittene Pechfaser (<i>Pitch Fiber chopped</i>)
PiFm	Gemahlene Pechfaser (<i>Pitch Fiber milled</i>)
PVB	Polyvinylbutyral
RAM	Radarbasorbierendes Material
REM	Rasterelektronenmikroskop
rpm	<i>rounds per minute</i>
TE	Transveral elektrische Welle
TEM	Transversal elektromagnetische Welle
MWCNT	<i>Multi Walled Carbon Nanotubes</i>
WEA	Windkraftanlage
wt. %	Gewichtsprozent

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Darstellung der verhinderten Leistung bei WEA-Projekt im Jahr 2013.....	2
Abbildung 2: Struktur der Arbeit.....	4
Abbildung 3: TE ₁₀ -Welle in einem rechteckigen Hohlleiter	7
Abbildung 4: Statische Muster von Rotorblattkonstruktionen	11
Abbildung 5: Pyramidales Absorbersystem.....	13
Abbildung 6: Gradiertes <i>Loading</i>	13
Abbildung 7: <i>Matching Layer</i>	14
Abbildung 8: <i>Salisbury Screen</i> und <i>Dallenbach-Layer</i>	14
Abbildung 9: Explosionsansicht des Absorbersystems	22
Abbildung 10: Darstellung eines Vierpols als S-Matrix.....	25
Abbildung 11: <i>Transmission Line</i> Modell des GFKs	28
Abbildung 12: <i>Transmission Line</i> Modell der Impedanzschichten	29
Abbildung 13: Prozessschritte bei der Charakterisierung der Schichten.....	30
Abbildung 14: <i>Transission Line</i> Modell des Multilayerabsorbers	31
Abbildung 15: Vergleich der berechneten Permittivität einer reinen GFK-Schicht	33
Abbildung 16: Korrelation der Permittivität und der Distanz	34
Abbildung 17: Zulässige Werte der Distanz bei einer Plexiglasprobe	35
Abbildung 18: Exemplarischer Vergleich der berechneten Impedanzen	36
Abbildung 19: Mikroskopaufnahme: <i>Carbon Black</i>	37
Abbildung 20: Mikroskopaufnahme: unbehandelte PAN-Fasern (geschnitten).....	38
Abbildung 21: Mikroskopaufnahme: unbehandelte Pech-Fasern (geschnitten).....	38
Abbildung 22: Mikroskopaufnahme: unbehandelte PAN-Fasern (gemahlen)	39
Abbildung 23: Mikroskopaufnahme: unbehandelte Pech-Fasern (gemahlen).....	39
Abbildung 24: <i>Carbon Black</i> -Beschichtung mit PVB und Addid 240.....	41
Abbildung 25: Beschichtete Pech-Fasern und PAN-Fasern	41
Abbildung 26: Acetonbehandelte geschnittene Kohlenstofffasern.....	42
Abbildung 27: Darstellung des Sonifiers	44
Abbildung 28: Faserbeschichtungsvorrichtung	45
Abbildung 29: Bohrungen im Acrylkasten der Beschichtungsvorrichtung.....	45
Abbildung 30: Mikroskopaufnahme: Carbon Black-PVB-Ethanol-Suspension	48
Abbildung 31: Darstellung des Tauchbeschichtungsverfahrens	49

Abbildung 32: Beschichtetes Glasgewebe mit gemahlenen Kurzfasern	50
Abbildung 33: Beschichtetes Glasgewebe mit geschnittenen Kurzfasern.....	51
Abbildung 34: Darstellung eines Aufbaus für ein VAP®-Infusionsverfahren.....	53
Abbildung 35: Aufbau eines VAP®-Infusionsverfahrens vor der Harzinfusion.....	53
Abbildung 36: Mikroskopaufnahme: Schnittbild einer GFK-Platte.....	55
Abbildung 37: 3D-Ansicht des Hohlleiters und seines Profils	57
Abbildung 38: Reflexionsdämpfung eines Lacksystems.....	59
Abbildung 39: <i>Carbon Black</i> – gemessene Dämpfungen.....	60
Abbildung 40: Geschnittene PAN-Fasern - gemessene Dämpfungen.....	61
Abbildung 41: Geschnittene Pech-Fasern - gemessene Dämpfungen	62
Abbildung 42: Relative Permittivität des GFK.....	63
Abbildung 43: Impedanz der PAN-Faser-modifizierten Schichten.....	64
Abbildung 44: Impedanz der Pech-Faser-modifizierten Schichten	65
Abbildung 45: Gemittelte Impedanzen der Schichten	66
Abbildung 46: Vergleich der Impedanz in Abhängigkeit des Flächengewichts.....	67
Abbildung 47: Probekörper für den 0°/90° Schubversuch	69
Abbildung 48: Bruchverhalten im Schubversuch	70
Abbildung 49: Ergebnisse des Schubversuchs	70
Abbildung 50: Prozessschritte bei der Auslegung des Multilayersystems	72
Abbildung 51: Konfigurationen des Multilayerabsorbers	73
Abbildung 52: Simulierte Reflexionsdämpfung der Multilayerabsorber	73
Abbildung 53: Aufteilung der Preform.....	74
Abbildung 54: Gemessene Reflexionsdämpfung des Multilayerabsorbers (K. 1)	75
Abbildung 55: Gemessene und simulierte Reflexionsdämpfung (K. 1).....	75
Abbildung 56: Gemessene Reflexionsdämpfung des Multilayerabsorbers (K. 2)	76
Abbildung 57: Gemessene und simulierte Reflexionsdämpfung (K. 2).....	77

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Eigenschaften von PAN- und Pech-Fasern.....	16
Tabelle 2: Carbon Black – Eigenschaften.....	16
Tabelle 3: MWCNT - Eigenschaften	17
Tabelle 4: Fullerene C ₆₀ – Eigenschaften	17
Tabelle 5: Suspension zum Haftungsvergleich zwischen PVB und Addid 240	41
Tabelle 6: Übersicht über die Herstellung der Faser-Suspension.....	43
Tabelle 7: Versuchsübersicht über die Impedanzschichten mit PAN- und Pech-Fasern...	46
Tabelle 8: Versuchsübersicht über die Impedanzschichten mit CB	49
Tabelle 9: Übersicht über die gefertigten GFK-Probepplatten	54
Tabelle 10: Übersicht über die Hohlleitermessproben.....	57

Anhang

Tabelle 11: Messwerttabelle der gemittelten Probensätze aus der Schubprüfung.....	i
Tabelle 12: Tabelle der durchschnittlichen Werte der Distanzfunktion	i
Tabelle 13: Gemessene Schichtdicken der gefertigten GFK-Platten.....	ii

SYMBOLVERZEICHNIS

Symbol	Einheit	Bedeutung
γ	[]	Schubverformung
ε	$[\frac{As}{Vm}]$	Komplexe Permittivität des Mediums
ε'	$[\frac{As}{Vm}]$	Realteil der Permittivität des Mediums
ε''	$[\frac{As}{Vm}]$	Imaginärteil der Permittivität des Mediums
λ	[m]	Wellenlänge
μ	$[\frac{Vs}{Am}]$	Permeabilität des Mediums
μ'	$[\frac{Vs}{Am}]$	Realteil der Permeabilität
μ''	$[\frac{Vs}{Am}]$	Imaginärteil der Permeabilität
τ_{12}	[Pa]	Schubspannung in der Lagenebene
ω	[s ⁻¹]	Kreisfrequenz der Welle
a	[m]	Breite
b	[m]	Höhe
c	$[\frac{m}{s}]$	Lichtgeschwindigkeit
d	[m]	Schichtdicke
E	$[\frac{V}{m}]$	Elektrische Feldstärke
f	[s ⁻¹]	Frequenz
G_{12}	[Pa]	Schubmodul in Lagenebene
H	$[\frac{A}{m}]$	Magnetische Feldstärke
j	[]	Imaginäre Einheit
k	[m ⁻¹]	komplexe Wellenzahlen
n	[m]	Normale zur Grenzfläche
S	$[\frac{W}{m^2}]$	Leistungsdichte (Poynting Vektor)
S	[]	Streumatrix
T	[]	Transmissionsmatrix
Z	[Ω]	Elektrischer Widerstand
Z_w	[Ω]	Feldwellenwiderstand

Indizes

x/y/z	Koordinaten im kartesischen Koordinatensystem
i	Kennzeichnung der Schichten im Multilayersystem
0	Vakuum
0	Eingang
0	Zusammenfassung
r	Relative Stoffgröße bezogen auf den Freiraum
r	Reflektierte Welle
t	Transmittierte Welle
t	Total/Gesamt
c	Cut-off-Frequenz
12	Einträge bei Matrizen

Kennzeichnung

\underline{A}	Komplexe Größe
\overline{A}	Matrix
$ A $	Betrag
\vec{A}	Vektor
A^*	Komplex konjugiert
$\det(A)$	Determinante der Matrix A
$A _b$	A unter der Eigenschaft b

Konstanten

$\epsilon_0 = 8,855 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$	Permittivität im Vakuum
$\mu_0 = 1,2566 \cdot 10^{-6} \frac{Vs}{Am}$	Permeabilität im Vakuum
$c_0 = 2,998 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
$Z_0 = 376,7 \Omega$	Wellenimpedanz im Vakuum
$\pi = 3,14159$	Kreiszahl

1 EINLEITUNG

In der vorliegenden Arbeit werden kohlenstoffbasierte Materialien für die Anwendung in einem radarabsorbierenden Glasfaserkunststoff (GFK) untersucht. Die Forschung findet im Rahmen eines Verbundprojektes für Rotorblätter von Windkraftanlagen (WEA) statt. Das folgende Kapitel behandelt die Hintergründe der Arbeit, definiert die Aufgabenstellung und erläutert die angewandte Lösungsstruktur.

1.1 Hintergrund

Im Rahmen intensiver Bemühungen, eine klimaneutrale Gesellschaft zu etablieren, haben alternative Methoden der Energieerzeugung einen starken Wachstums- und Entwicklungsschub erfahren. Die Windkraftenergie gilt dabei als ein grundlegender Pfeiler dieser Entwicklung. Horizontalachsen-Rotoren bestimmen dabei den Wachstumsmarkt. Diese Bauform ermöglicht unter maximaler Nutzung des aerodynamischen Auftriebsprinzips den höchsten Wirkungsgrad [21]. Die Weiterentwicklung der Windkraftanlagen bringt immer höhere Anlagen (bis zu 200 m) mit größeren Rotorblattdurchmessern hervor [8][5]. Damit einher geht eine steigende Interaktion zwischen Windkraftanlagen und Radaranlagen, was zu einer Blockierung und Nichtrealisierung von Windkraftprojekten führen kann.

Der Bundesverband Wind Energie e. V. führte 2013 eine Mitgliederbefragung zum Thema „Konflikte zwischen WEA und Radaranlagen“ durch. Ziel der Umfrage war eine Abschätzung der durch die Belange der Flugsicherung verhinderten Nennleistung von Windenergieprojekten im Jahr 2013 in Deutschland. In Abbildung 1 werden die Ergebnisse der Umfrage dargestellt [6]. Insgesamt sind Windkraftprojekte mit einer geplanten Leistung von 3345 MW von der genannten Problematik betroffen. Der Vergleich mit der Netto-Neuinstallation von 3356 MW im Vergleichsjahr (On- und Offshore) verdeutlicht die Brisanz dieser ungewollten Wechselwirkung zwischen Windkraft und Radaranlagen. [4]

Windenergieanlagen besitzen eine große Radarsignatur. Diese wird neben den Rotorblättern auch von unbeweglichen Teilen wie der Gondel und dem Turm hervorgerufen. Die Rotorblätter einer Windkraftanlage besitzen in ihrem Reflexionsverhalten, anders als statische Bauteile, einen Doppleranteil, der die Effizienz geeigneter Filtermechanismen in Radaranlagen beeinträchtigen kann. [37]

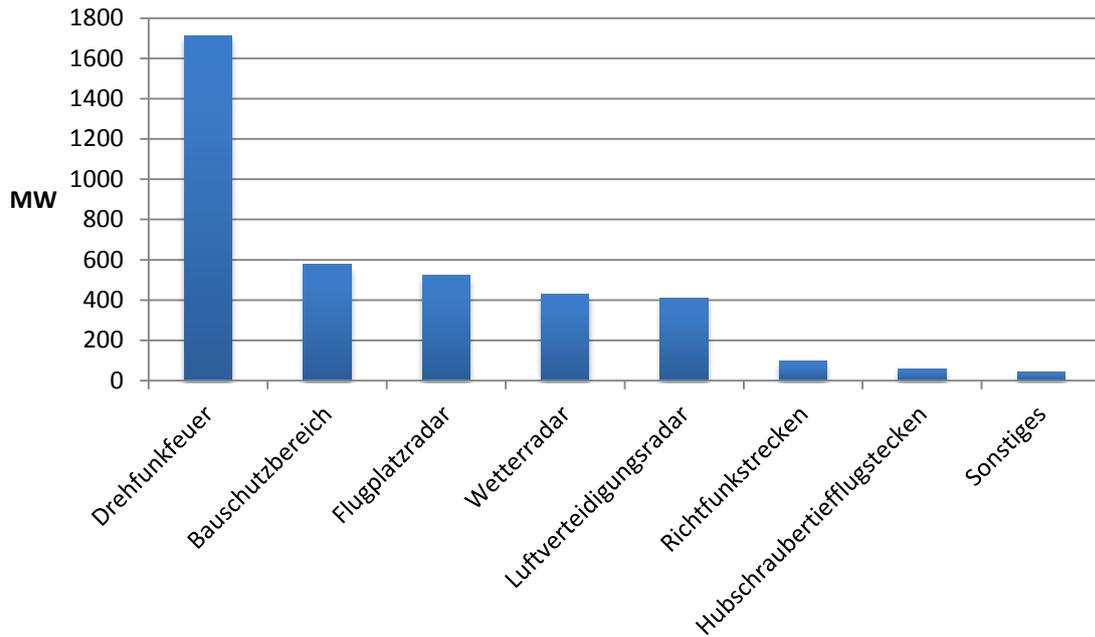


Abbildung 1: Darstellung der verhinderten Leistung bei WEA-Projekt im Jahr 2013

Vor diesem Hintergrund wurde innerhalb des Projektes *Smart Blades* ein Arbeitspaket mit dem Ziel der Radardämpfung von Rotorblättern einer WEA geschaffen. Zentrales Ziel des Projektes ist es, Rotorblätter mit Technologien auszustatten, die es ihnen ermöglichen, sich selbst auf die lokalen (Wind-)Gegebenheiten einzustellen. *Smart Blades* lässt sich in zwei Konzepte teilen – passive Methoden und aktive Methoden. Ersteres nutzt aerodynamische Laständerungen, um durch Biege-Torsions-Kopplungen eine optimierte Verdrillung des Rotorblattes zu realisieren. Letzteres nutzt Aktuatoren, um die Rotorblattkontur gezielt verändern zu können. Das Arbeitspaket, in dem die vorliegende Masterarbeit entstanden ist, ist dem Bereich der passiven Methoden zuzuordnen. Das 2012 gestartete Verbundprojekt wird gefördert vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit und wird neben dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) auch von dem Projektpartner am Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES), dem Zentrum für Windenergieforschung „For Wind“ der Universitäten Oldenburg, Hannover und Bremen durchgeführt. [22]

1.2 Aufgabenstellung und Struktur der Arbeit

In der vorliegenden Arbeit werden potenzielle radarabsorbierende Materialien (RAMs) und ihre Applikation in die GFK-Struktur eines Rotorblattes mit horizontaler Drehachse untersucht. Das Ziel der Arbeit ist es, die Radarreflexionen im Frequenzband von Air

Traffic Control (ATC-)Radaranlagen zu minimieren. Der Fokus liegt auf kohlenstoffbasierten Materialien. Die Hypothese, dass ein ausgewähltes Material geeignet ist für eine Integration in ein Rotorblatt, wird dabei innerhalb eines Anwendungsfalles anhand eines vorher definierten Absorbersystems überprüft. Das Absorbersystem baut sich aus verschiedenen Schichten (Layern) mit unterschiedlichem RAM-Füllgehalt auf. Die Arbeit beschränkt sich auf eine partielle Untersuchung der elektromagnetischen Eigenschaften anhand von ebenen GFK-Platten und einer rein vertikalen Inzidenzwelle. Die technischen und wirtschaftlichen Aspekte werden bei der Beurteilung möglicher Methoden und Materialien berücksichtigt. Ziel dabei ist es, ein wirtschaftlich effizientes Absorbersystem zu eruiieren, welches sich nur geringfügig auf andere Charakteristika des Rotorblattes und den Produktionsprozess auswirkt.

Der Lösungsweg setzt sich aus den folgenden Teilprozessen zusammen: Zunächst werden Grundlagen elektromagnetischer Wellen im Kontext dieser Arbeit betrachtet. Danach werden der Stand der Technik in der Rotorblattherstellung und der Reflexionsdämpfung sowie Materialien und ihre Möglichkeit der Applikation in einen Faserverbund analysiert. Aufbauend auf den Ergebnissen des Standes der Technik wird ein Vorentwurf für das Absorbersystem entwickelt. Neben dem direkten Aufbau des Absorbersystems gehört dazu auch die Festlegung auf bestimmte Materialsysteme und Verarbeitungsmethoden. Es wird ein mathematisches Modell vorgestellt und evaluiert, welches die Grundlage für die elektromagnetische Charakterisierung im Hohlleiter der experimentell hergestellten Absorberschichten sowie die Optimierung des Multilayerabsorbers bildet. Anhand zweier Multilayerabsorber werden die Materialien final getestet. Den Abschluss der Arbeit bildet eine kritische Zusammenfassung der Arbeitsergebnisse.

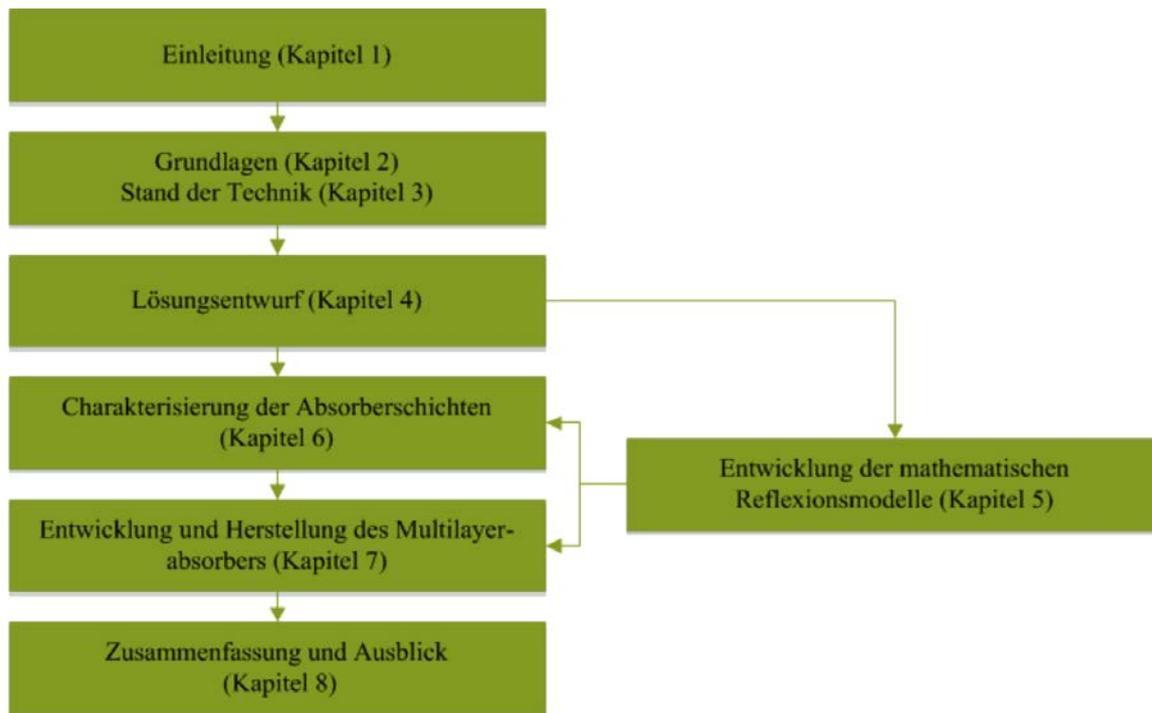


Abbildung 2: Struktur der Arbeit – Kapitelübersicht und ihre Zusammenhänge

2 GRUNDLAGEN

In diesem Kapitel werden die elektromagnetischen Grundlagen erläutert. Das beinhaltet die mathematische Beschreibung der elektromagnetischen (EM-)Welle sowie grundlegende Eigenschaften einer ATC-Radaranlage.

2.1 Elektromagnetische Wellen

Elektromagnetische Wellen sind alternierende Signale die vereinfacht durch eine Amplitude, eine Frequenz und eine dazugehörigen Wellenlänge beschrieben werden können. Freie und geführten Wellen, wie zum Beispiel in einem Hohlleiter, müssen differenziert betrachtet werden, da die Eigenschaften dieser Wellen in manchen Punkten voneinander abweichen. Für das allgemeine Verständnis werden erst die Eigenschaften ebener Wellen in verlustfreien Medien erläutert, bevor auf die Unterschiede zu geführten Wellen in einem rechteckigen Hohlleiter eingegangen wird. Die Betrachtung wird Frequenzbereich durchgeführt und ist aus der Literatur [18] entnommen.

Die freie Welle zeichnet sich durch ein elektrische Feld \vec{E} und ein magnetische Feld \vec{H} aus, dessen Felder orthogonal zueinander und zur Ausbreitungsrichtung der Welle stehen. Durch die Betrachtung im Frequenzbereich sind die Feldgrößen komplexe Größen. Die Ausbreitungsrichtung \vec{n} wird in dieser Arbeit in positive Z-Richtung des Koordinatensystems definiert.

$$\vec{n} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Die betrachteten Wellen sind linear polarisiert und ihr elektrisches Feld wird in dieser Arbeit per Konvention in positive y-Richtung definiert. Für ebene Wellen im Vakuum vereinfachen sich die Formeln für das \vec{E} und \vec{H} -Feld einer EM-Welle.

$$\vec{E} = E_0 e^{-jkz} \vec{e}_y \quad (2)$$

$$\vec{H} = \frac{E_0}{Z_W} e^{-jkz} \vec{e}_x \quad (3)$$

Die in (3) eingeführte Wellenimpedanz Z_W beschreibt das Verhältnis des \vec{E} -Feldes zum \vec{H} -Feld. Der Index W wird hier eingeführt, um sie später von der komplexen elektrischen

Impedanz Z unterscheiden zu können. Gleichzeitig ist sie eine wichtige Kennzahl bei der später berechneten Reflexion zwischen zwei Medien.

$$Z_w = \frac{\vec{E}}{\vec{H}} = \frac{\mu}{\varepsilon} \quad (4)$$

Die Wellenimpedanz wird durch die zwei Materialgrößen bestimmt, der Permittivität ε und der Permeabilität μ . Die Permittivität beschreibt die Durchlässigkeit des Mediums für das elektrische Feld \vec{E} der Welle, während die Permeabilität eine Kennzahl für die Durchlässigkeit der Materie für das magnetische Feld \vec{H} ist. Im Allgemeinen werden die Kennzahlen oft relativ zur Ausbreitung einer Welle im Vakuum angegeben.

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (5)$$

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (6)$$

Die beiden Materialgrößen sind über den Frequenzbereich nicht zwangsläufig konstant. Sie bestimmen auch die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle im Medium.

$$c_r = \frac{c_0}{\sqrt{\varepsilon_r \mu_r}} \stackrel{\mu_r=1}{\implies} \frac{c_0}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (7)$$

In (2) und (3) wird die Wellenzahl k eingeführt.

$$k = \omega \sqrt{\varepsilon \mu} \quad (8)$$

Die Wellenzahl kann unter anderem genutzt werden, um die Wellenlänge zu ermitteln.

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} \quad (9)$$

Der Energiefluss einer Welle wird durch den Poyntingvektor ausgedrückt und dient in der *Transmission Line*-Theorie als normierender Faktor.

$$\vec{S} = \frac{1}{2} (\vec{E} \times \vec{H}^*) \quad (10)$$

Der rechteckige Hohlleiter leitet Wellen nicht wie im freien Raum. Vielmehr besteht die Welle aus einer Überlagerung der an den Hohlleiterwänden reflektierten Teilwellen. In

einem rechteckigen Hohlleiter breiten sich Wellen in verschiedenen Moden aus. Grundsätzlich wird dabei zwischen der transversal elektrischen Mode (TE) und der transversal magnetischen Mode (TM) unterschieden. Neben der grundsätzlichen Charakterisierung in TE-/TM-Wellen werden die Moden nach der Erscheinungsform ihrer Felder weiter in $TE_{n,m}$ bzw. $TM_{n,m}$ untergliedert. In dieser Arbeit wird nur die TE_{10} -Welle bei einer konstanten Permeabilität ($\mu_r = 1$) betrachtet. In Abbildung 3 ist ein Wellenleiter mit einer TE_{10} -Welle abgebildet.

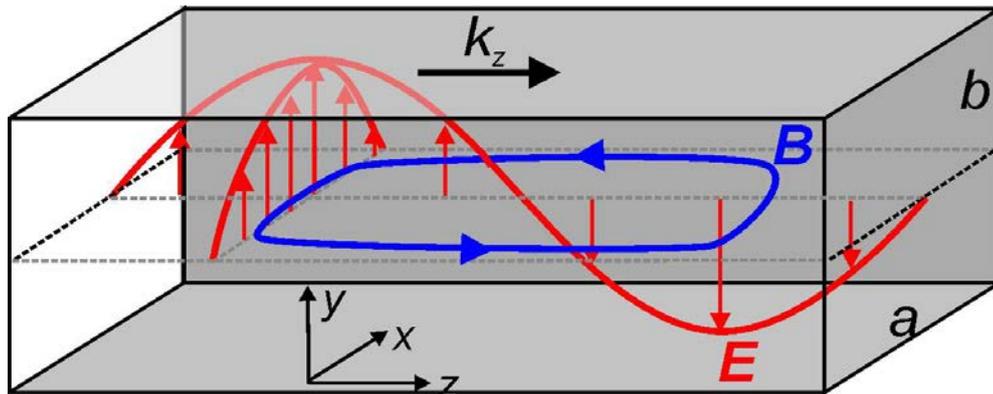


Abbildung 3: TE_{10} -Welle in einem rechteckigen Hohlleiter [45]

Das E-Feld einer TE_{10} -Welle ändert über die gesamte Breite a des Hohlleiters nicht sein Vorzeichen und steht parallel zur y -Achse. Die TE_{10} -Welle besitzt eine Cut-off-Frequenz f_c , unterhalb der sich die Welle nicht mehr ausbreiten kann. Sie wird maßgeblich von den Dimensionen des genutzten Hohlleiters und Mediums ihm ihm bestimmt.

$$f_c = \frac{c_r}{2a} \quad (11)$$

Die im Hohlleiter geführten TE_{10} -Wellen besitzen im Vergleich zu einer freien Welle eine größere Wellenlänge in Ausbreitungsrichtung.

$$\lambda_z = \frac{2\pi}{k_z} \quad (12)$$

Dabei unterscheidet sich die Formel 12 im Hohlleiter im Gegensatz zur Formel 9 der freien Wellenlänge durch die Variable k_z . Für die spätere Berechnung der Permittivität im Hohlleiter zu vereinfachen, wird die Wellenzahl in Ausbreitungsrichtung nach [1] dargestellt.

$$k_z = 2\pi f \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \sqrt{\epsilon_r - \frac{c_0}{2af}} \quad (13)$$

Für die spätere Berechnung wird die Wellenimpedanz der TE_{10} -Welle im Hohlleiter benötigt. Sie weicht von der Wellenimpedanz der freien Welle in Formel 4 ab.

$$Z_{W,TE} = \frac{2\pi f \mu_0}{k_z} \quad (14)$$

Zum Schluss soll noch angemerkt werden, dass in verlustbehafteten Medien die Materialkenngrößen durch einen Imaginärteil ergänzt werden.

$$\underline{\mu_r} = \mu'_r - \mu''_r j \quad (15)$$

$$\underline{\epsilon_r} = \epsilon'_r - \epsilon''_r j \quad (16)$$

2.2 ATC-Radaranlagen

Air Traffic Control-Radaranlagen werden für die Überwachung des Luftraumes eingesetzt. Es wird zwischen Primär und Sekundärradar unterschieden. Primärradar sendet einen Impuls elektromagnetischer Energie aus, der von Objekten reflektiert wird. Zwischen den Sendeimpulsen empfängt die Radaranlage das reflektierte Signal. Die Ausrichtung der Antenne gibt dabei die Richtung des Objektes an, während die Zeit zwischen Sendeimpuls und Impulsempfang die Entfernung detektiert. Das Sekundärradar besteht aus einer zweiten Antennenvorrichtung. Diese sendet einen Identifikationsbefehl an den Transponder eines Flugzeuges. Abhängig von dem erhaltenen Befehl schickt der Transponder eine Antwort, zum Beispiel über die Flughöhe oder die ID des Flugzeuges. Sekundärradare ermöglichen der Flugüberwachung ein verbessertes *Tracking* der Objekte. Jedoch besitzen nicht alle Flugobjekte einen Transponder, weshalb die beiden als redundante Systeme notwendig sind. [36] [29]

Derzeit besteht die ATC-Überwachung weitgehend auf einem ASR-9-Netzwerk. Die ASR-9-Primärradare arbeiten in einem Frequenzbereich von ca. 2,7 bis 3,4 GHz (Kapitel 4.1) und können zwischen linearer und zirkulärer Polarisation wechseln. Das System der Radaranlagen basiert auf einem gepulsten Signal. [29] [48]

Die Anlagen besitzen einen Filter (*Moving Target Detection*) zur Identifikation von statischen Objekten, welcher anhand des Doppleranteils des zurücklaufenden Signals eine Differenzierung ermöglicht. Je nach Konfiguration der Radaranlagen können sich die Algorithmen zum Filtern der Signale unterscheiden. Moderne Anlagen wie das ASR-S mit WEA-Modkit haben speziell auf Windkraftanlagen abgestimmte Filter. Diese befinden sich aber weitgehend noch in der Testphase. [36] [12]

Die durch Windkraftanlagen hervorgerufenen Interferenzen verursachen die folgenden Probleme:

- Die durch die Rotorbewegung induzierte Dopplerverschiebung in der Reflexion kann andere bewegte Objekte maskieren oder als Wetterechos missverstanden werden [8].
- Mit einer Höhe von bis zu 200 m können Windkraftanlagen Radarschatten hervorrufen, die besonders bei der Erfassung von *Low-Level* Flugbewegungen hinderlich sind [16].
- Windkraftanlagen können die berechneten Flugbewegungen (*Tracks*) verfälschen [35].

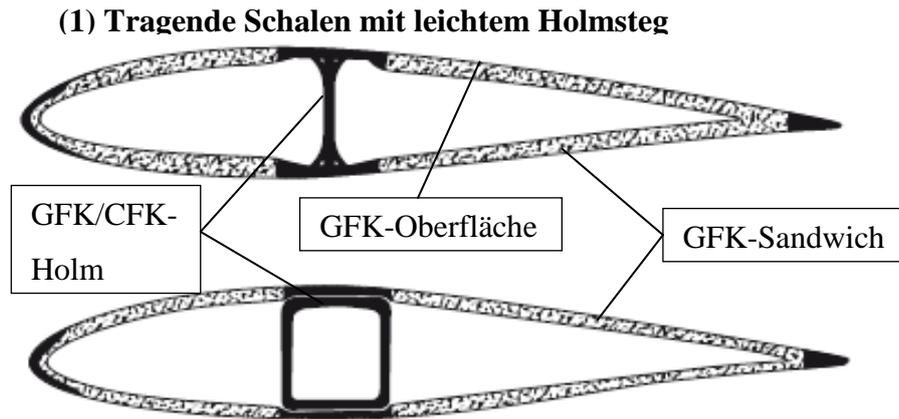
3 STAND DER TECHNIK

In diesem Kapitel wird der Stand der Technik in den relevanten Themengebieten dieser Arbeit analysiert. Der technologische Herstellungsprozess moderner Rotorblätter bildet den Ausgangspunkt der Betrachtung. Danach werden Methoden zur Reflexionsdämpfung als mögliche Ansätze für das Absorberdesign aufgezeigt. Die letzten zwei Unterkapitel behandeln kohlenstoffbasierte Materialien und ihre Applikation in einen GFK-Verbund.

3.1 Faserverbundwerkstoffe im Rotorblatt

Moderne Rotorblätter bestehen weitgehend aus Faserverbundwerkstoffen. Technologisch gesehen sind Faserverbundmaterialien ein Verbund aus einem Kunstharz, der Matrix und einem Fasermaterial. Aus Kostengründen werden heute immer noch weitgehend Glasfasermaterialien für den Bau von Rotorblättern verwendet. Die Festigkeitseigenschaften von Glasfasern sind für den Anwendungsfall großer Rotorblätter immer noch ausreichend. Weniger gut ist der spezifische Elastizitätsmodul. Das ist der Grund, warum in Kombination zur Glasfaser immer öfter, trotz ihres relativ hohen Preises, Kohlenstofffasern für mechanisch stark beanspruchte Bereiche des Rotorblattes eingesetzt werden. Die Rotorblatthersteller setzen mittlerweile fast ausschließlich auf Epoxidharzsysteme. Der Vorteil dieser Systeme besteht in ihren Festigkeitseigenschaften sowohl im Fließverhalten bei hohen Punktlasten als auch bei der Dauerfestigkeit. Darüber hinaus besitzen sie ein geringes Schrumpfverhalten. Zum Schutz der Oberflächen haben sich kunstharzbasierte *Gelcoats* durchgesetzt. [21]

Die konstruktive Auslegung der gängigen Rotorblätter nimmt sich Flügel aus dem klassischen Flugzeugbau zum Vorbild. Sie ist auf zwei statische Muster zurückzuführen: Das in Abbildung 4 (1) dargestellte statische Konzept beruht auf einer tragfähig dimensionierten äußeren Schale und einem oder mehreren Holmstegen, die Querkräfte aufnehmen können und somit die Schale stabilisieren. Das zweite dargestellte Konzept (2) basiert auf einem durchgehenden kastenförmigen Holm, der weitgehend alle Lasten aufnimmt. Die profilbildenden Schalen leiten die Windlasten nur noch in den Holm. Das erste Konzept hat den Vorteil, dass die Zug- und Druckspannungen in weiterem Abstand von der neutralen Faser in die Struktur eingebracht werden und somit gewichtsoptimierte Entwürfe möglich sind. Rotorhersteller greifen auch oft auf eine Hybridform beider Konzepte zurück. [21]



(2) Tragender Kastenholm mit leichten Schalen

Abbildung 4: Statische Muster von Rotorblattkonstruktionen [21]

Das heute weitgehend eingesetzte Fertigungsverfahren für Außenschalen eines Rotorblattes ist das Vakuum-Infusionsverfahren, welches auch in Kapitel 6.3 zur Fertigung der GFK-Platten eingesetzt wird. Dabei werden die Faserhalbzeuge in einer Negativform drapiert, bevor die Form durch eine Kunststofffolie versiegelt wird. Das Harz wird durch einen linienförmigen oder ringförmigen Anguss in den Aufbau geleitet und mittig oder auf der gegenüberliegenden Seite mithilfe einer Vakuumpumpe angesaugt. In der Regel werden die Außenschalen in zwei getrennten Arbeitsgängen hergestellt und in einem weiteren Schritt miteinander und dem Kastenholm bzw. mit den Holmstegen verklebt. [21]

3.2 Methoden der Reflexionsdämpfung

Um einen Überblick über die derzeit vorhandenen Technologien zur Reflexionsdämpfung zu geben, werden diese im weiteren Verlauf dargestellt. Manche Techniken sind offensichtlich nicht für den Einbau in ein Rotorblatt geeignet und werden deshalb nur oberflächlich erwähnt. Es gibt vier grundlegende Techniken der Reflexionsdämpfung:

- *Shaping*
- *Radar Absorbing Materials*
- *Passiv Cancellation*
- *Active Cancellation*

Shaping basiert auf der Umgestaltung der Oberflächen und Kanten eines Objektes. Das Ziel ist es, die eingehende Radarstrahlung in einem definierten Winkel zu reflektieren, so

dass die zum Empfänger reflektierte Strahlung minimiert wird. Der Erfolg dieser Methode beruht auf der Annahme, dass Abstrahlungswinkel existieren, die eine geringe Radarerfassung zu Folge haben. Aufgrund der vorgegebenen aerodynamischen Kontur eines Rotorblattes, der sehr individuellen Inzidenzstrahlung und unbekanntem gewünschten Abstrahlungsrichtung wird Shaping im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter behandelt. [24]

Radar Absorbing Materials (RAM) reduzieren die Reflexion, indem sie die eingehende Energie absorbieren. Der Absorptionsprozess wandelt die Energie der elektromagnetischen Welle in Wärme um (Dissipation). Innerhalb der RAM-Kategorie wird zwischen zwei Gruppen an Materialien differenziert, sie basieren auf den in Kapitel 2.1 vorgestellten Beeinflussungen der Welle durch die elektromagnetischen Materialparameter. Es wird zwischen dielektrischen Verlusten, infolge eines induzierten elektrischen Flusses und des damit verbundenen Widerstandes und einem magnetischen Verlust aufgrund des magnetischen Dipolmomentes unterschieden. Üblicherweise werden die verlustbehafteten RAMs in eine Matrix oder Binderstruktur eingebettet [24]. Mit steigendem Verlustmechanismus eines Materials sinkt oft seine Wellenimpedanz. Der Sprung der Impedanz hat zur Folge, dass eintreffende Radarstrahlung nicht in das Material eindringen kann, um dort absorbiert zu werden.

Eine geometrische Anpassung der Materialoberfläche, wie sie beispielsweise bei pyramidalen Absorbersystemen in *Anechoic Chamber* eingesetzt werden, minimiert die Reflexion an der Oberfläche und leitet die EM-Strahlung in den Absorber. In Abbildung 5 ist eine mögliche Ausprägung dargestellt. Die Nachteile dieser Absorbersysteme sind ihre formabhängige Mindestfrequenz, die damit verbundene Absorberdicke und ihre fehlende Widerstandsfähigkeit gegen mechanische Belastungen. Die Art des Absorberaufbaus verspricht jedoch eine maximale Reflexionsdämpfung. [38]

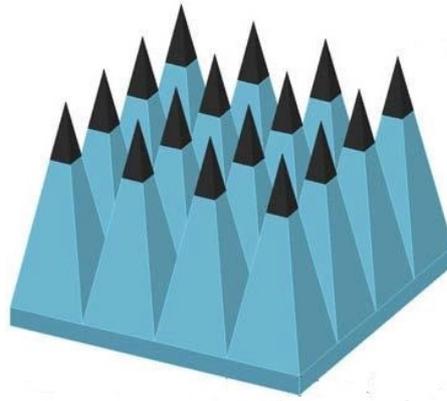


Abbildung 5: Pyramidales Absorbersystem [15]

Um den beschriebenen sprunghaften Anstieg der Impedanz zu minimieren, ist es außerdem möglich, durch materielle Modifikation eine kontrollierte Anpassung der Impedanz vorzunehmen. Ausgehend vom Inzidenzwinkel kann die Impedanz durch eine kontinuierliche oder gestufte Absenkung angepasst werden. Der Vorteil dieser Methode im Vergleich zu pyramidalen Absorbern ist ihre geringere Dicke. Der Nachteil ist ein geringerer Wirkungsgrad, weshalb der Gradient auf eine bestimmte Frequenz angepasst werden sollte. [38]

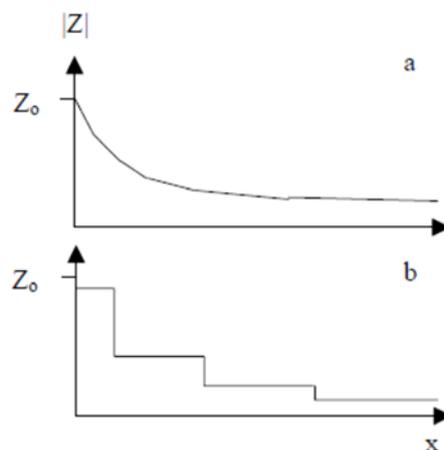


Abbildung 6: Gradiertes *Loading* [38]

Die letzte Variante, um ein reflexionsfreies Eindringen der elektromagnetischen Welle zu gewährleisten, ist ein *Matching Layer* (Abbildung 7). Die Methode kann auch zur Reflexionsdämpfung eingesetzt werden und ist eigentlich eine Form der *Passive Cancellation*. Durch eine Übergangsschicht mit der Schichtdicke von $\lambda/4$ und eine bestimmte Impedanz wird die Welle reflexionsfrei vom ersten Medium in das dritte Medium weitergeleitet. [38].

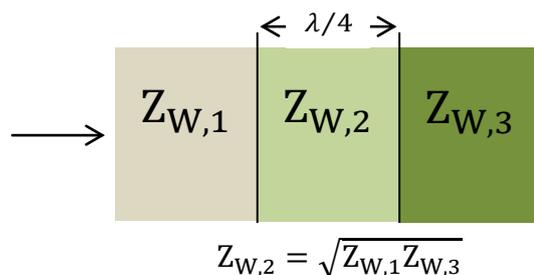


Abbildung 7: Matching Layer

Passive Cancellation ist auch bekannt als *Impedance Loading* [38]. Bei diesen Methoden wird eine reflektierte Welle erzeugt, die in Amplitude und Phase eine destruktive Interferenz zur Eingangswelle erzeugt.

Die Struktur eines solchen Absorbersystems kann aus einer Schicht mit einem definierten Widerstand (Impedanz) bestehen, welche in einem Abstand von $\lambda/4$ zu einer gut leitenden Oberfläche angebracht wird. In dieser Form nennt sich der Aufbau Salisbury Screen. Eine weitere Möglichkeit einer Passive Cancellation ist der Dallenbach-Layer. Dabei wird eine Schicht mit definierter Impedanz und einer Dicke von $\lambda/4$ direkt auf die leitende Schicht aufgesetzt. Die beiden in Abbildung 8 dargestellten Systeme sind von der zu absorbierenden Frequenz abhängig und somit auf eine Wellenlänge optimiert. Durch ein Aneinanderreihen mehrerer Impedanzschichten eines Salisbury Screens oder mehrerer Dallenbach-Layer kann die Breitbandfähigkeit solcher Absorbersysteme auf Kosten der maximalen Reflexionsdämpfung erhöht werden. Ein weiterer Nachteil dieser Methode ist die starke Abhängigkeit ihrer Effektivität vom Inzidenzwinkel [38].

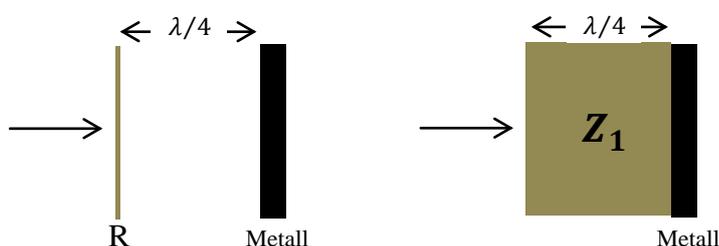


Abbildung 8: Salisbury Screen (links) und Dallenbach-Layer (rechts)

Die letzte zu erwähnende Methode zur Reflexionsdämpfung ist die *Active Cancellation*. Bei diesem sehr ambitionierten Ansatz wird aktiv Radarstrahlung in exakt derselben Charakteristik, aber entgegengesetzter Phase ausgesendet, um eine destruktive Interferenz zu erzeugen. Dafür muss die eingehende Welle hinsichtlich ihres Winkels, ihrer Frequenz, Intensität und Wellenform erfasst und analysiert werden. Der relative Vorteil dieser Technologie liegt im niedrigen Frequenzbereich, in dem andere Absorbenttypen nur schwer zu applizieren sind. Ein Nachteil der Technik ist, dass bei einer schlecht funktionierenden destruktiven Interferenz das aktive Senden einem Funkfeuer gleicht. [24]

3.3 Kohlenstoffbasierte Materialien

Die Aufgabenstellung definiert kohlenstoffbasierte Materialien als Basismaterial für das Absorbersystem. Die bekanntesten Erscheinungsformen von Kohlenstoff sind der Diamant und das Graphit. Diamant besteht aus einer kristallinen Struktur mit einer sehr geringen Konduktivität, weshalb Diamant in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet wird. Graphit besteht aus einer 3D-Struktur, die aus 2D-Graphenschichten aufgebaut ist. Graphit ist ein guter Leiter. Die elektrischen Eigenschaften sind jedoch anisotrop. Graphit leitet sehr gut innerhalb einer Graphenschicht und nur bedingt in orthogonaler Richtung zu den Graphenschichten. [32]

Nachfolgend werden die für die Integration in einen Faserverbund gängigsten industriellen Produkte von Kohlenstoff aufgeführt, um sie in Kapitel 4.2 hinsichtlich ihres Potenzials für das Absorbersystem bewerten zu können.

Die Kohlenstofffaser ist im Zusammenhang mit Faserverbundwerkstoffen wahrscheinlich die bekannteste Erscheinungsform. Im Wesentlichen gibt es zwei Kategorien an Kohlenstofffasern – Pech-Fasern und Polyacrylnitril-(PAN-)Fasern. Sie unterscheiden sich technisch gesehen in ihren unterschiedlichen Precursoren, dem Polyacrylnitril und Mesophasen-Pech. In einem mehrstufigen Prozess (Stabilisierung, Spinnen, Carbonisierung, Oxidation) werden die Precursoren zu Fasern weiterverarbeitet. Oft werden die Oberflächen der Fasern weiter präpariert (Ätzen/ *Sizing*), um zum Beispiel die Benetzung und Haftung zwischen Faser und Matrix zu verbessern. Die Hersteller bieten die Fasern in verschiedenen Faserlängen an. Bei geschnittenen Kohlenstofffasern werden die Rovings auf eine Länge von mehreren Millimetern geschnitten, folgend werden die

geschnittenen PAN-Fasern auch PANFc und die Pech-Fasern PiFc genannt. Zudem bieten die Hersteller gemahlene Fasertypen mit einer Faserlänge im Bereich von mehreren hundert Mikrometer an, diese werden folgend mit PANFm und PiFm abgekürzt. Die Tabelle 1 gibt die relevanten Eigenschaften wieder. Die PAN-Faser zeichnet sich außerdem durch ein, im Vergleich zur Pech-Faser geringeres E-Modul und eine höhere Zugfestigkeit aus. [49] [32]

Tabelle 1: Eigenschaften von PAN- und Pech-Fasern [30, 42, 43]

	PANFc	PiFc	PANFm	PiFm
Ø-Filament [μm]	≈ 7	≈ 11	≈ 7	≈ 11
Faserlänge [mm]	≈ 3	≈ 6	$\approx 0,160$	$\approx 0,200$
Dichte [g/cm^3]	$\approx 1,8$	$\approx 2,2$	$\approx 1,8$	$\approx 2,2$
Resistivität [Ωcm]	$\approx 0,0015$	$\approx 0,0001-0,0007$	$\approx 0,0022$	$\approx 0,0001-0,0007$
Preis [€/kg]	$\approx 35-50$	≈ 60	$\approx 27-81$	≈ 70

Carbon Black (CB) sind leitende Industrieruße, die auf einer Graphitstruktur beruhen. Sie bestehen aus mehr als 96 % feinteiligem Kohlenstoff und enthalten geringe Mengen an Sauerstoff, Wasserstoff, Stickstoff und Schwefel. Die Herstellungsverfahren basieren auf einer kontrollierten Zersetzung von flüssigen oder gasförmigen Kohlenwasserstoffen. Die Primärpartikel kommen dabei nicht in isolierter Form vor, sondern lagern sich in Aggregaten unterschiedlicher Form und Größe ab. [40]

Tabelle 2: *Carbon Black* – Eigenschaften [27]

	<i>Carbon Black</i> ¹
Ø-Filament [μm]	< 1
Dichte [g/cm^3]	$\approx 1,8$
Resistivität [Ωcm]	\approx nicht angegeben
Preis [€/kg]	≈ 30

Single Walled Carbon Nanotubes (SCNT) und *Multi Walled Carbon Nanotubes (MWCNT)* werden als Additive in der Faserverbundfertigung eingesetzt. Diese stäbchenförmigen Modifikationen von Kohlenstoff bestehen aus einer oder mehreren

¹ Orion Engineering Carbons: XPB 552

aufgerollten Graphitebenen. Ihre Durchmesser betragen dabei nur wenige Nanometer bei SCNTs und bis zu 100 Nanometer bei MWCNTs. Sie zeichnen sich durch eine extrem hohe Zugfestigkeit aus (MWCNT: ca. 65 GPa). Die elektrischen Eigenschaften sind dabei stark von der Qualität des Herstellungsverfahrens abhängig. [33]

Tabelle 3: MWCNT - Eigenschaften [44]

	MWCNT²
Partikelgröße Ø x Länge [µm]	≈ 0.010x3
Dichte @25°C[g/ml]	≈ 2,1
Resistivität [Ωcm]	≈ nicht angegeben
Preis [€/g]	≈ 6

Fullerene als weitere Modifikation von Kohlenstoff ist ein kugelförmiges Molekül aus Kohlenstoffatomen. Eines der einfachsten Fullerene ist das C₆₀-Fulleren. Es besitzt in seiner molekularen Struktur 20 Sechsring- und 12 Fünfring-Molekülketten, bei einer Größe von nur 0,7 Nanometern. Fullerene besitzen aufgrund ihrer Hohlwandstruktur eine sehr geringe Dichte. [34]

Tabelle 4: Fullerene C₆₀ – Eigenschaften [23]

	Fullerene C₆₀
Ø -Partikelgröße [µm]	< 0,7
Dichte [g/cm³]	≈ 1,6
Resistivität [Ωcm]	≈ nicht angegeben
Preis [€/g]	≈ 25

3.4 Applikation von RAM in Faserverbunden

Eine Applikation der kohlenstoffbasierten Materialien in einen Faserverbund kann durch zwei Methoden realisiert werden.

Die erste Methode basiert auf der Modifikation der Fasermaterialien. Dabei werden die textilen Faserhalbzeuge durch Einweben oder Beschichten mit einem RAM modifiziert. Das auf das Fasermaterial applizierte RAM wird anschließend als Preform abgelegt und

² Sigmar Aldrich: Carbon Nanotubes, multiwalled 773840

konventionell weiterverarbeitet. Faserhalbzeuge dieser Art sind aufgrund ihrer Einsatzmöglichkeiten im militärischen Bereich nur schwer erhältlich [14].

Die zweite Methode basiert auf der Modifikation der Matrix. Dabei wird das RAM direkt in die Matrix gemischt. Erfahrungen des DLR mit modifizierten Matrixsystemen zeigten eine starke Erhöhung der Viskosität des Harzsystems bei der Verwendung von mikroskaligen Partikeln. Die Applikation von nanoskaligen Partikeln hingegen führt im Ergebnis zu niedriger viskosen Harzsystemen. Weitere Versuche des DLR zeigten, dass ausschließlich sphärische Nanopartikel nicht von der Preform ausgefiltert werden. Andere Partikelformen bleiben schon am Rand der Preform hängen und werden nicht homogen im Faserverbund verteilt. [9, 17, 26]

4 LÖSUNGSENTWURF

Der in Kapitel 3 erläuterte Stand der Technik zeigt, dass eine Vielzahl an möglichen Lösungsvarianten für die Aufgabenstellung existiert. Dieses Kapitel grenzt unter Berücksichtigung der identifizierten Anforderungen den Lösungsraum auf ein Absorbersystem und die damit verbundenen Verarbeitungsmethoden ein.

4.1 Anforderungen und Randbedingungen des Absorbersystems

Das Absorbersystem soll den Anforderungen und Randbedingungen der Rotorblatthersteller entsprechen, damit eine spätere Anwendung in der Industrie denkbar wird. Detaillierte Aussagen können aufgrund der generischen Betrachtung nicht getroffen werden. Die Anforderungen sind dabei technischer und wirtschaftlicher Natur.

Frequenzbereich der Reflexionsdämpfung

Die Aufgabenstellung sieht eine Reflexionsdämpfung für ATC-Radaranlagen vor. Das Electronic Communication Committee legt in einem jährlichen Bericht die nutzbaren Frequenzbereiche für die verschiedenen Anwendungen fest. In dem Bericht aus dem Jahr 2014 wird der nutzbare Frequenzbereich für ATC-Radaranlagen in Europa von 2,7 bis 3,4 GHz festgelegt. Für den US-amerikanischen Raum liegt der Frequenzbereich bei 2,7 bis 2,9 GHz. [47][13]

Inzidenzwinkel der EM-Stahlung

Die zu erwartende Eingangsstrahlung kann auf keinen bestimmten Inzidenzwinkel eingegrenzt werden. Beeinflussende Faktoren sind dabei der Azimutwinkel der Windkraftanlage, der Pitch- und Tiltwinkel der Rotorblätter und die Verformung aufgrund aerodynamischer Lasten. Um den Inzidenzwinkel einschränken zu können, ist eine standort- und anlagenspezifische Begutachtung notwendig. [37]

In der Arbeit wird aufgrund des unbestimmten Inzidenzwinkels eine orthogonale Inzidenzstrahlung angenommen.

Integrationsort und reflektierende Bauteile im Rotorblatt

Der verfügbare Integrationsraum für das Absorbersystem ist durch die Struktur des Rotorblattes beschränkt. Bei der Abschätzung des Integrationsortes sowie seines Bauraumes ist es notwendig, die reflektierenden Strukturen im Rotorblatt zu identifizieren. Die reflektierenden Strukturen eines Rotorblattes sind aufgrund der

generischen Betrachtung nicht eindeutig bestimmbar. Reflektierende Baugruppen bestehen im Allgemeinen aus leitenden Materialien, die im Rotorblatt verbaut wurden. Hierzu zählen Carbonbauteile, wie sie in den Holmen bzw. Holmstegen eines Rotorblattes verbaut sein können, sowie der Blitzableiter oder Enteisungsvorrichtungen [35] [3]. Der Bauraum für ein Absorbersystem ist grundsätzlich stark von der Bauart des Rotorblattes abhängig und variiert auch über die Radialkomponente des Blattes. [37]

In der Arbeit wird deshalb die Einschränkung getroffen, das Absorbersystem komplett in die äußere GFK-Struktur des Rotorblattes zu integrieren. Es wird angenommen, dass die GFK-Schicht für eine mögliche Integration ca. 5 mm besitzt. Außerdem wird angenommen, dass direkt nach der GFK-Schicht ein elektrisch gut leitender Reflektor platziert ist.

Mechanische GKF-Performance

Das Rotorblattdesign und damit auch der Aufbau des GFK-Verbundes muss hohen mechanischen Anforderungen genügen. Die integrierten Materialien sowie die Art der Integration sollen einen minimalen Einfluss auf die mechanischen Belastungsgrenzen ausüben.

Gewicht des Absorbersystems

Rotorblätter sind rotierende Bauteile mit hohen Zentrifugalkräften, die vielen Lastspielen mit hohen Wechsellastspannungen ausgesetzt werden. Die auf das Rotorblatt einwirkenden Kräfte sollen durch das Eigengewicht eines Absorbersystems nur geringfügig erhöht werden.

Technische Integration in den Herstellungsprozess

Das Absorbersystem muss während des in Kapitel 3.1 skizzierten Herstellungsverfahrens mit in das Rotorblatt integriert werden. Dabei soll der Mehraufwand während des Herstellungsprozesses sowie für die Umrüstung bestehender Fertigungsanlagen minimal sein.

Kosteneffizienz des Absorbersystems

Allgemein soll der Kostenmehraufwand bei der Integration eines Absorbersystems in ein Rotorblatt minimal sein. Dazu gehört, dass die verwendeten Materialien, ihre Weiterverarbeitung zu Vorprodukten des Absorbersystems und die spätere Integration in die Fertigung möglichst kostengünstig sind.

4.2 Auswahl eines Vorentwurfs

In diesem Kapitel wird unter Berücksichtigung der Anforderungen und Randbedingungen aus Kapitel 4.1 ein Lösungsentwurf mit potenziellen Materialien und einer Verarbeitungsmethode für die Füllstoffe festgelegt.

4.2.1 Der Absorberentwurf

Keine der oben genannten Methoden der Reflexionsdämpfung kann direkt auf das vorliegende GFK und seine Randbedingungen übertragen werden. Die begrenzte Dicke des Absorbersystems (5 mm) in Kombination mit der zu dämpfenden Wellenlänge ($\lambda \approx 100$ mm) verhindert den Einsatz der klassischen $\lambda/4$ -Methoden. Die Methode des gradierten *Loadings* ist in einem Faserverbundwerkstoff technisch nur bedingt umsetzbar. Hierbei ist speziell die räumlich homogene Verteilung der Füllstoffe in dem inhomogenen Faser-Matrix-Verbund eine Herausforderung. Die nutzbare Dicke von 5 mm ist auch hier nicht ausreichend für eine komplette Absorption der EM-Strahlung.

Bei dem Entwurf des Absorbersystems muss auch die Applikationsart der RAMs berücksichtigt werden. Die Modifikation der Matrix als eine Möglichkeit, ein RAM in den GFK-Verbund zu integrieren, ist beschränkt auf kleine Füllstoffe, da nur solche während der Infusion die Preform durchdringen können. Zudem ist der Aufbau eines Gradienten technisch kaum umsetzbar. Bei der Verwendung sehr kleiner Füllstoffen ist jedoch eine relativ homogene Verteilung im GFK möglich. Die Beschichtung der Fasermaterialien bietet den Vorteil, verschiedene Schichten im GFK mit unterschiedlichen Füllgehalten zu modifizieren und dadurch relativ einfach Schichten unterschiedlicher Impedanz in das GFK zu integrieren.

Der Absorberentwurf sieht deshalb ein Mehrschichtensystem (Multilayersystem) aus verschiedenen modifizierten Schichten vor. Diese Impedanzschichten werden mittels kohlenstoffbasierter Füllstoffe hinsichtlich ihres elektrischen Widerstandes verändert. Während des Drapierens der Preform werden die Impedanzschichten zwischen das Glasfaserhalbzeug gelegt. Dieses Vorgehen ermöglicht eine Absorberstruktur, wie sie beispielhaft in Abbildung 9 dargestellt ist.

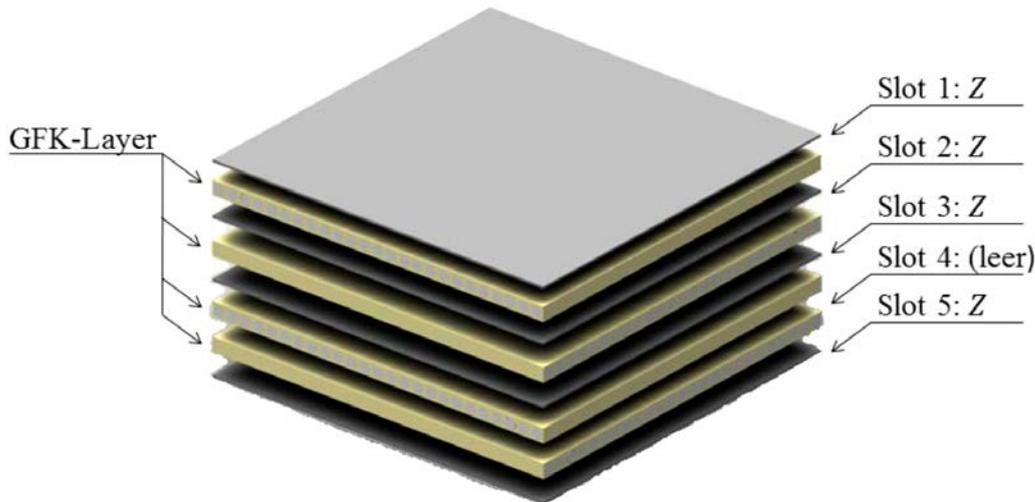


Abbildung 9: Beispielhafte Explosionsansicht des Absorbersystems – In den Slots zwischen den GFK-Schichten sind dünne Impedanzschichten mit definiertem Widerstand integriert.

Der Absorberentwurf hat folgende Vorteile:

- Eine flexible Anpassung des Absorbersystems an unterschiedliche Rotorblatt-Randbedingungen ist möglich, da der Aufbau des Absorbersystems über das Rotorblatt variiert werden kann.
- Die Reihenfolge der Impedanzschichten kann für optimales Reflexionsverhalten einfach variiert werden.
- Während des Herstellungsverfahrens können die Impedanzschichten ohne große Veränderung des Arbeitsablaufes zwischen das Faserhalbzeug gelegt werden.
- Im Vergleich zu der Integration eines RAM in das Matrixsystem besteht bei dieser Variante theoretisch keine Einschränkung bei der Auswahl der Füllstoffe.
- Der erwartete Einfluss auf die mechanischen Kennwerte des GFK ist gering, da die Schichten des Faserhalbzeuges nicht von der Modifikation betroffen sind.

4.2.2 Selektion der untersuchten RAM

Bei der Entwicklung des Vorentwurfes wird keines der in Kapitel 3.3 genannten Materialien ausgeschlossen. Die Auswahl der Materialien erfolgt ausschließlich nach ihren absoluten Materialkosten. Aufgrund fehlender Informationen zur Wirksamkeit eines Materials im entsprechenden Frequenzbereich und damit der benötigten Menge an Material, ist es nicht möglich, eine relative Betrachtung der Materialkosten durchzuführen.

Durch den Vergleich der Materialkosten werden die nanoskaligen Füllstoffe ausgeschlossen und nur die folgenden fünf Materialien für die weiteren Versuche selektiert:

1. *Carbon Black* (CB)
2. Geschnittene PAN-Fasern (PANFc)
3. Geschnittene Pech-Fasern (PiFc)
4. Gemahlene PAN-Fasern (PANFm)
5. Gemahlene Pech-Fasern (PiFm)

4.2.3 Verfahren zur Herstellung der Impedanzschichten

Die ausgewählten Materialien werden zu Impedanzschichten weiterverarbeitet, wobei deren unterschiedliche Eigenschaften berücksichtigt werden müssen. Zudem sollen die ausgewählten Herstellungsmethoden weitgehend im hauseigenen Labor durchführbar sein. Ziel ist die Integration einer möglichst reproduzierbaren und definierbaren Füllstoffmenge in die Impedanzschicht.

Industriell hergestellte Kurzfaserverbunde werden oft mit einer Nassvliestechnik zu Faservliesen verarbeitet. Angelehnt an diesen Prozess wird im Labor ein experimentelles Papierschöpfverfahren (Kapitel 6.2.1) durchgeführt. Dabei werden die in einer Suspension gelösten geschnittenen und gemahlene Fasern bei dem Durchströmen eines Trägermaterials vollständig von diesem herausgefiltert. Zur Fixierung der verschiedenen Fasern muss ein klebendes Additiv in der Fasersuspension gelöst sein. Die definierte Modifikation der Impedanz basiert auf unterschiedlichen Flächengewichten des aufgetragenen Füllstoffes und damit auf der in der Suspension gelösten Materialmenge.

Bei der Verarbeitung des *Carbon Black* kann diese Methode nicht angewendet werden, da die CB-Partikel nicht vollständig durch das Trägermaterial herausgefiltert werden können und somit keine Möglichkeit besteht, eine definierte Materialmenge in die Impedanzschicht zu integrieren. Die Verarbeitung des *Carbon Black* beruht auf einer Tauchbeschichtung. Dabei werden die CB-Partikel in einer Suspension stabilisiert, das Trägermaterial wird manuell durch die Suspension geführt und wieder herausgezogen. Die definierte Steuerung der Impedanzmodifikation wird durch eine unterschiedliche Füllstoffkonzentration der CB-Partikel in der Suspension realisiert. [19]

5 ENTWICKLUNG DER MATHEMATISCHEN REFLEXIONSMODELLE

Das mathematische Reflexionsmodell soll flexibel auf verschiedene Aufgaben angepasst werden können. Die Materialcharakterisierung findet in einem Hohlleiterversuch statt, weshalb das Modell die Simulation von TE₁₀-Wellen ermöglichen muss. Außerdem werden unterschiedliche Proben in dem Modell vermessen, die unterschiedliche elektromagnetisch wirksame Schichtaufbauten besitzen. Weiterführend wird damit ein Multilayerabsorber im Hohlleiter und für den Fall einer ebenen Welle simuliert.

Um die Komplexität des Modells und der Simulation zu reduzieren, wurde eine Reihe von Annahmen getroffen:

- **1D- Betrachtung der Problemstellung:** Bei der Charakterisierung der Materialien und des Multilayerabsorbers wird auf einen Hohlleiterversuch zurückgegriffen, in dem ausschließlich orthogonal einfallenden TE₁₀-Wellen erzeugt werden.
- **Konstante Permeabilität:** Die verwendeten Füllstoffmaterialien sowie der Glasfaserkunststoff besitzen keine magnetisch wirksamen Inhaltstoffe, weshalb die relative Permeabilität ideal mit $\mu_r = 1$ angenommen wird.
- **Lineare polarisierte EM-Wellen:** Die Radarstrahlung besteht ausschließlich aus linear polarisierten EM-Wellen
- **Infinit dünne Impedanzschichten:** Die Impedanzschichten werden als unendlich dünne Schichten im Modell angenommen, obwohl sie in der Realität eine Dicke von wenigen Mikrometern besitzen.
- **Homogenität der Schichten:** Die einzelnen Schichten des GFK-Verbundes werden vereinfachend als homogene Schicht angenommen.
- **Ideale Schichten des GFKs:** Das GFK wird als ideal gefertigter Werkstoff angenommen. Das heißt er besitzt keine fertigungsbedingten Abweichungen der Schichtdicken.
- **Verlustfreiheit im Hohlleiter:** Der Hohlleiter wird als idealer Wellenleiter angenommen, der keine elektromagnetischen Verluste aufgrund von Oberflächenverlusten an der Außenwand oder Verluste an Flanschen oder Ähnliches besitzt [31].

Das Modell basiert auf einer *Transmission Line* nach [39]. Das ermöglicht die flexible Verkettung von Elementen, womit die unterschiedlichen Messaufbauten modelliert werden können. Die auftretenden elektromagnetischen Effekte werden durch lineare Vierpole wie in Abbildung 10 dargestellt.

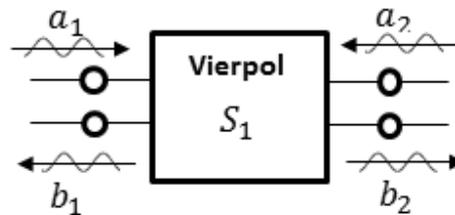


Abbildung 10: Darstellung eines Vierpols als S-Matrix

Die Verknüpfung der (Leistungs-)Wellen des Vierpols wird durch die Streumatrizen wiedergegeben. Dabei beschreiben die Einträge der Hauptdiagonalen das Reflexionsverhalten und die auf den Nebendiagonalen das Transmissionsverhalten.

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Die Eingangswelle wird als normierender Faktor definiert. Im Falle einer elektromagnetischen Welle entspricht sie dem Poyntingvektor in Ausbreitungsrichtung. Die Einträge werden in (18) definiert.

$$\begin{aligned} \underline{S_{11}} &= \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0} ; & \underline{S_{22}} &= \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0} \\ \underline{S_{21}} &= \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0} ; & \underline{S_{12}} &= \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0} \end{aligned} \quad (18)$$

Die Verknüpfung der Teilwellen mit einer Streumatrix hat den Nachteil, dass hintereinandergeschaltete Vierpole nicht einfach per Matrizenmultiplikation in einer Resultierenden zusammengefasst werden können. Die Überführung der Streumatrix in eine Transmissionsmatrix ermöglicht es, die Matrizen durch Multiplikation zu verketteten.

$$\begin{bmatrix} \underline{b}_1 \\ \underline{a}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{T}_{11} & \underline{T}_{12} \\ \underline{T}_{21} & \underline{T}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{a}_2 \\ \underline{b}_2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\underline{\bar{T}} = \prod_{i=1}^n \underline{\bar{T}}_i = \underline{\bar{T}}_1 \underline{\bar{T}}_2 \underline{\bar{T}}_3 \cdots \underline{\bar{T}}_n$$

Die Transformation zwischen den Transmissions- und Streumatrizen wird durch (20) und (21) vollzogen.

$$\underline{\bar{T}} = \frac{1}{\underline{S}_{21}} \begin{bmatrix} -\det(\underline{\bar{S}}) & \underline{S}_{11} \\ -\underline{S}_{22} & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\underline{\bar{T}} = \frac{1}{\underline{T}_{22}} \begin{bmatrix} \underline{T}_{12} & \det(\underline{\bar{T}}) \\ 1 & -\underline{T}_{21} \end{bmatrix}. \quad (21)$$

Für die Modellierung der benötigten Fälle reichen drei Vierpol-Analogien aus. Sie bestehen aus den Fällen für die Reflexion/Transmission an zwei Schichten mit unterschiedlicher Impedanz, einer Analogie für die Transmission in der homogenen Schicht und eine für die infinit dünne Impedanzschicht zwischen zwei GFK-Schichten.

Der Impedanzsprung zwischen der Schicht mit dem Index (i-1) und der Schicht mit dem Index (i) ist mit einer (Teil-)Reflexion der Welle verbunden. Die beschreibende Transmissionsmatrix für diesen Fall ist aus der Literatur entnommen [1].

$$\underline{\bar{T}}_{GS(i-1,i)} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{\tilde{\epsilon}_{r(i-1)} + \sqrt{\tilde{\epsilon}_{r(i)}}}}{2^4 \sqrt{\tilde{\epsilon}_{r(i-1)} \tilde{\epsilon}_{r(i)}}} & \frac{\sqrt{\tilde{\epsilon}_{r(i-1)} - \sqrt{\tilde{\epsilon}_{r(i)}}}}{2^4 \sqrt{\tilde{\epsilon}_{r(i-1)} \tilde{\epsilon}_{r(i)}}} \\ \frac{\sqrt{\tilde{\epsilon}_{r(i-1)} - \sqrt{\tilde{\epsilon}_{r(i)}}}}{2^4 \sqrt{\tilde{\epsilon}_{r(i-1)} \tilde{\epsilon}_{r(i)}}} & \frac{\sqrt{\tilde{\epsilon}_{r(i-1)} + \sqrt{\tilde{\epsilon}_{r(i)}}}}{2^4 \sqrt{\tilde{\epsilon}_{r(i-1)} \tilde{\epsilon}_{r(i)}}} \end{bmatrix} \quad (22)$$

Die Differenzierung zwischen der in Kapitel 2.1 erläuterten Eigenschaften einer ebenen Welle und einer TE₁₀-Welle im rechteckigen Hohlleiter erfolgt durch die effektive Permittivität $\tilde{\epsilon}_r$.

$$\text{Ebene Welle: } \tilde{\epsilon}_r = \epsilon_r = \epsilon'_r - \epsilon''_r \quad (23)$$

$$\text{TE}_{10} \text{- Welle: } \tilde{\epsilon}_r := \epsilon_r - \left(\frac{c_0}{2af}\right)^2 \quad (24)$$

Die Vierpol-Analogie für die Transmission im homogenen Layer muss die Phasendrehung und die Dämpfung in der Schicht mit der Dicke d_i wiedergeben. Die Transmissionsmatrix ist in (25) dargestellt [1].

$$\underline{\underline{T}}_{T(i)} = \begin{bmatrix} e^{-jk_i d_i} & 0 \\ 0 & e^{jk_i d_i} \end{bmatrix} \quad (25)$$

Die vierte Vierpolanalogie beschreibt die infinit dünne Impedanzschicht zwischen zwei Schichten gleicher Wellenimpedanz. Die bestimmende Kenngröße der Impedanzschicht ist die komplexe Impedanz \underline{Z} . Da davon ausgegangen wird, dass die Impedanzschicht immer zwischen zwei gleichen Materialien eingesetzt wird, ist es nicht nötig, die Schicht links und rechts der Impedanzschicht differenziert zu betrachten. Die Streumatrix ist in (26) dargestellt. [7]

$$\underline{\underline{S}}_{I(i,i+1)} = \begin{bmatrix} \frac{\underline{Z}_{W,TE}}{2\underline{Z} + \underline{Z}_{W,TE}} & \frac{2\underline{Z}}{2\underline{Z} + \underline{Z}_{W,TE}} \\ \frac{2\underline{Z}}{2\underline{Z} + \underline{Z}_{W,TE}} & -\frac{\underline{Z}_{W,TE}}{2\underline{Z} + \underline{Z}_{W,TE}} \end{bmatrix} \quad (26)$$

Für die Integration in eine *Transmission Line* mit mehreren Vierpolen wird die Streumatrix in der Simulation nach (20) in die Transmissionsmatrix überführt. Die Darstellung als infinit dünne Schicht in Form von nur einer Streumatrix ist eine Standarddarstellung bei Schichtdicken, die kleiner sind als die Eindringtiefe der Welle [7]. Durch die Darstellung entfällt die mit Unsicherheiten verbundene Bestimmung der realen Schichtdicken im GFK.

5.1 Charakterisierung der Schichten

Das Modell zur Charakterisierung der einzelnen Schichten des Multilayerabsorbers setzt sich aus zwei unterschiedlichen Konfigurationen zusammen. Die erste Konfiguration beschreibt den Aufbau eines reinen GFKs ohne eingebrachte Impedanzschichten. Dieses Modell wird genutzt, um die Permittivität des GFKs zu bestimmen, da die Materialeigenschaften bei der späteren Charakterisierung der Impedanzschichten benötigt werden. Der in Kapitel 6.3 näher beschriebene Hohlleiter-Versuchsaufbau kann durch die Transmission Line in Abbildung 11 mathematisch abgebildet werden. Das Modell muss

die gesamte Messstrecke zwischen *Gate 1* und *Gate 2* beschreiben und besteht aus vier Vierpolen. Von links betrachtet, beschreibt der Vierpol 1 die Reflexion und Transmission der Welle am *Gate 1*. Die Welle trifft dort auf die Messprobe aus reinem GFK. Vierpol 2 transmittiert die Welle unter Berücksichtigung der Dämpfung und Phasendrehung innerhalb der Probe. Die Dicke der Probe variiert mit dem vermessenen Probekörper. Vierpol 3 beschreibt die Transmission und Reflexion beim Übergang der Welle zurück in die Luft, während Vierpol 4 die Transmission der Welle durch die Luft, über die Länge der restlichen Messstrecke bis hin zum *Gate 2* beschreibt. Die in diesem Versuch zu bestimmende Permittivität des GFKs ist als Variable in den Vierpolen 1 bis 3 vorhanden.

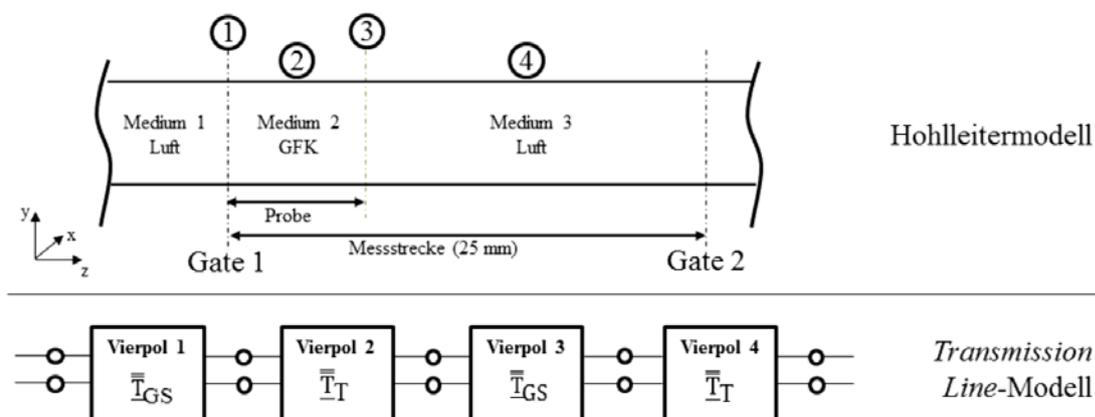


Abbildung 11: *Transmission Line*-Modell des GFKs. Das oben dargestellte Hohlleitermodell wird durch die unten abgebildete *Transmission Line* modelliert. Die rund eingerahmten Zahlen im Hohlleitermodell repräsentieren die zugeordnete Vierpol-Analogie.

Bei der Charakterisierung der Impedanzschichten muss das Modell, wie in Abbildung 12, erweitert werden, da die Messprobe nicht mehr homogen aus einer Schicht aufgebaut werden kann, sondern durch drei Schichten simuliert werden muss. Die Impedanzschicht wird als ideal mittig positioniert im Probekörper angenommen. Dadurch müssen zwischen den Vierpolen 1 und 5 drei Vierpole eingefügt werden. Vierpol 2 und 4 beschreiben die Transmission in der jeweiligen GFK-Schicht. Die Dicke der Schicht ist die Hälfte der Dicke des gesamten Probekörpers. Zwischen den beiden Vierpolen wird der Vierpol 3 für die mathematische Beschreibung der Impedanzschicht eingefügt. Die in diesem Versuch zu bestimmende Materialgröße ist der elektrische Widerstand der Impedanzschicht. Diese findet sich nur im Vierpol 3 wieder.

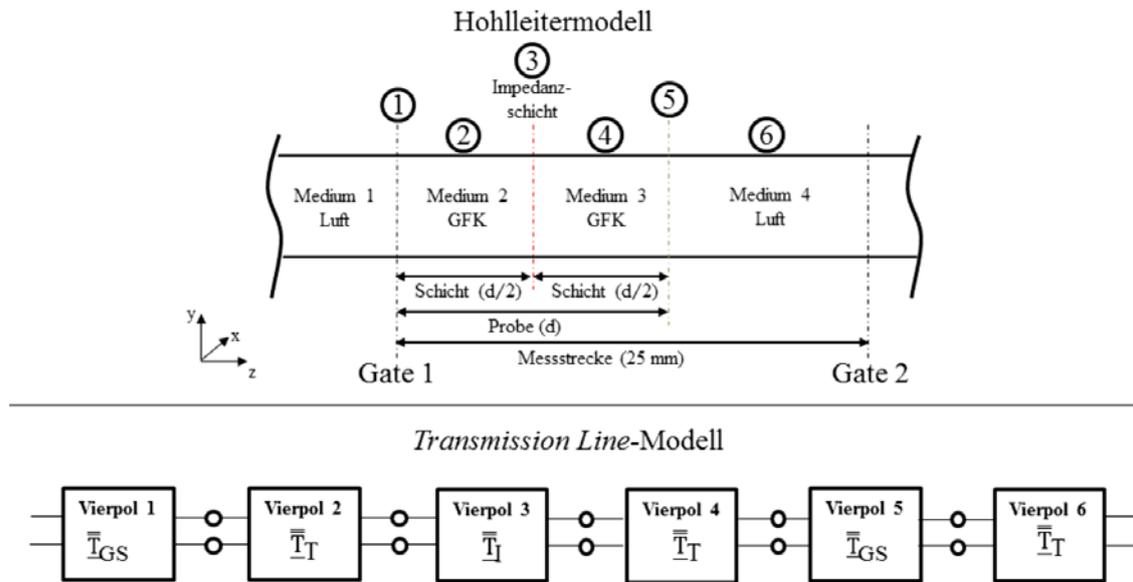


Abbildung 12: Transmission Line-Modell des GFKs mit einer Impedanzschicht. Das oben dargestellte Hohlleitermodell wird durch die unten abgebildete Transmission Line modelliert. Die rund eingerahmten Zahlen im Hohlleitermodell repräsentieren die zugeordnete Vierpol-Analogie.

Die beiden Modelle bilden die Ausgangsbasis für den „Brute Force“-Ansatz, der für die Zurückrechnung der Permittivität bzw. der Impedanz genutzt wird. Der Ansatz basiert auf der Variation des gesuchten Parameters und dem anschließenden Vergleich der im Hohlleiter gemessenen Streumatrix mit der im Modell berechneten Streumatrix und ist an die Veröffentlichung [1] angelehnt. Das Prinzip ist in Abbildung 13 dargestellt. Da über einen Frequenzbereich von 2,6 bis 4,0 GHz gemessen wird und die Materialparameter über den Frequenzbereich nicht als konstant angenommen werden, muss für jeden im Versuch abgetasteten Frequenzpunkt (1) der Prozessschritt wiederholt werden. Darauf folgt die Auswahl des Materialparameters (2). Hierfür wird vorab für die komplexe Impedanz bzw. die komplexe Permittivität ein plausibler Lösungsraum für den Materialparameter festgelegt. Mit den entsprechenden Materialparametern wird die Streumatrix über die gesamte Transmission Line mithilfe des jeweiligen Transmission Line-Modells (4) berechnet. Die berechnete Streumatrix wird anhand der Distanzfunktion in Formel 27 verglichen (5) und in einer Variablen gespeichert.

$$\text{dist} = |\underline{S}_{\text{sim},11} - \underline{S}_{\text{mess},11}|^2 + |\underline{S}_{\text{sim},21} - \underline{S}_{\text{mess},21}|^2 + |\underline{S}_{\text{sim},22} - \underline{S}_{\text{mess},22}|^2 + |\underline{S}_{\text{sim},12} - \underline{S}_{\text{mess},12}|^2 \quad (27)$$

Die beschriebene Prozedur wird für den kompletten Lösungsraum des Materialparameters wiederholt, bevor aus den gespeicherten Distanzen die Lösung mit der minimalen Distanz ermittelt wird (5). Diese wird in einer Ergebnisvariablen gespeichert. Die Prozedur wird anschließend für jeden Messpunkt innerhalb des abgetasteten Frequenzbereiches wiederholt.

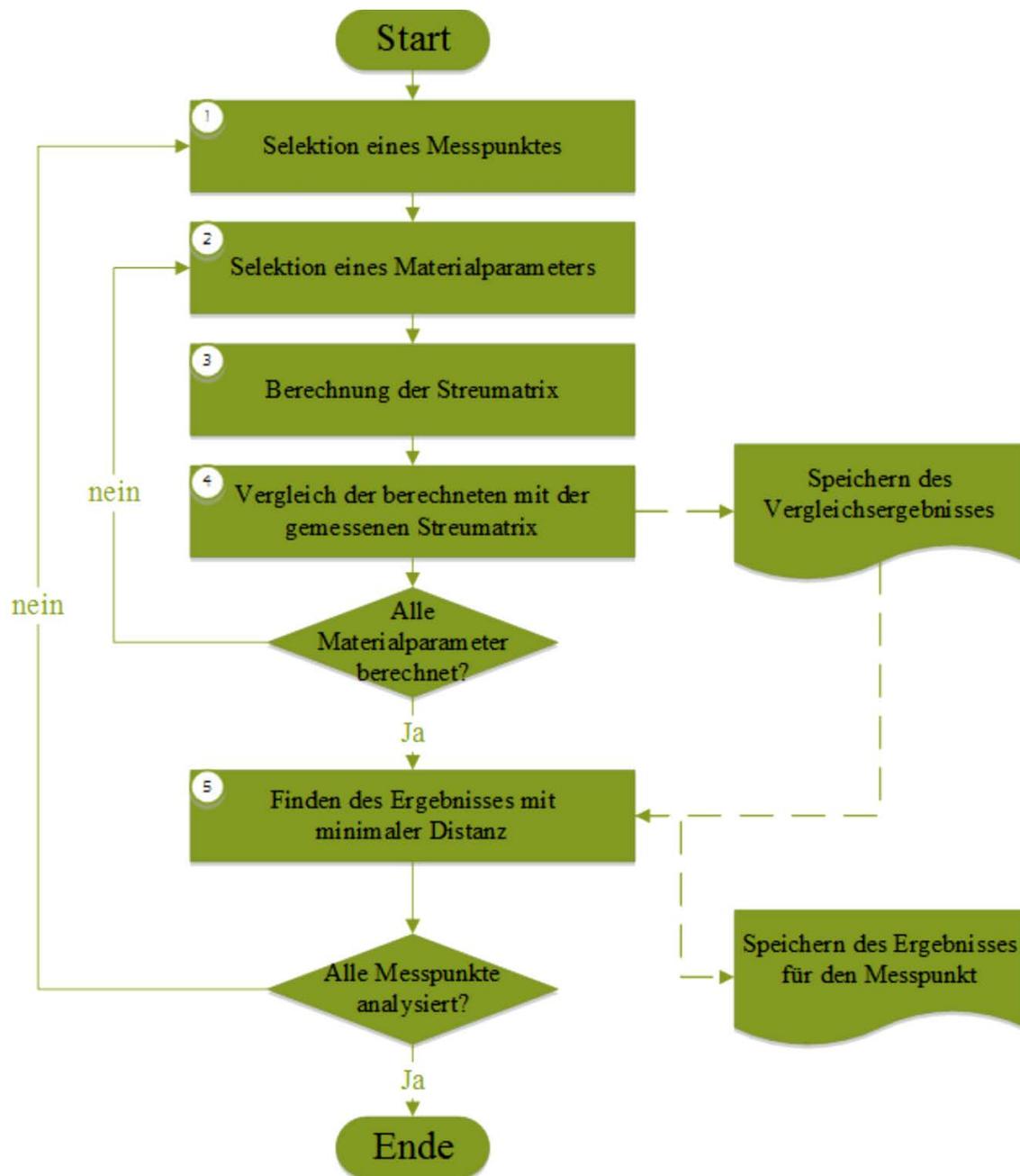


Abbildung 13: Prozessschritte bei der Charakterisierung der Schichten

5.2 Simulation des Multilayerabsorbers

Die Simulation des Multilayerabsorbers wird wieder aus den drei beschriebenen *Transmission Line*-Elementen aufgebaut. Bei einer Plattendicke von ca. 5 mm werden sechs Lagen Glasgewebe benötigt. Wie im Vorentwurf dargestellt, soll es möglich sein, zwischen jeder Glasgewebelage eine Impedanzschicht zu integrieren. Im Modell wird angenommen, dass die Welle, bevor sie auf eine Impedanzschicht treffen kann, zuerst in das GFK eindringt. Die elektrisch leitende Schicht hinter dem GFK wird als eine Impedanzschicht mit $Z \approx 0$ simuliert. Die Messstrecke wurde dahingehend verändert, dass der Probekörper am Ende der Messstrecke an Port 2 anliegt. Die Glieder sind analog zu den *Transmission Line*-Modellen in Kapitel 5.1 zugeordnet.

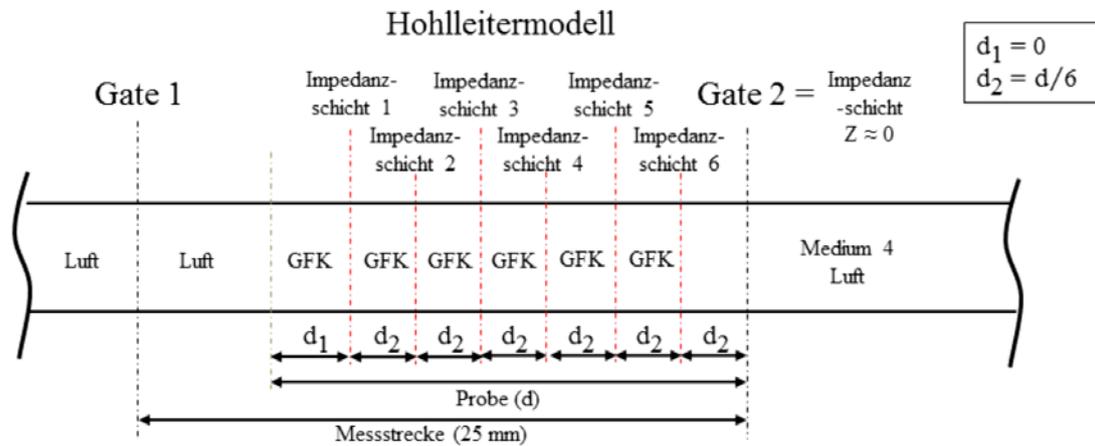


Abbildung 14: Hohlleitermodell des Multilayerabsorbers. Das *Transmission Line*-Modell wird analog zu den Abbildungen 11 und 12 zugeordnet.

5.3 Evaluierung des *Transmission Line* Modells

Die Modelle wurden mit Scilab umgesetzt. Um den Quellcode, die Modelle und das Vorgehen zu evaluieren, wurden die in diesem Kapitel beschriebenen Vergleiche und Fälle berechnet. Ziel dabei ist das *Transmission Line*-Modell mit seinen Elementen auf Fehler zu überprüfen und eine Abschätzung der Prägnanz der simulierten Materialparameter zu ermöglichen.

Die allgemeinen Testfälle bestehen aus der Simulation der reflexionsfreien $\lambda/2$ und $\lambda/4$ -Fälle. Im Falle des $\lambda/2$ wurde ein virtuelles Modell mit drei Schichten angenommen. Die erste und dritte Schicht besitzen eine relative Permittivität von $\epsilon_r = 1$. Die Dicke der

zweiten Schicht beträgt bei einer relativen Permittivität von $\epsilon_r = 10-5j$ gleich $d = 0,0172+0,0043j$.

Für den Fall der $\lambda/4$ -Schichten wurde ein virtuelles Modell bestehend aus fünf Schichten simuliert. Die dritte Schicht wurde wieder mit einer relativen Permittivität von $\epsilon_r = 10-5j$ simuliert, während die erste und letzte Schicht eine rel. Permittivität von $\epsilon_r = 1$ erhielten. Die zweite und vierte Schicht werden mit 28 berechnet. Daraus kann die Dicke der Schicht bei für $d = \lambda/4$ bestimmt werden.

$$Z_{W,i} = \sqrt{Z_{W,(i+1)} \cdot Z_{W,(i-1)}} \quad (28)$$

Die Ergebnisse beider Simulationen ergaben jeweils eine reine Transmission ohne Reflexion.

Um eine Abschätzung der Berechnungsmethode für die Bestimmung der relativen Permittivität zu ermöglichen, wurden die Simulationsergebnisse der Permittivität einer GFK-Schicht des eigenen Modells „*Brute-Force*“-Methode mit denen einer Nicholson-Weird-Ross-(NRW)-basierten Methode verglichen [28]. Exemplarisch für die Vergleiche wird in Abbildung 15 der Vergleich eines Probekörpers aus einer 5 mm dicken GFK-Platte dargestellt. Das Ergebnis des Vergleichs ist zufriedenstellend. Der Unterschied im unteren Frequenzbereich liegt an der getroffenen Annahme einer relativen Permeabilität von 1. Der NRW-Algorithmus berechnet in diesem Bereich eine leichte Abweichung der Permeabilität. Ein weiterer Grund für die leichten Abweichungen kann in der Distanzfunktion liegen. Während der NRW-Algorithmus ausschließlich die S_{11} und S_{22} Parameter der Streumatrix analysiert, wird im „*Brute-Force*“-Ansatz die komplette Streumatrix ausgewertet.

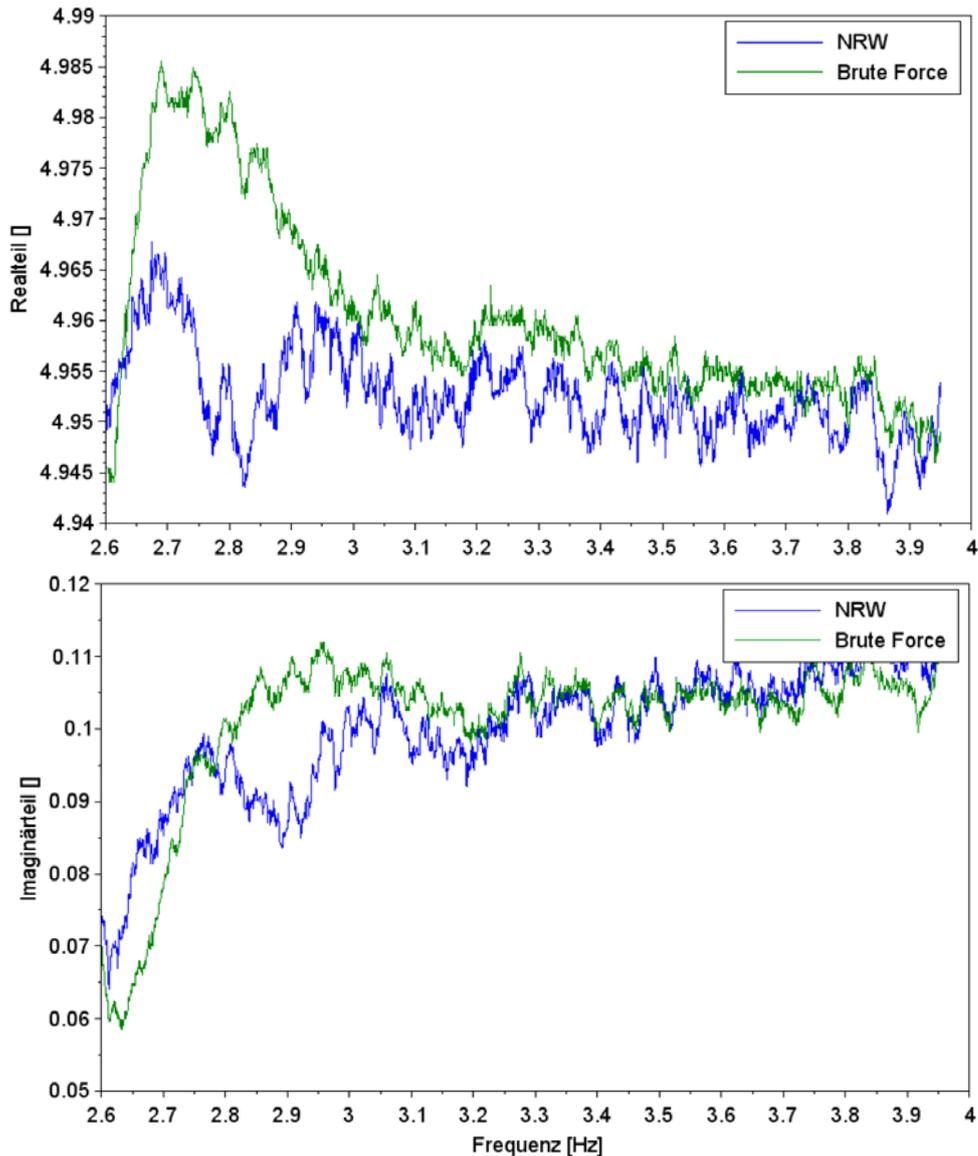


Abbildung 15: Vergleich der berechneten Permittivität einer reinen GFK-Schicht mit dem „Brute-Force“-Ansatz und der NRW-Methode (oben – Realtell von Epsilon, unten – Imaginärteil von Epsilon)

Um eine Abschätzung der Korrelation zwischen den Werten der Distanzfunktion (Formel 27) und der daraus resultierenden Abweichungen zu erhalten, wurde die Permittivität einer Plexiglasprobe mit einer definierten Permittivität und einem zulässigen Frequenzbereich geprüft und zurückgerechnet [46]. Das Ergebnis der Berechnung ist in Abbildung 16 dargestellt.

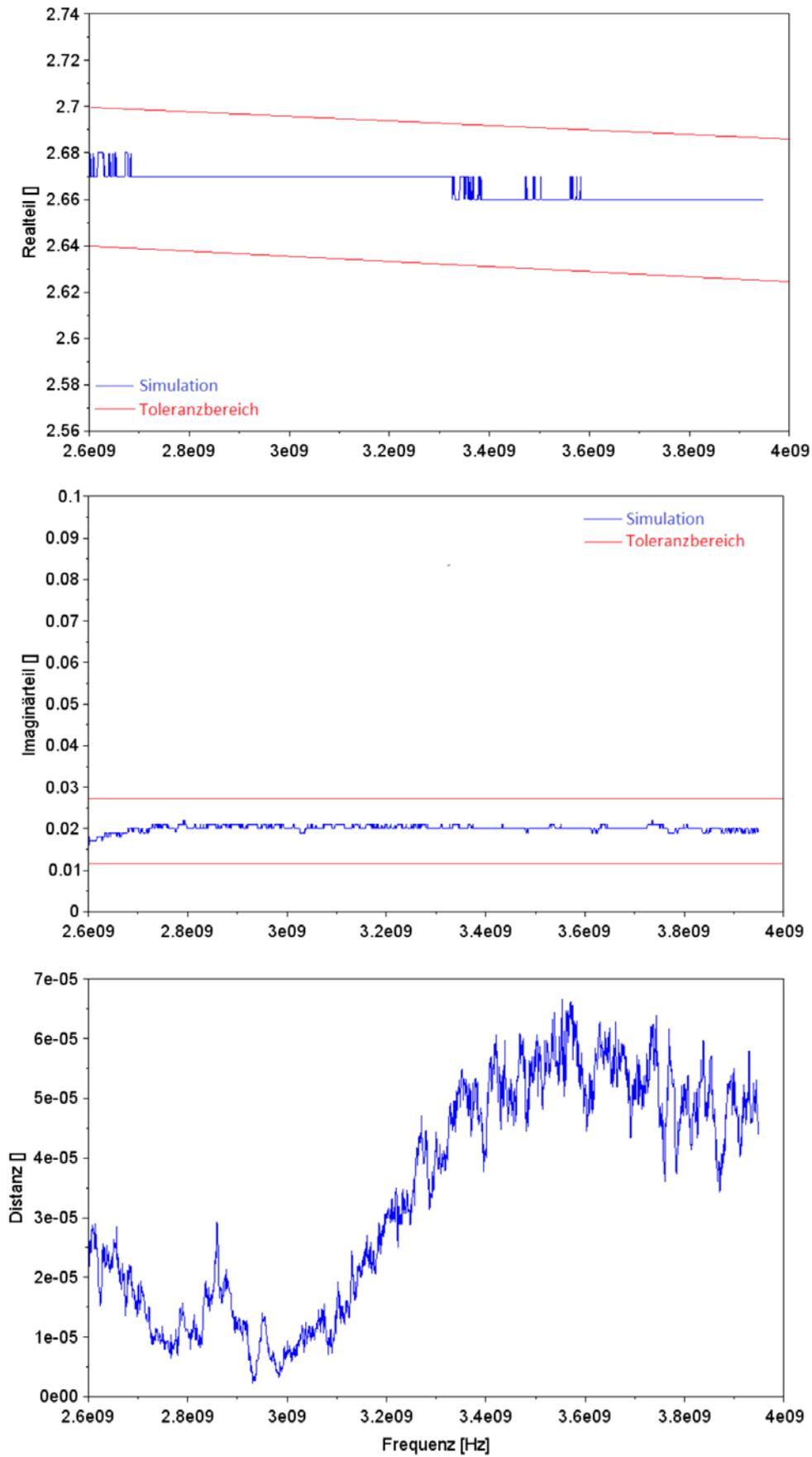


Abbildung 16: Korrelation der Permittivität und der Distanz

Um eine Abschätzung der maximal zulässigen Distanz zu ermöglichen, wurden die Werte der Distanzfunktion über den tolerierten Werten der Permittivität der Plexiglasprobe in Abbildung 17 bei einer Frequenz von 2,6 GHz aufgetragen. Die maximal zulässige Distanz, damit die berechneten Werte für Epsilon im Toleranzbereich sind, liegt bei ungefähr 0,01. Die Berechnung der Materialparameter wird so ausgelegt, dass die Werte der Distanz³ unter diesem Grenzwert liegen.

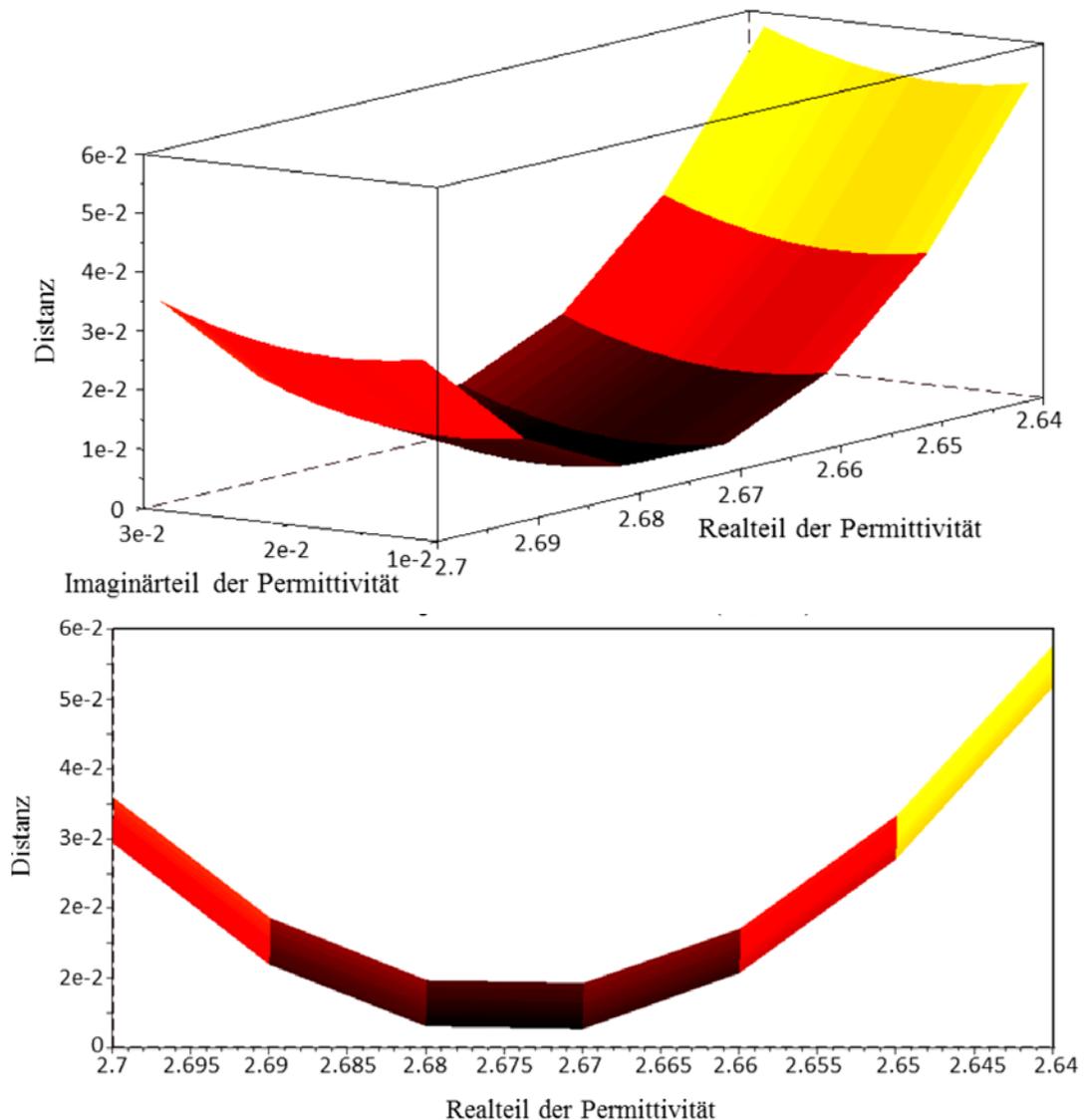


Abbildung 17: Darstellung des Toleranzbereichs der komplexen Permittivität einer Plexiglasprobe bei einer Frequenz von 2,6 GHz. Daraus lässt sich der Maximalwert der Distanzfunktion zur Einhaltung der tolerierten Permittivität ableiten (oben 3-D-Ansicht, unten Seitenansicht)

Um das Modell zur Berechnung der Impedanzen einer Schicht zu evaluieren, wurde ebenfalls ein Vergleich der „Brute-Force“ Methode mit einer NRW-Methode angestellt.

³ Anhang: Tabelle 12

Abbildung 18 zeigt die berechnete Impedanz einer Schicht mit 5 g/m² PAN-Faser. Die Abweichung zwischen den Berechnungsmethoden kann auf eine nicht mittig liegende Impedanzschicht hinweisen, da der NRW-basierte Algorithmus nur die Eingangsparameter der Streumatrix überprüft und die „Brute Force“-Methode die komplette Streumatrix.

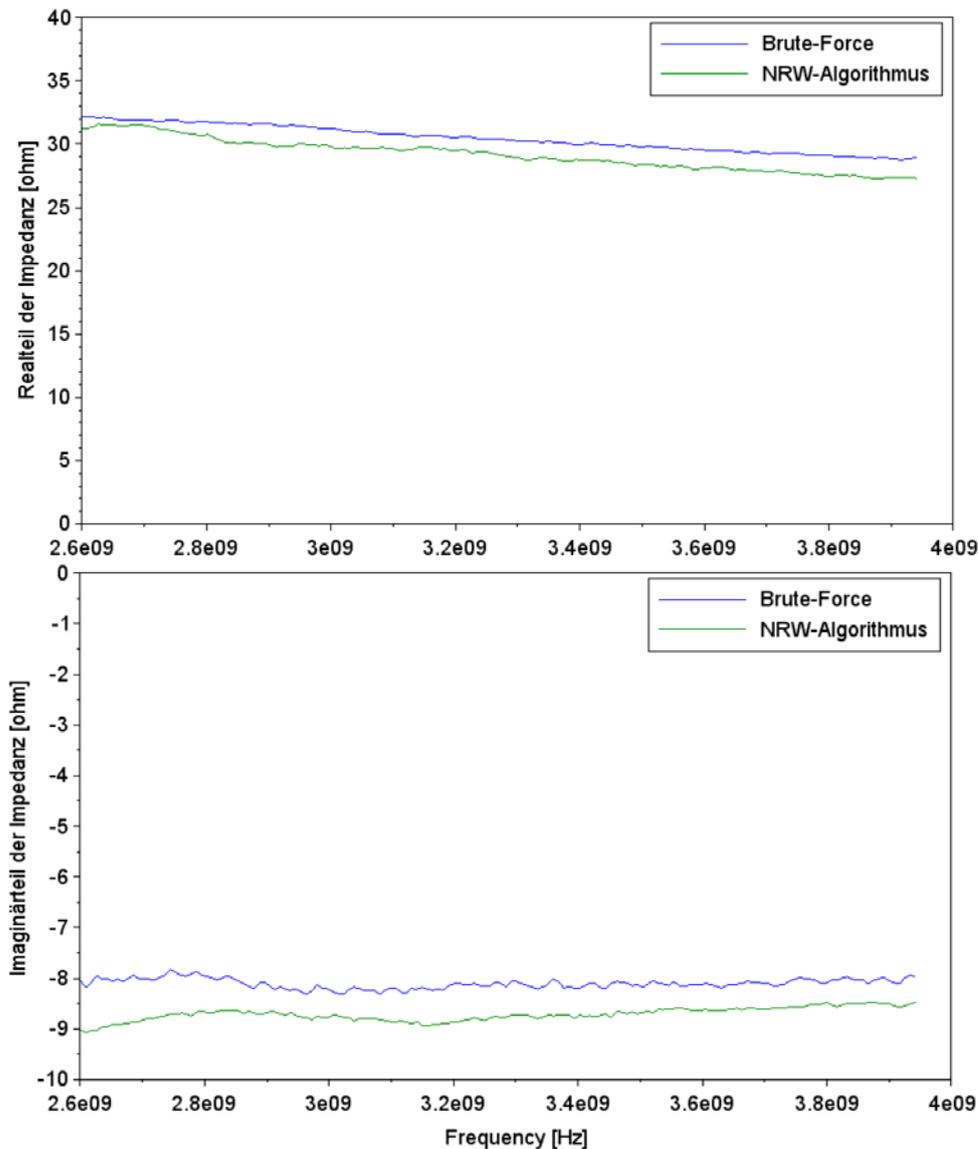


Abbildung 18: Exemplarischer Vergleich der berechneten Impedanzen durch den in der Arbeit angewendeten „Brute-Force“- und des NRW-Algorithmus. (oben – Realteil der Impedanz, unten – Imaginärteil der Impedanz)

Aufgrund fehlender Vergleichsproben war es nicht möglich, eine minimale Distanz bei der Berechnung der Impedanzschichten festzulegen.

6 CHARAKTERISIERUNG DER ABSORBERSCHICHTEN

In diesem Kapitel werden die genutzten Materialien näher beschrieben und geprüft, die durchgeführten experimentellen Versuche zur Charakterisierung der Absorberschichten erläutert und die Ergebnisse zwischenbewertet.

6.1 Ausgangsmaterialien für die Herstellung der Impedanzschichten

Für den Vergleich der RAMs vor und nach ihrer Verarbeitung wurden die Materialien in ihrem Ausgangszustand untersucht. Außerdem beschreibt dieses Kapitel die für die Herstellung der Füllstoffsuspensionen notwendigen Dispersionsadditive sowie die damit beschichteten Trägerstoffe, die zusammen eine Impedanzschicht bilden.

6.1.1 Qualitätskontrolle der selektierten kohlenstoffbasierten Füllstoffe

Das untersuchte *Carbon Black*⁴ wird in agglomerierter Form vom Hersteller geliefert. Für eine möglichst homogene Beschichtung des Trägermaterials müssen die Agglomerate zuerst aufgespalten werden, um es dann in einer stabilen Lösung verarbeiten zu können.

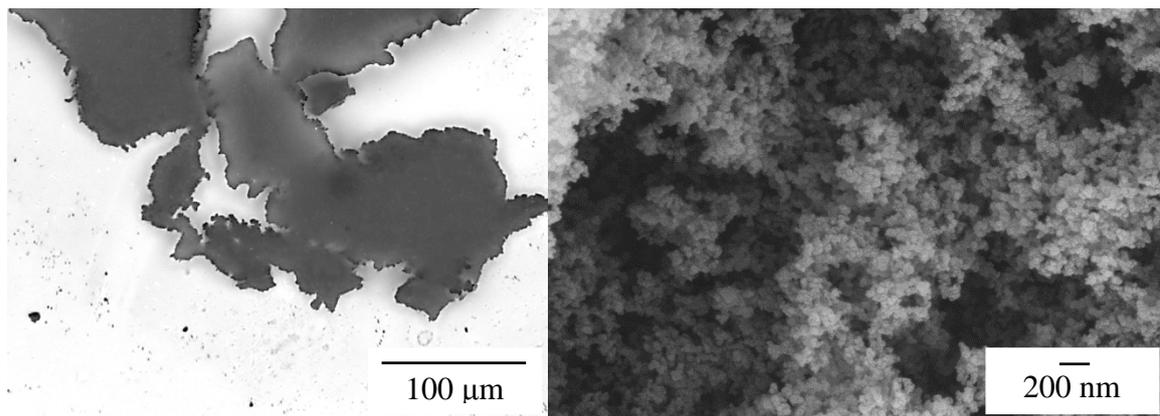


Abbildung 19: Lichtmikroskopische Aufnahme von agglomeriertem *Carbon Black* (links) und die Zusammensetzung aus Primärpartikeln unter dem REM (rechts)

Die geschnittenen PAN-Fasern⁵ haben eine durchschnittliche Länge von 3 mm und werden in Form von geschnittenen *Rovings* geliefert. Zur Qualitätskontrolle werden die Fasern unter dem Mikroskop untersucht. In Abbildung 20 ist eine Probe der geschnittenen PAN-Fasern abgebildet. Gut sichtbar sind die vereinzelt Filamente sowie die *Rovings* der Fasern. Die Abweichung von den Herstellerangaben hinsichtlich ihrer Faserlänge ist sehr gering. Jedoch sind vereinzelte Verunreinigungen auf den *Rovings* zu erkennen.

⁴ Orion Engineered Carbons: XPB 552

⁵ SGL Group: Sigrafil C30 - S003

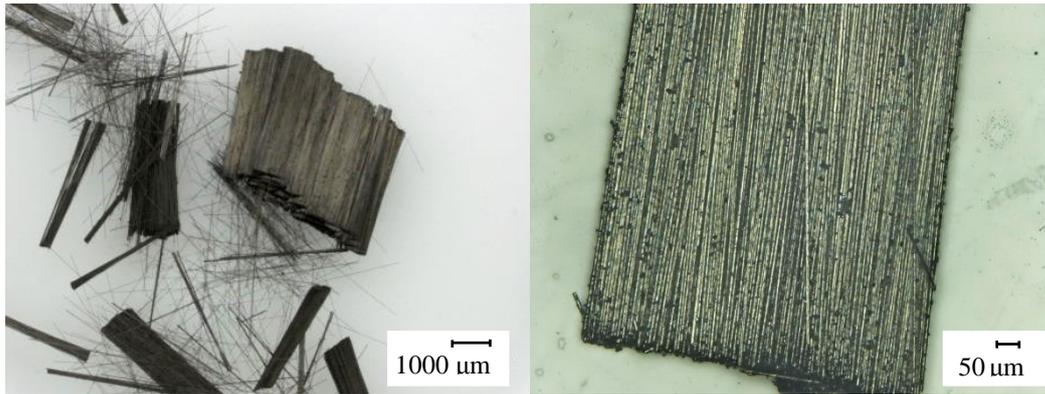


Abbildung 20: Lichtmikroskopaufnahme von unbehandelten PAN-Fasern (geschnitten)

Die geschnittenen Pech-Fasern⁶ werden wie die PAN-Fasern in Form von Rovings geliefert. Die Faserlänge wird vom Hersteller mit 6 mm angegeben. In Abbildung 21 sind neben dem Roving mit korrekter Faserlänge auch eine Vielzahl an gebrochenen Filamenten zu erkennen. Die niedrige Duktilität der Fasern erfordert eine besonders schonende Verarbeitung dieser Fasern.

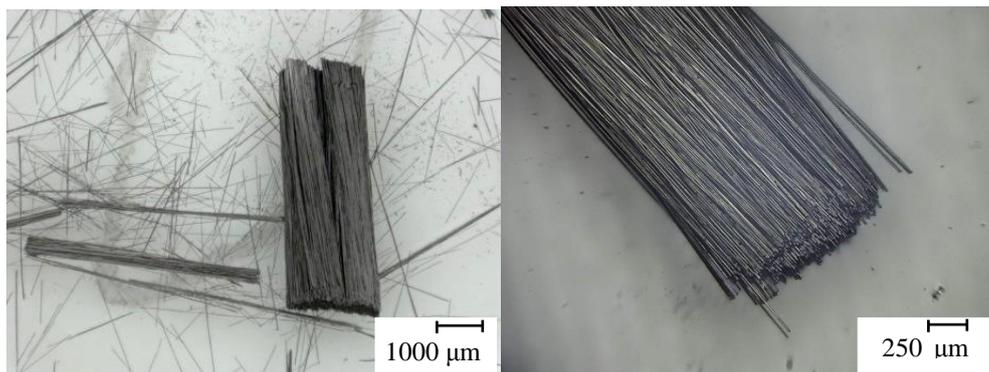


Abbildung 21: Lichtmikroskopaufnahme von unbehandelten Pech-Fasern (geschnitten)

Die Länge der gemahlten PAN-Fasern⁷ ist vom Hersteller mit einer Länge von 150 Mikrometer angegeben. Bei der Überprüfung unter dem Mikroskop wurde auch hier eine starke Streuung der Faserlängen erkannt (Abbildung 22).

Ähnlich den gemahlten PAN-Fasern sind auch die gemahlten Pech-Fasern⁸ nicht einheitlich lang (Abbildung 23). Der Hersteller gibt eine Faserlänge zwischen 50 und 200 Mikrometer an.

⁶ Mitsubishi Plastics: Dialed™ K223HE

⁷ SGL Group: Sigrafil C30 M150 UMS

⁸ Mitsubishi Plastics: Dialed™ K223HM

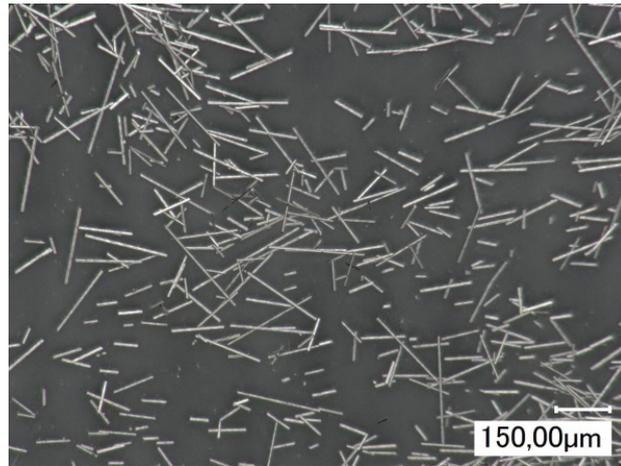


Abbildung 22: Lichtmikroskopaufnahme von unbehandelten PAN-Fasern (gemahlen)

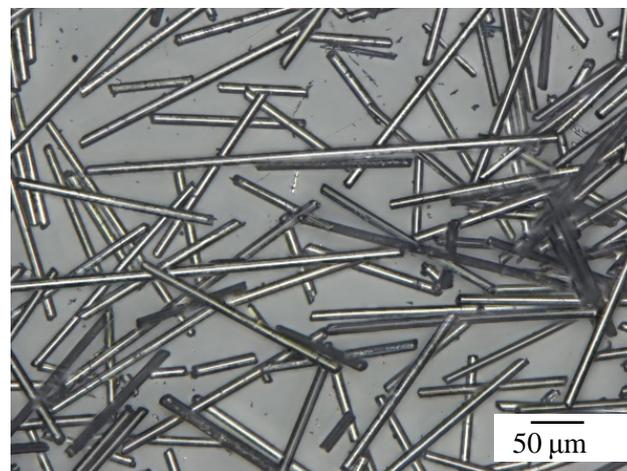


Abbildung 23: Lichtmikroskopaufnahme von unbehandelten Pech-Fasern (gemahlen)

6.1.2 Trägermaterialien

Als Trägermaterial werden ausschließlich glasfaserbasierte Materialien mit einem geringen Flächengewicht genutzt. Ein niedriges Flächengewicht wird aufgrund der Anforderung, das Gesamtgewicht des Absorbersystems zu minimieren, bevorzugt. Als Trägermaterial für die geschnittenen Pech- und PAN-Fasern wird mit Blick auf ihre Faserlänge und die daraus resultierende nicht benötigte geringe Maschenweite ein Glasfaservlies⁹ mit einem Flächengewicht von 30g/m² eingesetzt. Bei der Beschichtung mit *Carbon Black* wird eine Glasfasergewebe¹⁰ mit Leinwandbindung und einem Flächengewicht von 48 g/m² genutzt. Die größere Oberfläche des Gewebes verspricht einen höheren Auftrag des *Carbon Blacks* im Vergleich zum Glasvlies. In Anbetracht der

⁹ R&G: 190160X

¹⁰ Interglas: 02037

sehr geringen Faserlängen der gemahlen PAN- und Pech-Fasern wird das Glasfasergewebe auch bei der Beschichtung mit gemahlene Fasern eingesetzt, da die engeren Maschen einen geringeren Durchlass für die kurzen Fasern bieten sollen.

6.1.3 Adhensions- und Dispersionsadditive

Mögliche Adhensions- und Dispersionsadditive sind Polyvinylbutyral¹¹ (PVB) [25] und das Antistatikadditiv Addid® 240¹².

Addid 240 wird in Form einer gelblichen Flüssigkeit geliefert und in ionisiertem Wasser gelöst. Der Lösungsvorgang wird unter ständigem Rühren mit einem Magnetrührer (ca. 600 rpm) durchgeführt. Das Addid 240 stabilisiert die *Carbon Black* Lösungen nicht und zeigt auch bei den gemahlene und geschnittenen Fasern keine Wirkung. Es ist nicht geeignet, die verschiedenen Füllstoffe auf ihrem Trägermaterial zu fixieren.

PVB wird unter konstantem Rühren mit einem Magnetrührer in Ethanol gelöst. In den Versuchsreihen wurden Lösungsmengen von 1 bis 5 wt.% problemlos in Ethanol gelöst. In Verbindung mit *Carbon Black* erzeugt es eine stabile Dispersion. Bei der Mischung mit geschnittenen PAN- und Pech-Fasern zögert es mit steigenden Lösungsmengen den Sedimentierungsprozess hinaus. Auf das Sedimentierungsverhalten der gemahlene PAN- und Pech-Fasern hat PVB einen sehr geringen Einfluss. Einer der wichtigsten Eigenschaften des PVB sind seine adhäsiven Fähigkeiten, um die Füllstoffe an das Trägermaterial zu binden (Abbildung 24). Das Benetzen der Oberfläche der Füllstoffe führt zu einer elektrisch isolierenden Schicht zwischen den einzelnen Füllstoffpartikeln bzw. Fasern (Abbildung 25).

Der Vergleich der Haftungseigenschaften wird in Abbildung 24 anhand eines mit Addid 240 und PVB beschichteten Glasfasergewebes veranschaulicht. Die Tabelle 5 zeigt die Gewichtsanteile der Suspensionen, mit denen das Glasfasergewebe behandelt ist. Beide Suspensionen wurden nach der Zugabe des *Carbon Black* 10 Minuten lang mit einer Ultraschallsonotrode (Intensität 50%) behandelt, um die Agglomerate aufzubrechen. Aufgrund seiner adhäsiven Eigenschaften wird das PVB für die weitere Anwendung ausgewählt.

¹¹ Kuraray Specialities: Mowital® B60H

¹² Evonik Industries: Addid® 240

Tabelle 5: Suspension zum Haftungsvergleich zwischen PVB und Addid 240

PVB	Ethanol	Wasser	Addid 240	CB
[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
1	100	---	---	2
---	---	100	1	2

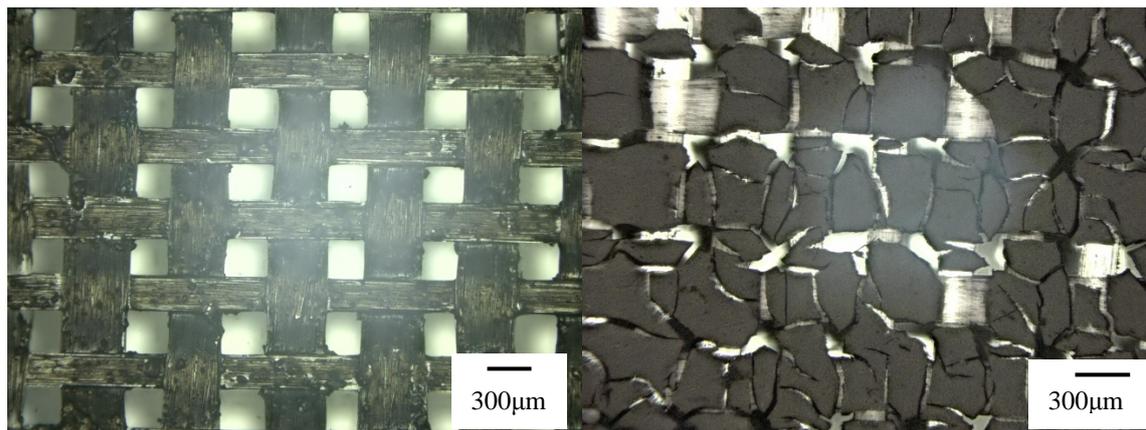
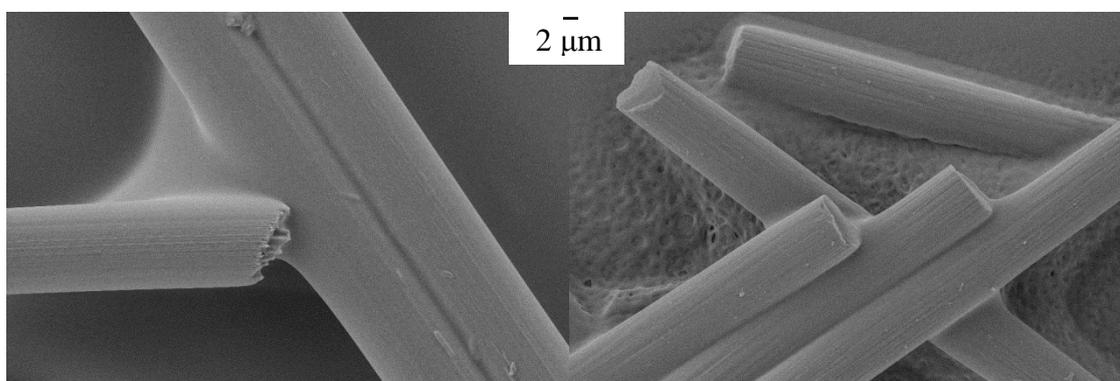

 Abbildung 24: Lichtmikroskopaufnahme einer *Carbon Black*-Beschichtung mit PVB (links) und Addid 240 (rechts)


Abbildung 25: Beschichtete Pech-Fasern (links) und PAN-Fasern (rechts): 2 wt.% PVB-Ethanol-Lösung unter dem Rasterelektronenmikroskop

6.2 Herstellung der Impedanzschichten

Die Herstellungsmethoden für die verschiedenen Impedanzschichten wurden in Kapitel 4.2.3 schon kurz erläutert. In diesem Kapitel wird nun der Herstellungsprozess für die einzelnen Materialien detailliert dargestellt.

6.2.1 Herstellung der faserbasierten Impedanzschichten

Das Beschichtungsverfahren für die gemahlene und geschnittenen PAN- und Pech-Fasern basiert auf einem Papierschöpfverfahren. Dafür werden die Füllstoffe in einer Suspension gelöst und in einem weiteren Prozessschritt auf das Trägermaterial aufgebracht.

Um die in der Qualitätskontrolle in Kapitel 6.1.1 gezeigten Rovings der geschnittenen PAN- und Pech-Fasern in einem ersten Schritt aufzuschließen, werden die geschnittenen Fasern in einem Acetonbad vorgewaschen. Die gemahlene PAN- und Pech-Fasern werden nicht vorbehandelt. In der Vorbehandlung werden die Fasern in einem Verhältnis von 0,5 g auf 100 g Aceton 30 Minuten in einem Ultraschallbad¹³ (Stufe 10) vorbehandelt. Anschließend werden die Fasern mit einem Faltsieb (Maschenweite 130 µm) aus dem Aceton gefiltert und bei Raumtemperatur getrocknet. Das Ergebnis (Abbildung 26) zeigt auf der linken Seite die behandelten PAN-Fasern. Bei der Behandlung wurden die Faserlängen weitgehend erhalten, die Rovings konnten komplett in ihre Filamente zerlegt werden. Auf der rechten Seite sind die Pech-Fasern abgebildet. Die Rovings werden durch die Behandlung nicht komplett aufgespalten. Die Intensität der Ultraschallbehandlung führt bei den Fasern zu einem weiteren Bruch der Filamente.

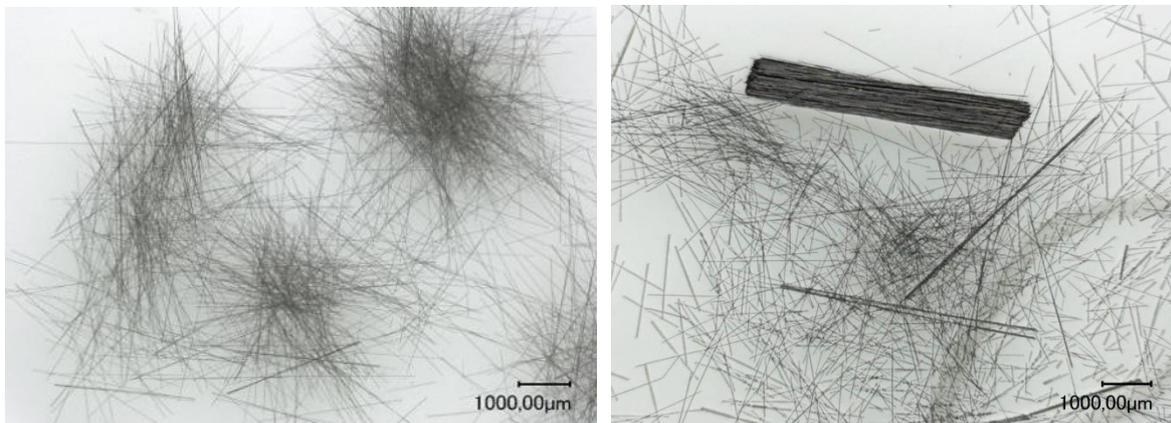


Abbildung 26: Lichtmikroskopaufnahme acetonbehandelter Fasern (links PAN-Faser, rechts Pech-Faser)

Die Herstellung der Suspension erfolgt in zwei Schritten. Zuerst wird das PVB in Ethanol gelöst. Das PVB wird bei konstanten Rühren (1000 rpm) mit einem Magnetrührer dem Ethanol zugegeben und solange verrührt, bis das PVB sich komplett in dem Ethanol

¹³ Bandelin: Sonorex Digital 10 P

gelöst hat. Anschließend werden die Füllstoffe der PVB-Ethanolmischung hinzugegeben und wiederum bei konstantem Rühren mit einem Magnetrührer und gleichzeitiger Ultraschallbehandlung mit einer Ultraschallsonotrode¹⁴ (Intensität 40 %) dispergiert. Der Versuchsaufbau der Ultraschallsonotrode mit einem Magnetrührer ist in Abbildung 27 dargestellt. Die Zugabe der Füllstoffe erfolgt immer in einem konstanten Verhältnis von 0,03 wt.% Füllstoff zur Ethanol-PVB-Lösung, wodurch die Gesamtmenge der Fasersuspension variiert werden muss. Die Dauer der Behandlung ist abhängig von den Füllstoffen und der angesetzten Suspensionsmenge. Längere Ultraschallbehandlungen werden in 5-Minuten-Intervallen kontrolliert. Teilweise werden vereinzelte Pech-Faser-Rovings nicht aufgetrennt, diese wurden manuell aufgespalten und wieder zurück in die Suspension gegeben. In Tabelle 6 ist die unterschiedliche Prozessdauer in Abhängigkeit vom Gewicht und der Faserart dargestellt. Das angegebene Flächengewicht bezieht sich auf den folgenden Beschichtungsprozess und gibt die durchschnittliche Menge an, mit der der Trägerstoff durch die Suspension beschichtet wird.

Tabelle 6: Übersicht über die Herstellung der Faser-Suspension

Flächengewicht [g/m ²]	Füllstoff	Füllstoffgewicht [g]	Gesamtmenge PVB-Ethanol-Füllstoff [g]	Dauer [min]
2,5	PeFc	0,24	801	2x5
5	PeFc	0,48	1602	2x5
10	PeFc	0,91	3204	4 x 5
0.65	PANFc	0,06	192	1-2
1,25	PANFc	0,12	401	1-2
2,5	PANFc	0,24	801	5
5	PANFc	0,48	1602	2 x 5
10	PANFc	0,91	3204	4 x 5
10	PANFm	0,91	3204	1
10	PeFm	0,91	3204	1

¹⁴ Branson: Sonifier® Cell Disruptor B15 / Bio Horn - 1/2“

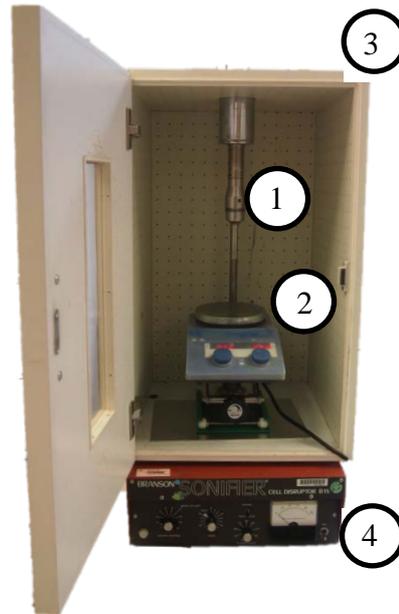


Abbildung 27: Foto eines Sonifiers mit Magnetrührer. Legende: 1 – Ultraschallhorn, 2 – Magnetrührer, 3 – Gehäuse, 4 - Sonifier

Die hergestellten Ethanol-PVB-Faser-Suspensionen werden für die in Abbildung 28 dargestellte Siebvorrichtung genutzt. Die selbst entwickelte Vorrichtung besteht aus einem quadratischen Acrylglaskasten mit den inneren Seitenlängen von ca. 315 x 315 x 400 mm. In dem Acrylglaskasten sind Abstandshalter für das Auflegen des Lochblechs angebracht. Das Lochblech ist dadurch 20 mm über den Kastenboden angebracht. Abbildung 29 zeigt den Boden des Acrylglaskastens, in dem sich 9 Bohrungen mit einem Durchmesser von 4 mm befinden. Die Bohrungen können mit Stopfen verschlossen werden, womit bei Bedarf ein kontrollierter Abfluss der Flüssigkeit aus dem Kasten gesteuert werden kann. Versuche, einen homogenen Abfluss zu erzeugen, ergaben ein optimales Ergebnis bei gleichzeitigem Ziehen der Stopfen 1, 3, 7 und 9. Als Auffangbecken für die abgelassene Flüssigkeit aus dem Acrylglaskasten dient ein Glaskasten, auf dem der Acrylglasbehälter mit zwei horizontalen Streben aufgesetzt wird.

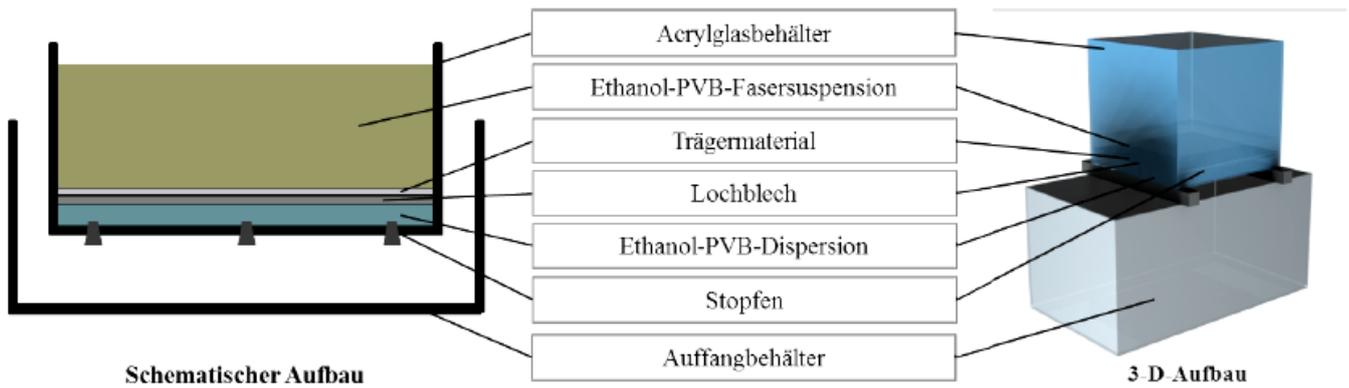


Abbildung 28: Aufbau der Beschichtungsvorrichtung für die Kohlenstofffasern

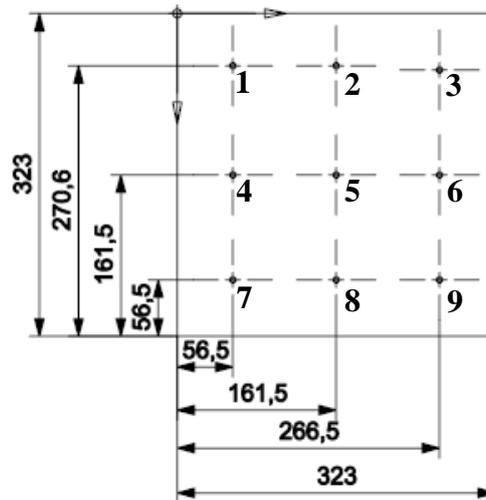


Abbildung 29: Verteilung der Bohrungen im Acrylkasten der Beschichtungsvorrichtung

Das Beschichtungsverfahren beginnt mit dem Einlegen des jeweiligen Trägermaterials (300 x 300 mm). Um ein Aufschwämmen des Trägermaterials zu verhindern, wird es an den äußeren Rändern mit Klebeband am Lochblech befestigt. Die Spalte zwischen Lochblech und Acrylglasbehälter werden ebenfalls mit Klebeband versiegelt, um ein seitliches Abfließen der Ethanol-PVB-Fasersuspensionen zu vermeiden. Die Ethanol-PVB-Fasersuspensionen können nicht direkt auf das trockene Trägermaterial gegossen werden, da sich dabei keine homogene Verteilung der Füllstoffe auf dem Trägermaterial einstellen würde, deshalb wird der Acrylglasbehälter bis mindestens 3 cm über dem Lochblech mit einer reinen PVB-Ethanol-Lösung gefüllt. Erst jetzt wird die PVB-Ethanol-Fasersuspension der restlichen Lösung zugegeben. Um ein erstes Ablegen der Fasern auf dem Material zu ermöglichen, wird die Lösung erst nach 5 Minuten abgelassen. Die beschichteten Trägermaterialien werden mit dem Lochblech aus dem

Acrylglaskasten entnommen. Daraufhin wird das Trägermaterial vorsichtig vom Lochblech gelöst und bei Raumtemperatur getrocknet.

Die Ergebnisse der hergestellten Impedanzschichten sind in Tabelle 7 dargestellt. Aussagen über das genaue Flächengewicht der Fasern können bei einem Vergleich der Gewichtsänderung vor und nach dem Beschichtungsverfahren mit einer gewissen Unsicherheit verbunden sein, da das Gewicht des PVBs und des Fasermaterials nicht getrennt voneinander betrachtet werden.

Tabelle 7: Versuchsübersicht über die Impedanzschichten mit PAN- und Pech-Fasern

Probe	Fasertyp	Flächengewicht [g/m²]	Trägermaterial	Δ Gewicht [g]
PANFc_0,6_1	PANFc	0,6	Glasvlies	0,11
PANFc_0,6_2	PANFc	0,6	Glasvlies	0,09
PANFc_0,6_3	PANFc	0,6	Glasvlies	0,20
PANFc_1,25_1	PANFc	1,25	Glasvlies	0,39
PANFc_2,5_1	PANFc	2,5	Glasvlies	0,59
PANFc_5_1	PANFc	5	Glasvlies	0,83
PANFc_10_1	PANFc	10	Glasvlies	1,41
PANFc_10_2	PANFc	10	Glasvlies	1,18
PiFc_2,5_1	PiFc	2,5	Glasvlies	0,35
PiFc_5_1	PiFc	5	Glasvlies	0,68
PiFc_5_2	PiFc	5	Glasvlies	0,63
PiFc_5_3	PiFc	5	Glasvlies	0,47
PiFc_10_1	PiFc	10	Glasvlies	0,88
PiFc_10_2	PiFc	10	Glasvlies	0,89
PANFm_10_1	PANFm	10	Glasgewebe	0,21
PiFm_10_1	PiFm	10	Glasgewebe	0,34

6.2.2 Herstellung der *Carbon Black* basierten Impedanzschichten

Bei der Herstellung einer Impedanzschicht mit *Carbon Black* wird die Füllstoffmenge, wie in Kapitel 3.4 beschrieben, durch die Konzentration des Füllstoffes in der Suspension definiert. Grund dafür ist die nanoskalige Partikelgröße, durch die nicht alle Partikel aus der Suspension gefiltert werden können. Dafür wird zunächst eine Suspension mit einer

hohen Konzentration an *Carbon Black* 10 wt.% hergestellt und anschließend auf die gewünschten niedrigeren Konzentrationen verdünnt.

Zur Herstellung der Suspension wird eine Vertikalmühle am Institut für Partikeltechnik (IPat) der Technischen Universität Braunschweig genutzt. Die genutzte Mühle ist eine Eigenanfertigung des IPat, die speziell auf die Verarbeitung von chemischen Stoffen abgestimmt ist. In der Vertikalmühle können die Füllstoffe in einem Batch-Prozess bis auf Nanogröße zerkleinert werden. Dabei werden die Füllstoffe und die jeweilige Lösung zusammen mit den Mahlkörpern in einen gekühlten Mahlbehälter gegeben. Durch ein vertikal rotierendes Rührwerk werden die Mahlkörper in Bewegung gehalten und bringen somit Scherkräfte in das Fluid, die den Füllstoff in der Lösung dispergieren.

Die Verarbeitung in der Vertikalmühle beginnt mit dem Füllen des Mahlbehälters mit 525 g der vorbereiteten PVB-Ethanol-Lösung (2 wt.% PVB) und 2093 g Mahlkörper¹⁵. Bei rotierender Vertikalmühle (1000 rpm) werden 58,3 g (ca. 10 wt.%) *Carbon Black* hinzugegeben. Der Mahlprozess dauert 60 Minuten. Im Anschluss werden die Mahlkörper mittels eines Faltsiebs (Maschenweite 130 µm) aus der Suspension gefiltert. Eine Probe der getrockneten Suspension ist für die Bestimmung der resultierenden Partikelgröße des *Carbon Black* gesputtert und in einem Rasterelektronenmikroskop (REM) untersucht worden (Abbildung 30). Aufgrund des hohen Anteils von PVB kann die Partikelgröße nicht eindeutig bestimmt werden. Die Aufnahmen lassen eine Partikelgröße von ungefähr 100 nm vermuten.

¹⁵ Sigmund Lindner (SiLi): Silibeads ZT 05

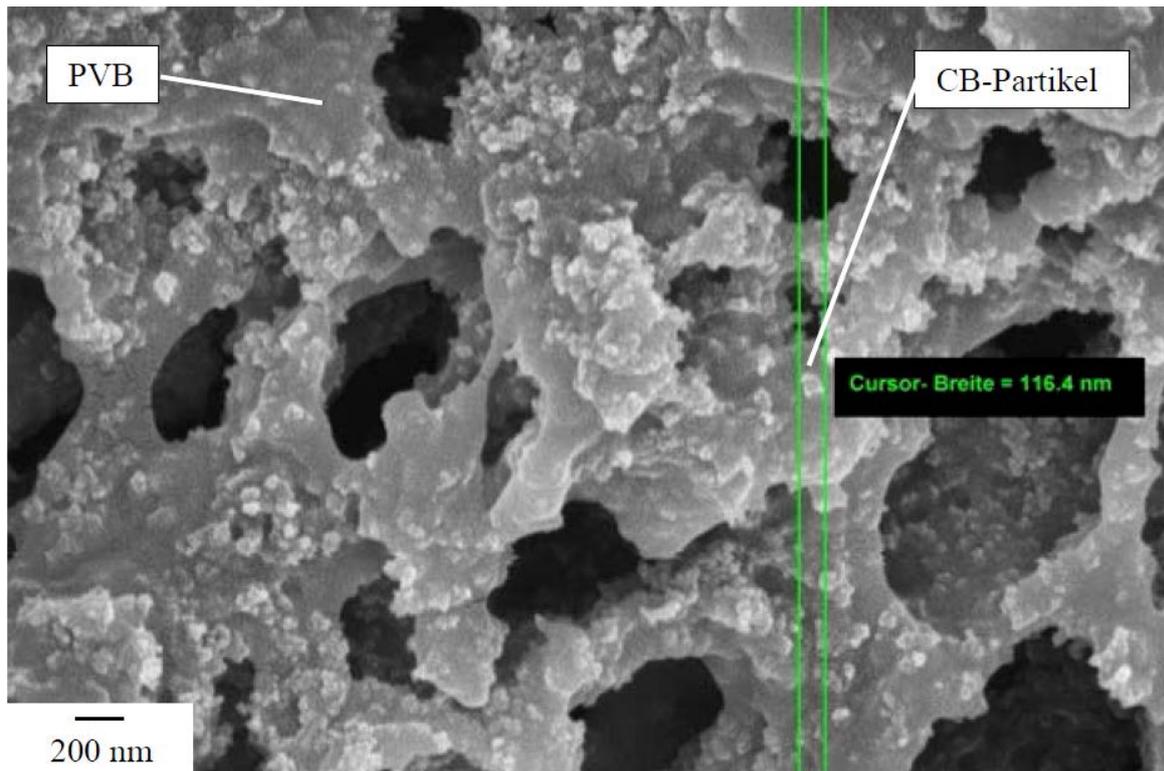


Abbildung 30: Carbon Black-PVB-Ethanol Suspension unter dem REM

Die Variation des Füllstoffgehaltes erfolgt durch Verdünnen der Suspension mit 10 wt.% an *Carbon Black* mit der reinen PVB-Ethanol-Lösung. Der Gewichtsanteil des *Carbon Blacks* wird so auf 5 wt.% bzw. 2,5 wt.% gesenkt.

Für das Tauschichtverfahren wird die *Carbon Black*-Ethanol-PVB-Suspension in einen offenen Behälter gegeben. Manuell werden die Glasgewebe (300 x 300 mm) in die Suspension getaucht und langsam wieder herausgezogen. Das Verfahren ist in Abbildung 31 dargestellt. Zum Trocknen werden die beschichteten Gewebe im Anschluss auf ein Labortuch gelegt. Die mit dem Tauchbeschichtungsverfahren hergestellten Impedanzschichten sind in Tabelle 8 abgebildet.

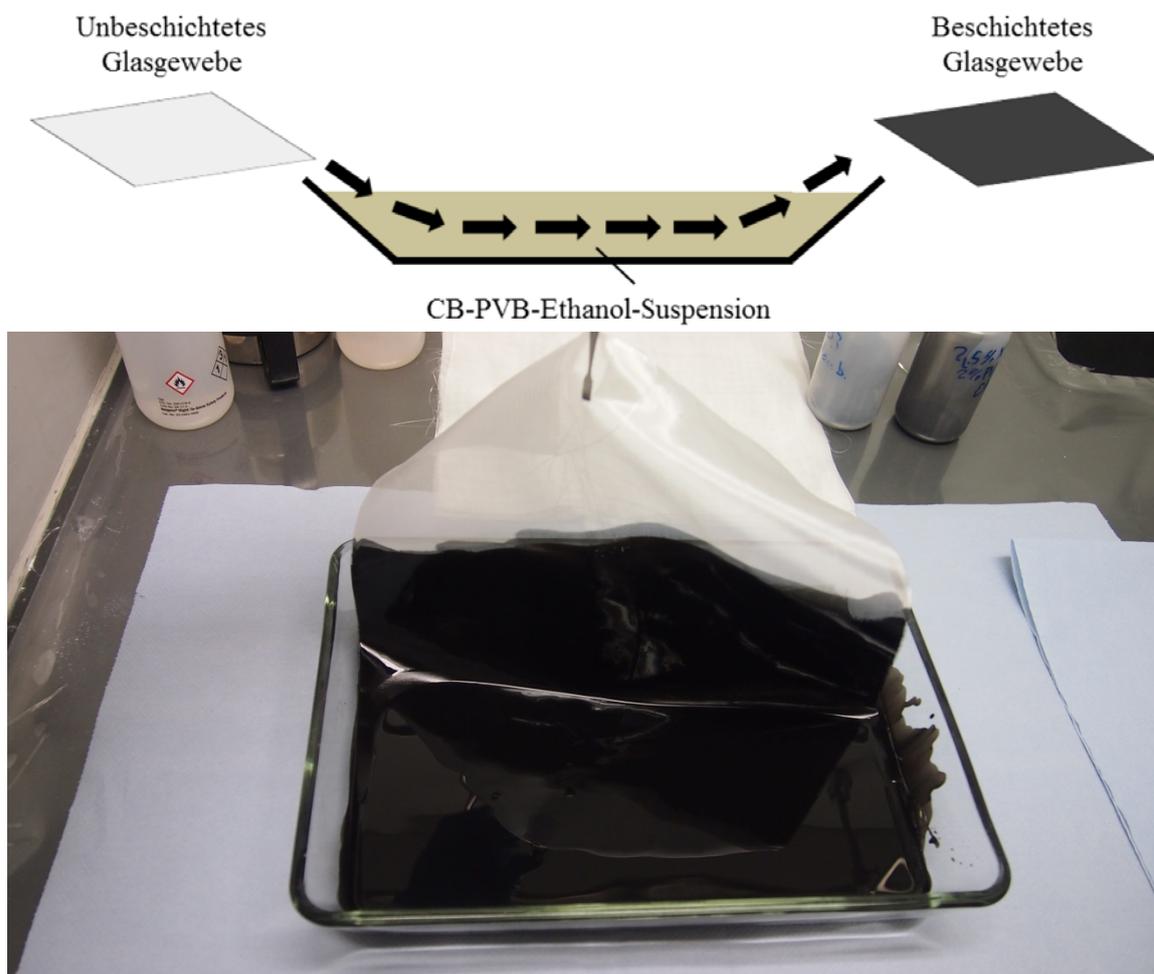


Abbildung 31: Das Tauchbeschichtungsverfahren für CB (oben – Prinzipskizze, unten – Foto des Verfahrens)

Tabelle 8: Versuchsübersicht über die Impedanzschichten (300 x 300 mm) mit CB

Probe	CB in Suspension [wt.%]	Trägermaterial	Δ Gewicht [g]
CB_2,5_1	2,5	Glasgewebe	0,15
CB_5_1	5	Glasgewebe	0,20
CB_10_1	10	Glasgewebe	0,26
CB_10_2	10	Glasgewebe	0,29

6.2.3 Zwischenbewertung der Herstellungsmethoden und Fasermaterialien

Die während der Herstellung der Impedanzschichten gewonnenen Erkenntnisse erlauben eine erste Bewertung der Füllstoffmaterialien.

Die Beschichtung der Glasgewebe mit gemahlenden PAN- und Pech-Fasern hat zu mangelhaften Ergebnissen geführt. Die Gewichts­differenz des Gewebes vor und nach dem Beschichtungsprozess liegt weit unter dem aufzutragenden Flächengewicht. In Abbildung 32 ist exemplarisch ein beschichtetes Gewebe abgebildet. Gut zu sehen ist die inhomogene Verteilung der Fasern auf dem Gewebe. Selbst bei extrem niedrigen Abflussgeschwindigkeiten der Suspension konnten die gemahlenden Kurzfasern nicht am Trägermaterial fixiert werden. Der Grund liegt in der zu großen Maschenweite des genutzten Glasgewebes im Verhältnis zu den Faserlängen. Aus diesem Grund werden die gemahlenden Fasern nicht weiter geprüft und innerhalb dieser Arbeit aussortiert.



**Abbildung 32: Foto eines mit gemahlenden Kurzfasern beschichteten Glasgewebes
(Probe PANFm_10_1)**

Bei geschnittenen Fasern hat sich das Beschichtungsverfahren insofern bewährt, als dass die beschichteten Vliese die Fasermaterialien annähernd vollständig aus der Suspension filtern können. Die optische Beurteilung der Verteilung der Fasern auf dem Vlies zeigt eine homogene Verteilung (Abbildung 33). Der Vergleich zwischen PAN-Fasern und Pech-Fasern hinsichtlich ihrer Verarbeitungsgüte zeigt Defizite bei der Verarbeitung der Pech-Fasern. Das liegt vor allem an deren schnellem Faserbruch. Dadurch besteht die Vermutung, dass sehr stark zerstörte Pech-Fasern während des Beschichtungs­vorgangs nicht mehr vom Trägerstoff gefiltert werden können und somit geringere Massenanteile auf dem Trägerstoff zurückbleiben.

Die Tatsache, dass es zwischen den Proben gleichen Flächengewichts und Fasermaterials eine unterschiedliche Gewichts Differenz durch den Beschichtungsprozess gibt, zeigt, dass mit dem Papierschöpfverfahren kein optimal reproduzierbares Ergebnis möglich ist. Zurückzuführen ist der Unterschied unter anderem auf das Fasermaterial, welches auf Klebestreifen und Seitenwänden des Acrylglasbehälters zurückbleibt.

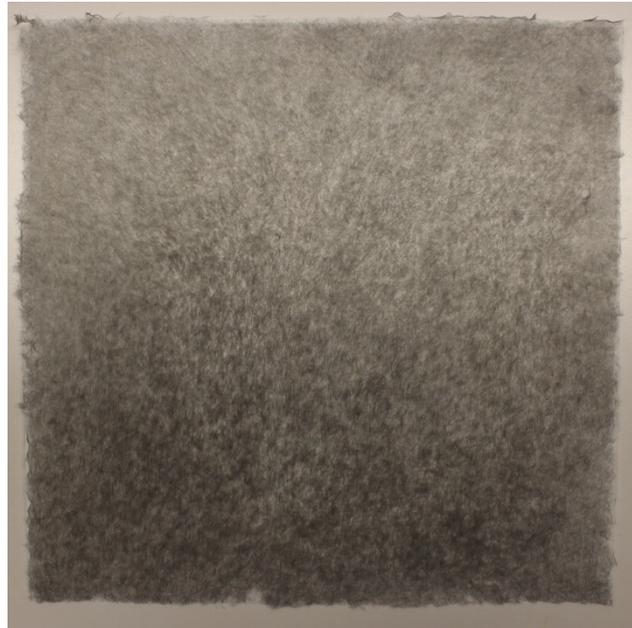


Abbildung 33: Foto eines mit 5g/m² geschnittenen PAN-Faser beschichteten Vlieses

Das Tauchbeschichtungsverfahren ist in seiner Durchführung sehr einfach zu handhaben. Jedoch ist ohne einen apparativen Aufwand keine reproduzierbare Herausziehgeschwindigkeit möglich. Somit ist auch eine reproduzierbare Schichtdicke unwahrscheinlich. Je größer der *Carbon Black*-Anteil in der Suspension ist, desto höher ist auch das aufgetragene Gewicht der Beschichtung. Grundsätzlich sind die aufgetragenen Mengen jedoch sehr gering.

6.3 Herstellung der GFK-Platten

Die elektromagnetischen und mechanischen Messversuche werden an GFK-Platten durchgeführt. Die Fertigung der Platten ist an das vakuumunterstützte Harzinfusionsverfahren (VAP®) von EADS angelehnt [20]. Neben den bei der

Faserherstellung eingesetzten Materialien kommt ein biaxiales Glasfasergelege¹⁶ und ein entsprechendes epoxidbasiertes Matrixsystem¹⁷ zum Einsatz.

Das Faserhalbzeug wird an einem Cutter¹⁸ vorgeschritten. Die Ausrichtung der 300-mal-300-mm-Quadrate wurde so gewählt, dass sie als 0°/90°-Lagen und +45°/-45°-Lagen eingesetzt werden können.

Die Preform wird bedingt durch die verschiedenen Impedanzschichten und Prüfvorhaben leicht variiert. Der Aufbau für das VAP®-Verfahren ist in Abbildung 34 skizziert. Bei dieser Art des Aufbaus wird in der Mitte der Platte ein Vakuum angelegt (Vakuumstutzen). Dieses ist durch eine Bohrung (ca. 4 mm) im Deckblech möglich. Der Anguss erfolgt ringförmig um die Preform und besteht aus Stahlspiralschläuchen, die mit einem Silikonkanal verkleidet werden, um die Vakuumfolie vor Beschädigungen zu schützen. Durch diesen Ringanguss kann das Harz von allen Seiten durch die Preform in Richtung der mittigen Absaugung strömen. Gefördert wird das Fließverhalten zudem durch die Fließhilfe, die unter dem Lagenpaket auf der Grundplatte platziert wird. Die für das Harz nicht passierbare VAP®-Folie¹⁹ und der zweite und dritte Siegelring von außen verhindern ein Ansaugen des Epoxidharzes während der Infusion. Um ein großflächigeres Ansaugen durch den Vakuumstutzen zu ermöglichen, wird zwischen VAP®-Folie und Ansaugstutzen ein Stück Fließhilfe und ein Lochblech platziert. Das Saugvlies zwischen der VAP®-Folie und dem Deckblech ermöglicht es, auch nach Eintreffen der ersten Fließfront an der Bohrung des Deckbleches, weitere Fließfronten anzusaugen und somit Lufteinschlüsse in der Preform zu vermeiden. Der erste und vierte Siegelring schließen in Verbindung mit der Vakuumfolie den Aufbau nach außen hin luftdicht ab. Die Grundplatte und das Deckblech werden vorab mit einem Trennmittel²⁰ eingetrennt, um das spätere Ablösen des Harzsystems zu erleichtern. Die Preform wird zwischen zwei Abreißgeweben platziert, um die Oberflächengüte der Platte zu verbessern.

¹⁶ Saertex: Biax 1212 g/m²

¹⁷ Dow Airstone: 880E + 886H bzw. Epikote: MGS RIMR 035C + RIMRH 038

¹⁸ Zünd Systemtechnik AG: G3 Digital Cutter

¹⁹ Composyst: Membranlaminat CS/E

²⁰ Chem Trend: Mono-Coat ® E255

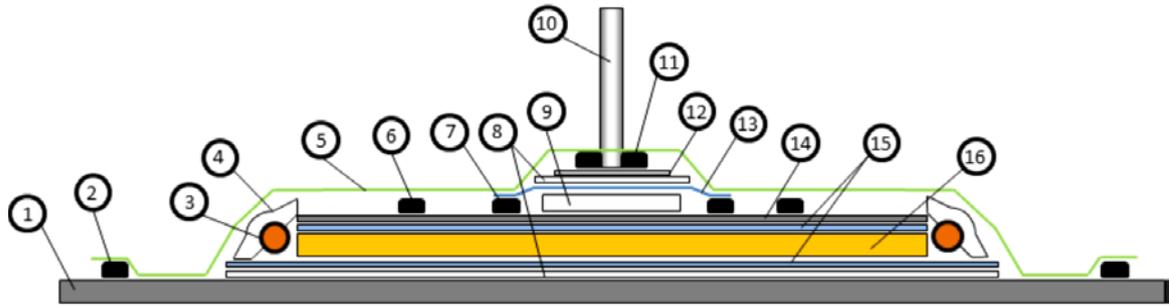


Abbildung 34: Aufbau eines VAP®-Infusionsverfahrens. Legende: 1 – Grundplatte, 2 – 1. Siegelring, 3 – Umlaufende Stahlspirale, 4- Umlaufender Silikonkanal, 5 – Vakuumfolie, 6 – 2. Siegelring, 7 – 3. Siegeling, 8 – Fließhilfe, 9- Saugvlies, 10 – Vakuumputzen, 11 – 4. Siegelring, 12 – Lochblech, 13 – VAP®- Folie, 14 – Deckblech, 15 – Abreißgewebe, 16 – Preform

Nachdem der Aufbau fertiggestellt ist (Abbildung 35), wird er an eine Vakuumpumpe angeschlossen und ein Unterdruck von mindestens 0,7 mbar im Aufbau erzeugt. Das Anmischen des Harzsystems geschieht unter Berücksichtigung des stöchiometrischen Harz-Härter-Verhältnisses. Die Entgasung erfolgt in einem Exsikkator. Der Entgasungsprozess dauert 10 Minuten und muss bei einem Unterdruck von mindestens 1 mbar und unter ständigem Umrühren mit einem Magnetrührer (ca. 400 rpm) durchgeführt werden. Die Infusion des Harzsystems in den Aufbau dauert 60 Minuten.

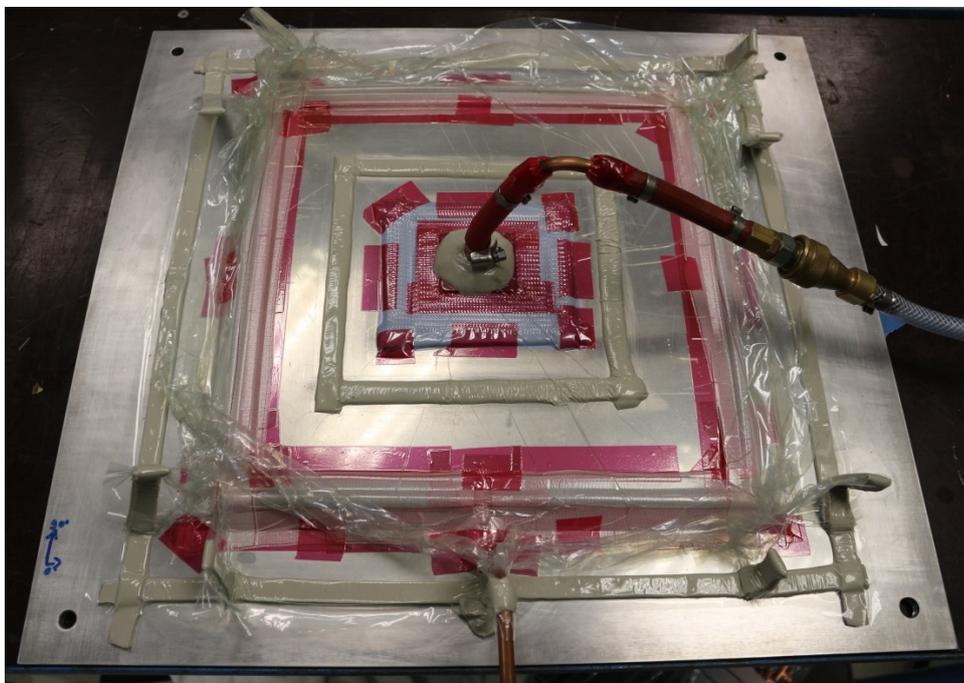


Abbildung 35: Foto: Aufbaus eines VAP®-Infusionsverfahrens vor der Harzinfusion

Das Aushärten des Harzsystems erfolgt 5 Stunden in einem Ofen bei aufrechterhaltenem Vakuum und 80 °C. Danach werden die Platten langsam auf Raumtemperatur abgekühlt und anschließend entformt. Die Platten werden in einem letzten Schritt umlaufend besäumt, um die überstehenden Harzreste des Angusses zu entfernen.

In der Arbeit werden drei verschiedene Lagenaufbauten verwendet. So besitzen die GFK-Platten mit einer Dicke von ca. 5 mm immer einen identischen Lagenaufbau. Nach dem *laminare orientation code* [41] sind sie symmetrisch aus einem (-45/+45/-45/+45//0/90)s-Laminat aufgebaut. Wird die GFK-Platte mit einer Impedanzschicht gefertigt, ist diese in der Symmetrieebene in den Aufbau eingefügt worden. Die ca. 10 mm dicke GFK-Platte ist um zwei biaxiale Glasfaserschichten auf jeder Seite ergänzt und hat damit einen (90/0/90/0/-45/+45/-45/+45//0/90)s-Aufbau. Die Platte für die Schubproben weicht in ihren Abmaßen und in ihrem Aufbau von den restlichen Platten ab. Durch die in der DIN EN ISO 14129 spezifizierten Anforderungen wird ein (+45/-45/+45/45)s-Lagenaufbau gewählt. In die 600-mal-600-mm-Platte werden in der Symmetrieebene drei verschiedene 300-mal-300-Impedanzschichten nebeneinander platziert, um alle zu testenden Impedanzschichten und die Referenzprobe ohne Impedanzschicht in einer GFK-Platte zu fertigen.

Tabelle 9 zeigt die Eigenschaften der gefertigten GFK-Platten. Die Qualitätskontrolle wird durch eine Messung der Plattendicke durchgeführt, wodurch der Faservolumengehalt (FVG) zurückgerechnet werden kann.

Tabelle 9: Übersicht über die gefertigten GFK-Probplatten

GFK-Platte	Impedanzschicht	Plattendicke [mm]	FVG [%]	Maße [mm]
10mm_GFK-1	---	10,22±0,05	55,82±0,28	300 x 300
5mm_GFK-1	---	5,26±0,05	54,27±0,51	300 x 300
PANFc_0,6-GFK-1	PANFc_0,6_1	5,51±0,05	52,20±0,47	300 x 300
PANFc_1,25-GFK-1	PANFc_1,25_1	5,39±0,04	53,14±0,38	300 x 300
PANFc_2,5-GFK-1	PANFc_2,5_1	5,51±0,05	52,20±0,47	300 x 300
PANFc_5-GFK-1	PANFc_5_1	5,47±0,06	52,10±0,51	300 x 300
PANFc_10-GFK-1	PANFc_10_1	5,96±0,29	50,47±2,30	300 x 300
PiFc_2,5-GFK-1	PiFc_2,5_1	5,34±0,04	53,56±0,44	300 x 300

PiFc_5-GFK-1	PiFc_5_1	6,03±0,15	47,59±1,14	300 x 300
PiFc_10-GFK-1	PiFc_10_1	5,39±0,03	53,19±0,34	300 x 300
CB_10-GFK-1	CB_10_1	5,30±0,04	54,31±0,46	300 x 300
Schub-GFK-1	PANFc_10_2	3,77±0,44	51,47±3,79	600 x 600
	PiFc_10_1			
	CB_10_1			

Als Zielwert für den FVG ist ein Wert zwischen 50 % und 55 % angestrebt. Bis auf die 10 mm dicke GFK-Platte und die Platte mit der integrierten Impedanzschicht von 5 g/m² geschnittener Pech-Faser wurden die Werte eingehalten. Zusätzlich werden bei den GFK-Proben für die Hohlleitermessungen zwei Schnittproben an unterschiedlichen Positionen am Rand der besäumten GFK-Platten entnommen. Diese werden unter dem Mikroskop hinsichtlich der Lage der Impedanzschicht untersucht. Die Auswertung²¹ zeigt eine hohe Varianz der Schichtdicken über alle Proben, wodurch die Impedanzschicht nicht immer optimal in der Symmetrieebene der Platte platziert ist und innerhalb einer GFK-Platte stark schwankt. In Abbildung 36 ist exemplarisch ein Schnittbild unter dem Lichtmikroskop zu sehen.

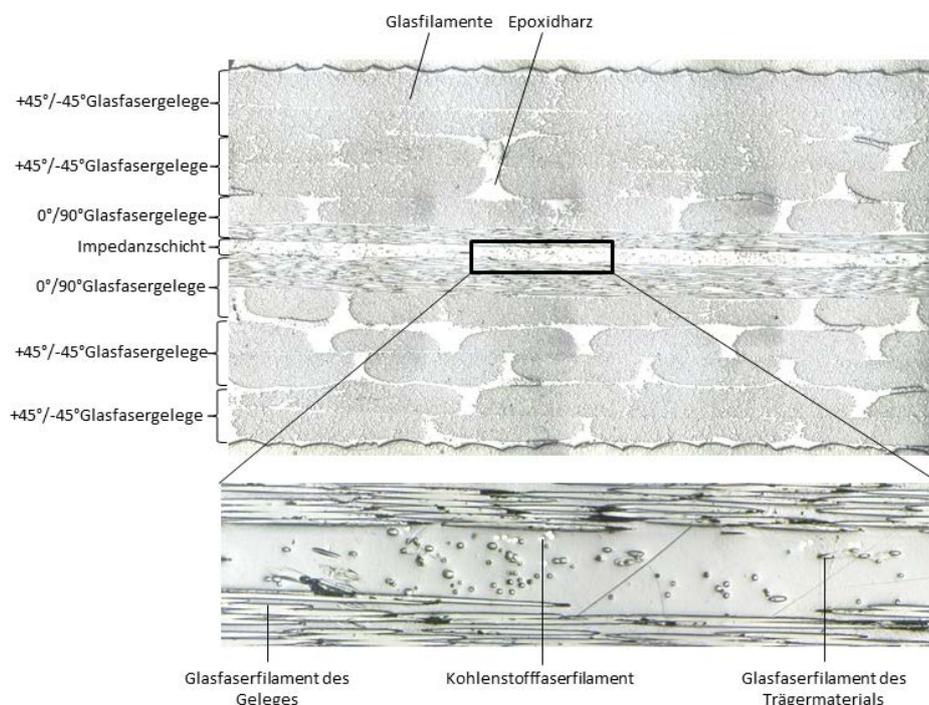


Abbildung 36: Schnittbild einer GFK-Platte mit integrierter Impedanzschicht (oben) und eines vergrößerten Ausschnitts der die Impedanzschicht (5 g/m² geschnittene Pech-Faser) zeigt (unten).

²¹ Im Anhang: Tabelle 13

6.4 Elektromagnetische Charakterisierung der Absorberschichten

In diesem Kapitel werden die gefertigten GFK-Platten elektromagnetisch vermessen und daraus mithilfe der Simulationsmodelle aus Kapitel 5 die elektromagnetischen Materialparameter berechnet.

6.4.1 Versuchsaufbau und Probekörper

Die elektromagnetische Charakterisierung der Platten erfolgt in einem Hohlleiterversuch. Die Versuche wurden in Zusammenarbeit mit dem Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme, Aufklärung und Sicherheit des DLR in Oberpfaffenhofen durchgeführt.

Der Hohlleiter erzeugt eine TE_{10} -Welle. Der Messaufbau besteht aus einem *Vektor Network Analyzer*, der mittels Koaxialkabel an einen WR-284 Hohlleiter mit den inneren Abmessungen 72,14 x 34,04 mm angeschlossen ist. Es werden abwechselnd von beiden Seiten Wellen in den Hohlleiter induziert. Zwischen dem Senden der Wellen werden beide Seiten als Empfänger genutzt. Ein WR-284 Hohlleiter hat eine Cut-off-Frequenz für TE_{10} -Wellen von 2,07 GHz. Der im Messversuch abgetastete Frequenzbereich zwischen 2,6 und 4,0 GHz orientiert sich an dem für TE_{10} -Wellen möglichen Frequenzband eines WR-284 Hohlleiters. Er überschreitet dabei den für das Projekt notwendigen Frequenzbereich von 2,7 bis 3,4 GHz. Die Messstrecke des Hohlleiters ist in Abbildung 37 zu sehen. Die Probekörper für die Materialcharakterisierung werden auf der Eingangsseite (Port 1) der Messstrecke platziert. Die Messstrecke ist 25 mm lang und muss wie in Kapitel 5 erläutert mit einbezogen werden. Der Messplatz wird vor dem Beginn der Messung mit einer TRL/LRL-Methode kalibriert.[46]

Gemessen wurden jeweils zwei Proben aus jeder GFK-Platte. In Tabelle 10 werden die einzelnen Messproben und die für die Simulation benötigten Dimensionen aufgelistet. Zusätzlich wurden zwei Probekörper der 10 mm dicken GFK-Platte von der Firma Bergolin mit einem für Rotorblätter typischen Lack-System²² beschichtet und vermessen.

²² Bergolin: Steodur PUR Rollgelcoat 6D970-RA + Superplast Decklack 6D973

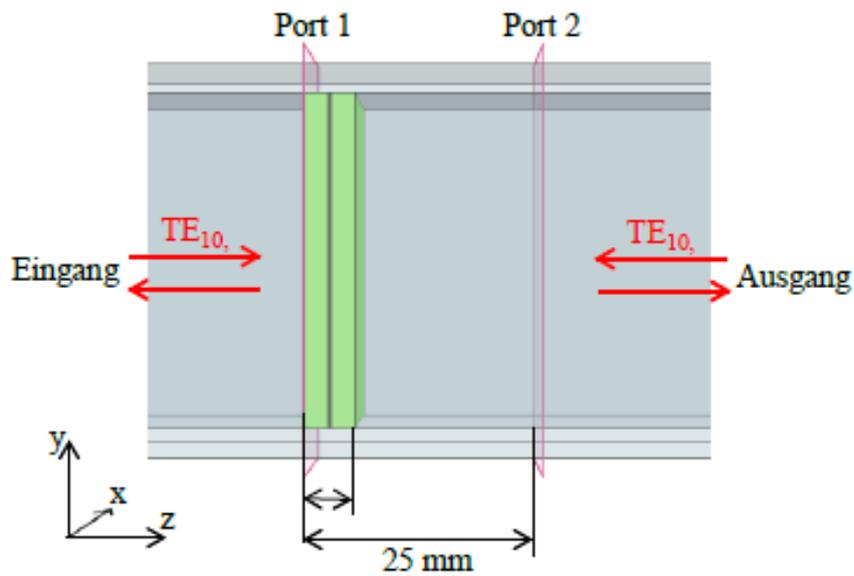
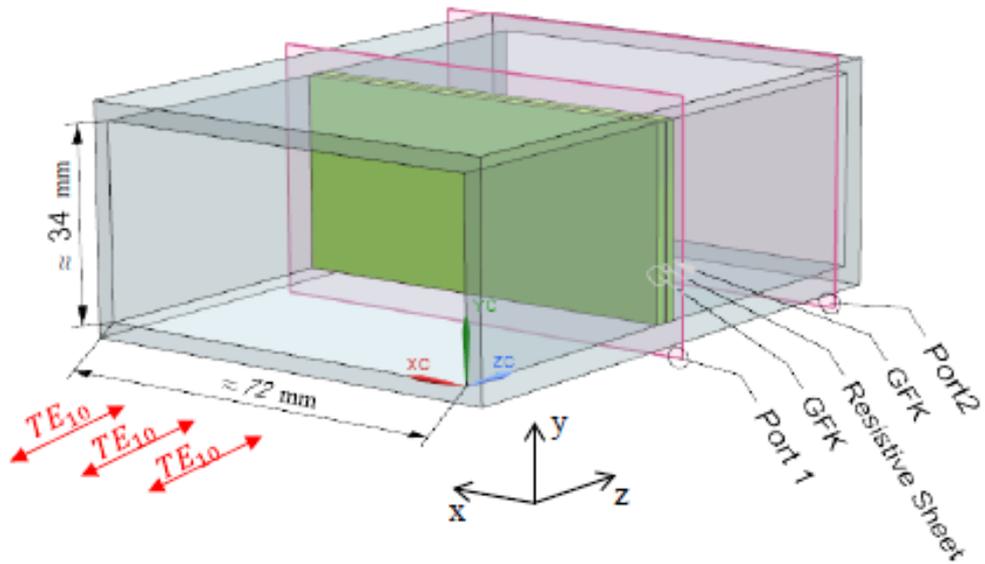


Abbildung 37: 3D-Ansicht des Hohlleiters (oben) und im Profil (unten)

Tabelle 10: Übersicht über die Hohlleitermessproben

GFK-Platte	Dicke Probe A	Dicke Probe B
	[mm]	[mm]
10mm_GFK-1	10,22	10,22
10mm_GFK+Lack	10,44	10,44
5mm_GFK-1	5,26	5,26
PANFc_0,6-GFK-1	5,32	5,34
PANFc_1,25-GFK-1	5,34	5,30

PANFc_2,5-GFK-1	5,48	5,50
PANFc_5-GFK-1	5,42	5,42
PANFc_10-GFK-1	5,50	5,48
PiFc_2,5-GFK-1	5,32	5,26
PiFc_5-GFK-1	5,96	6,16
PiFc_10-GFK-1	5,44	5,36
CB_10-GFK-1	5,28	5,24

6.4.2 Darstellung und Bewertung der Messergebnisse

Folgend werden die Messergebnisse der Hohlleiterversuche vorgestellt. Diese werden als Reflexions- und Einfügungsdämpfung in dB dargestellt. Die Dämpfungen werden aus den Einträgen der Streumatrix berechnet [39].

$$\text{Reflexionsdämpfung am Eingang} = 10 \log|S_{11}|^2 \quad (29)$$

$$\text{Einfügungsdämpfung vorwärts} = 10 \log|S_{21}|^2 \quad (30)$$

$$\text{Reflexionsdämpfung am Ausgang} = 10 \log|S_{22}|^2 \quad (31)$$

$$\text{Einfügungsdämpfung rückwärts} = 10 \log|S_{12}|^2 \quad (32)$$

Die Messergebnisse werden graphisch nur anhand der Reflexionsdämpfung am Eingang und der Einfügungsdämpfung vorwärts dargestellt, da es sich um annähernd symmetrische Proben handelt. Eine Ausnahme bildet der Vergleich der Lackschicht, jedoch ist auch dabei nur die Dämpfung am Eingang interessant, da davon ausgegangen wird, dass die EM-Welle von außen in das Laminat eindringt. Der relevante Frequenzbereich (2,7 – 3,4 GHz) ist in den Abbildungen durch vertikale Linien gekennzeichnet.

In Abbildung 38 ist der Vergleich einer nicht beschichteten 10 mm dicken GFK-Platte mit einer mit einem Lacksystem beschichteten GFK-Platte dargestellt. Die dünne Lackschicht besitzt nur einen geringen Einfluss auf das Dämpfungsverhalten, weshalb sie in den weiteren Überlegungen als vernachlässigbar eingestuft wird.

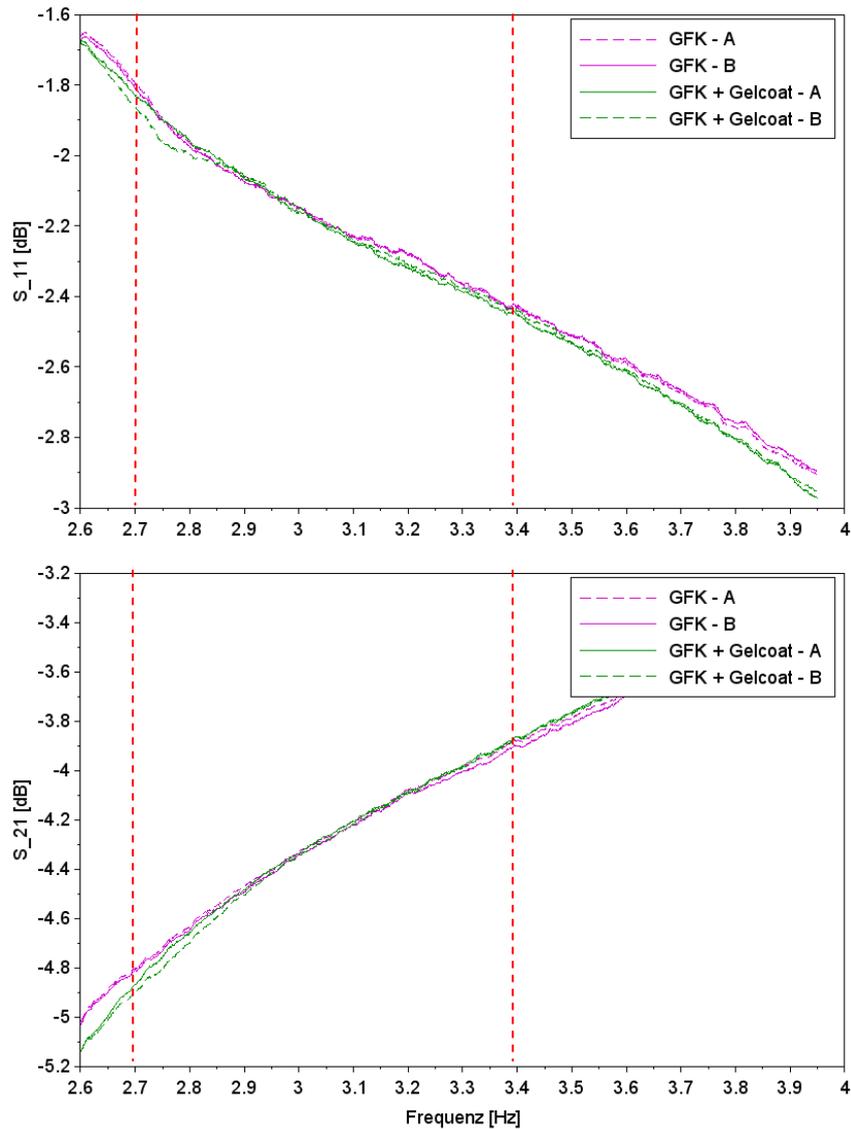


Abbildung 38: Vergleich des Lacksystems (*Gelcoat*), Reflexionsdämpfung am Eingang (oben), Einfügungsdämpfung (unten)

Die Ergebnisse der GFK-Platten mit einer Impedanzschicht werden getrennt nach Füllstoff-Materialien voneinander betrachtet. Als Referenz wurden jeweils die Ergebnisse der 5 mm dicken GFK-Proben ohne Impedanzschicht (o. M.) eingefügt.

Die vermessene GFK-Platte mit *Carbon Black* (10 wt.%) beschichteten Glasfasergewebe in Abbildung 39 zeigt kaum eine Abweichung von der reinen GFK-Platte. Die Vermutung liegt nahe, dass entweder die aufgetragene Schichtdicke zu gering ist oder die *Carbon Black*-Partikel während des Dispergierprozesses zu klein gemahlen werden (Kapitel 6.2.2). Aus diesem Grund werden keine weiteren Schichten mit geringerem

Carbon Black-Gehalt hergestellt und vermessen und es wird auch keine Berechnung des Materialparameters der Schicht durchgeführt.

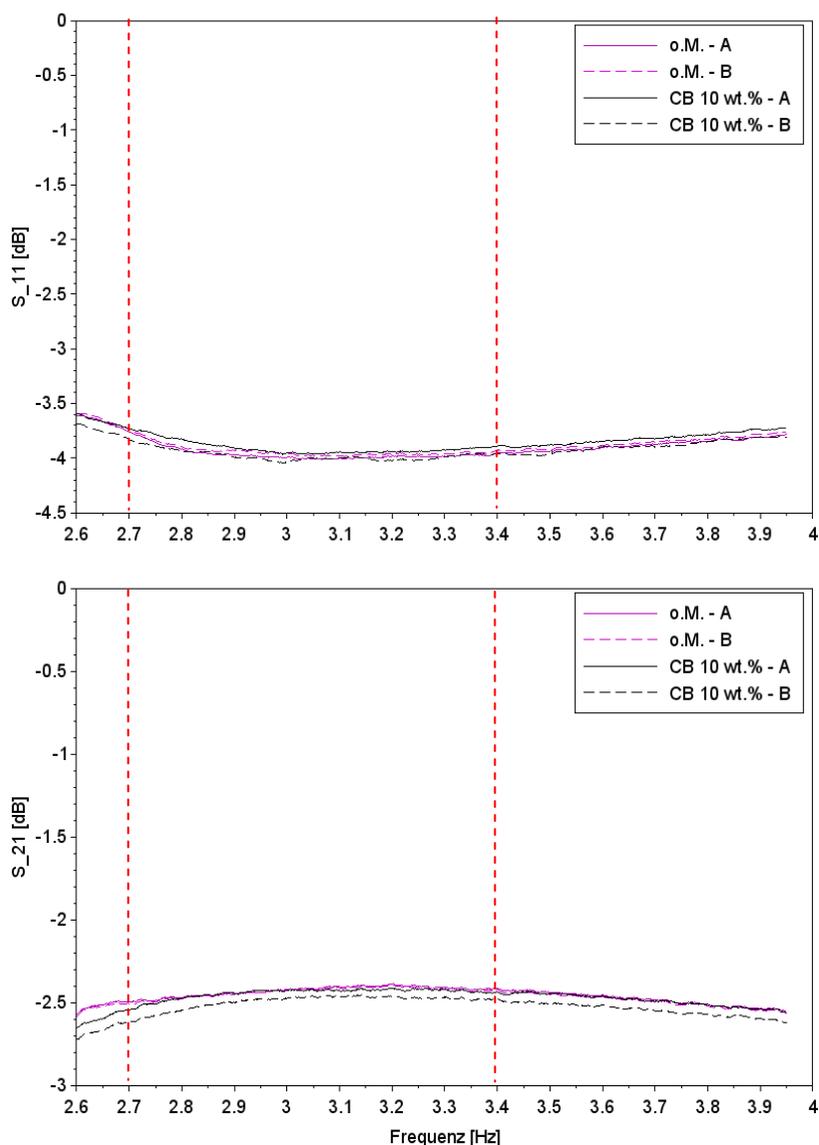


Abbildung 39: Carbon Black – Reflexionsdämpfung am Eingang (oben), Einfügungsdämpfung von links (unten)

In Abbildung 40 sind die Ergebnisse der Hohlleitermessungen der geschnittenen PAN-Fasern dargestellt. Der Einfluss des aufgetragenen Flächengewichtes ist deutlich zu sehen. Mit steigendem Flächengewicht sinkt im Betrag die Reflexionsdämpfung bei gleichzeitig steigenden Einfügungsdämpfungen. Nachteilig ist die zum Teil große Differenz zwischen den Proben einer Platte im Vergleich zum Referenz-GFK, bei dem die Messkurven der Proben aufeinanderliegen. Hier scheint es zu einer inhomogenen Verteilung des Fasermaterials auf dem Trägermaterial gekommen zu sein. Denkbar sind

auch mögliche Vorzugsrichtungen der Faserorientierung, die während des nicht vollständig homogenen Abflusses der Fasersuspension während des Beschichtungsprozesses entstanden sein können.

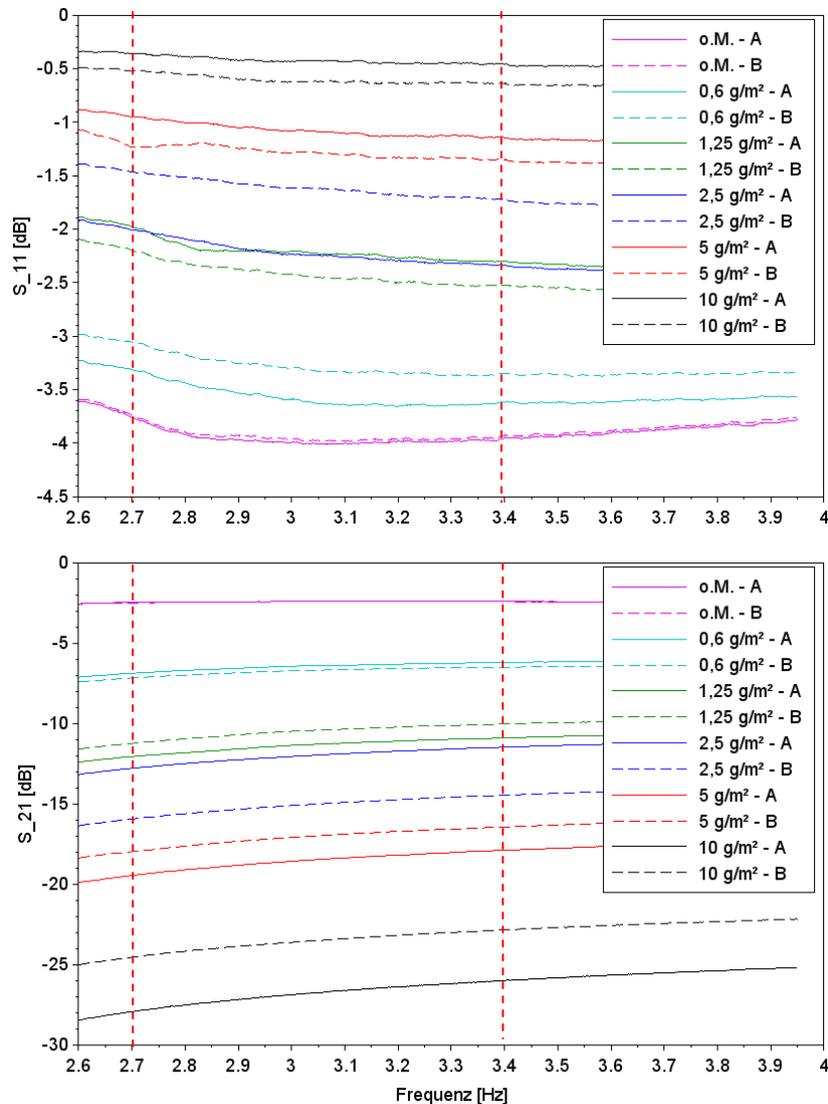


Abbildung 40: Geschnittene PAN-Fasern - Reflexionsdämpfung am Eingang (oben), Einfügungsdämpfung von links (unten)

Zuletzt sind die geschnittenen Pechfasern in Abbildung 41 abgebildet. Auch hier ist eine Differenzierung hinsichtlich des aufgebrachtten Flächengewichts zu sehen. Auffällig ist die große Abweichung der Einfügungsdämpfung zwischen den Proben der 5 g/m²-Schicht. Ein Grund könnte der niedrige FVG der Platte sein (Tabelle 9).

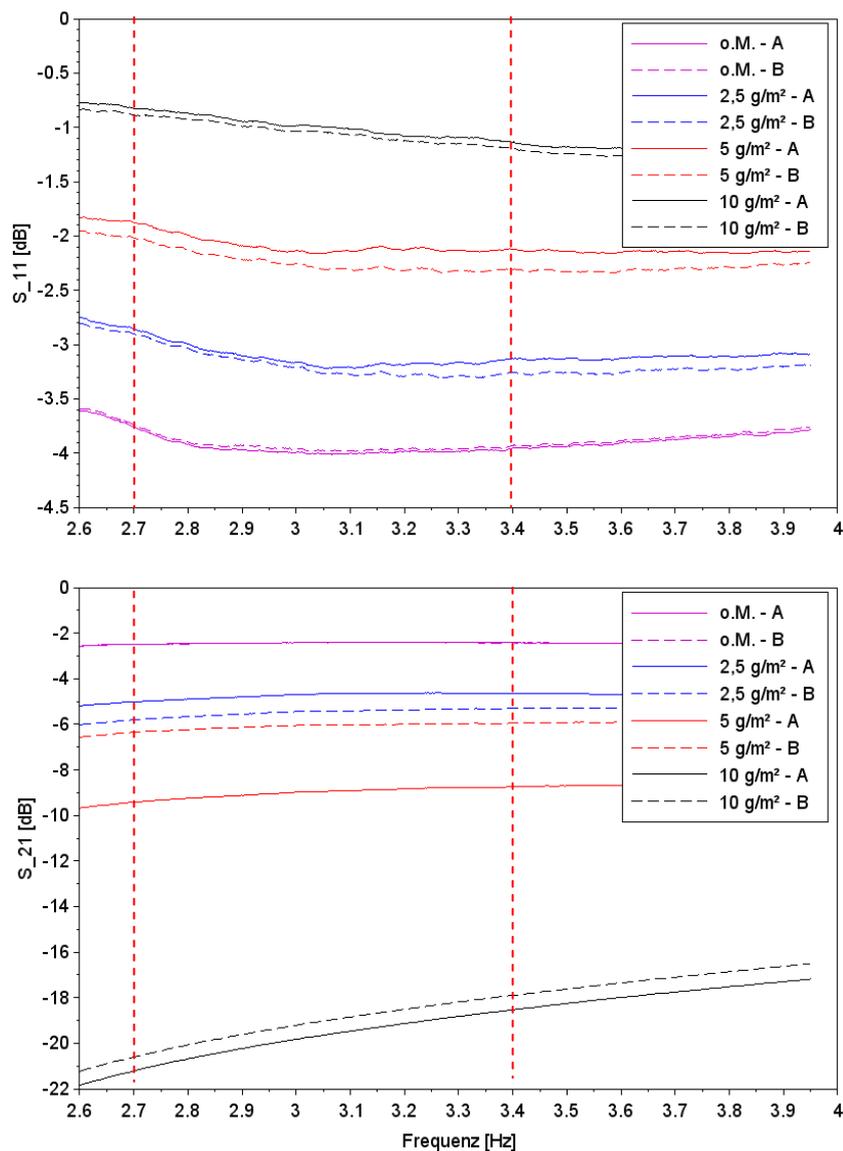


Abbildung 41: Geschnittene Pech-Fasern - Reflexionsdämpfung am Eingang (oben),
Einfügungsdämpfung von links (unten)

6.4.3 Darstellung und Bewertung der Materialparameter

Die in Kapitel 5.1 beschriebenen Modelle wurden für die Simulation der verschiedenen Proben (Tabelle 10) im Hohlleiterversuch benutzt, um die Materialparameter der Schichten zurückzurechnen. Notwendig für die Berechnungen der Impedanz der Impedanzschichten ist die relative Permittivität des GFKs. Dafür wurde das in Abbildung 11 – Kapitel 5.1 abgebildete Modell auf die Probekörper der nativen GFKs mit 5 mm und 10 mm Dicke angewendet. Die Ergebnisse und die gemittelte relative Permittivität sind in Abbildung 42 dargestellt.

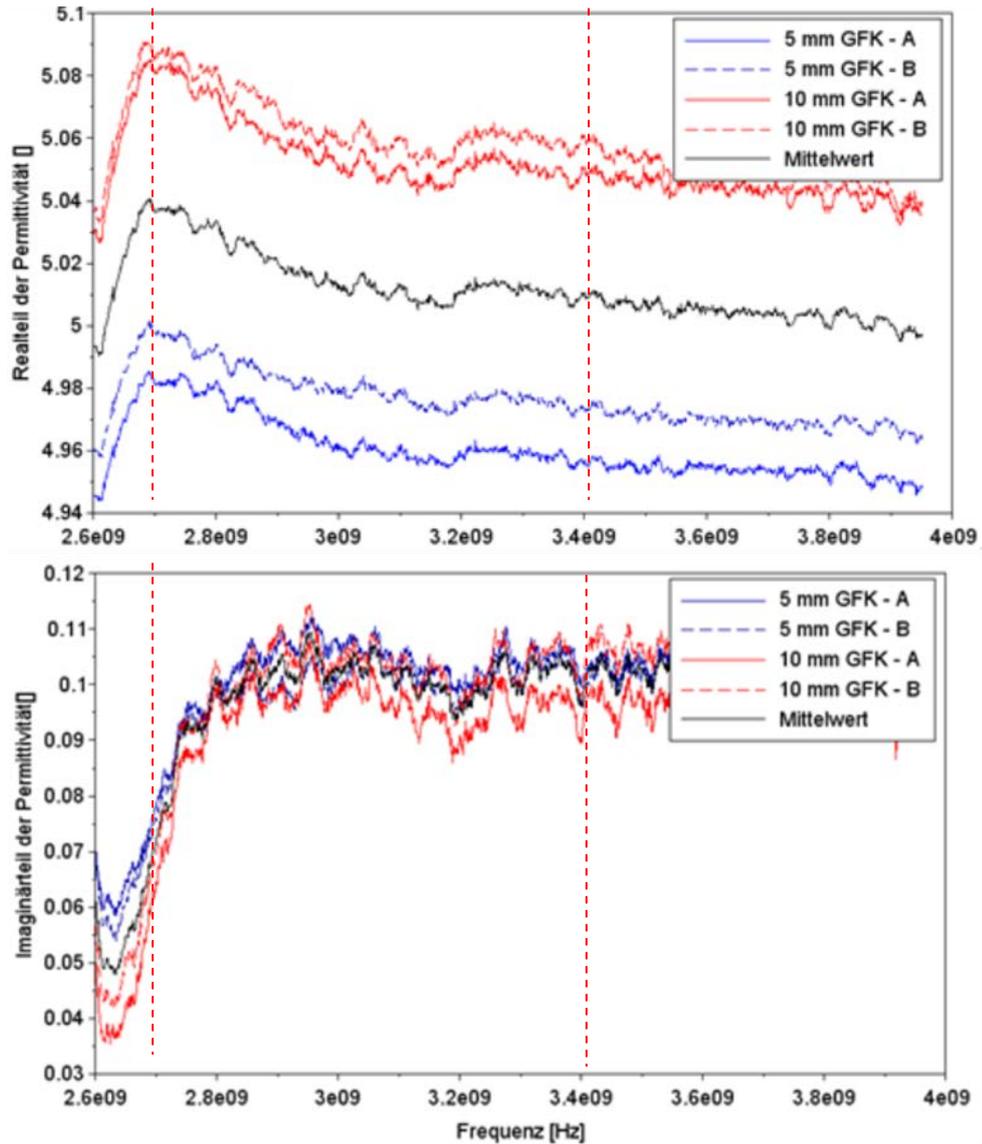


Abbildung 42: Relative Permittivität des GFK (oben – ϵ' , unten – ϵ'')

Auffällig ist die sprunghafte Erhöhung der Permittivität im unteren Frequenzbereich. Ein Grund dafür kann die in Kapitel 5.3 angesprochene gestiegene Permeabilität in diesem Bereich sein. Da sich der Sprung kaum auf den relevanten Frequenzbereich auswirkt, wird er als tolerierbar angesehen.

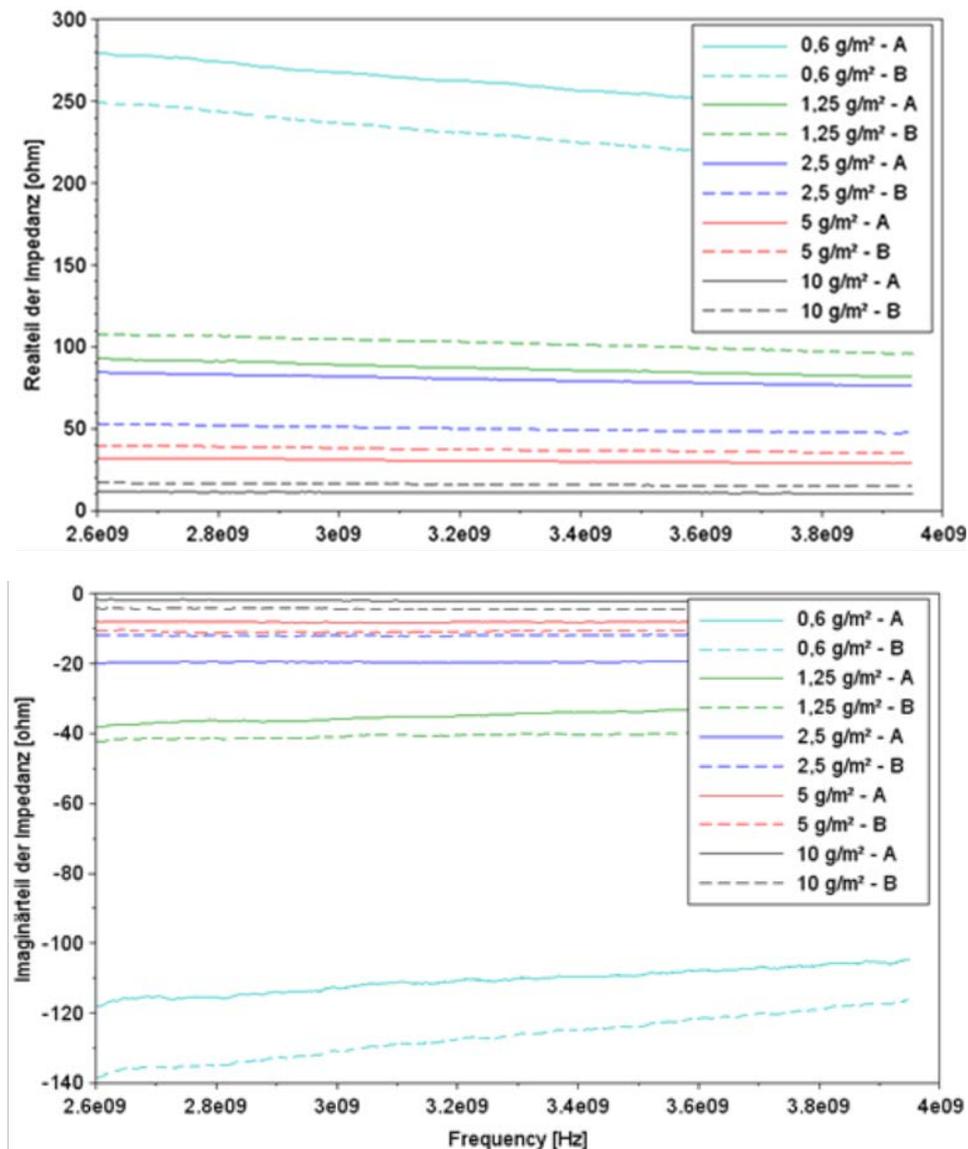


Abbildung 43: Impedanz der verschiedenen PAN-Faser-modifizierten Impedanzschichten (oben – $\Re(Z)$, unten – $\Im(Z)$)

Abbildung 43 und Abbildung 44 stellen jeweils die Impedanzen der Schichten in den modifizierten GFK-Proben dar. Auch hier können die unterschiedlichen Flächengewichte weitgehend voneinander abgegrenzt werden. Auffällig ist der große Unterschied zwischen Probe A und B mit geschnittenen Pech-Fasern und einem aufgetragenen Flächengewicht von 2,5 und 5g/m². Insgesamt sind die Abweichungen innerhalb einer Probekörperplatte bei den geschnittenen Pech-Fasern um einiges größer als bei den geschnittenen PAN-Fasern, was Zweifel an ihrer weiteren Verwendung aufwirft. Grund hierfür kann sein, dass die

integrierte Impedanzschicht nicht exakt an der angenommenen Position in der Symmetrieebene der Platte liegt.

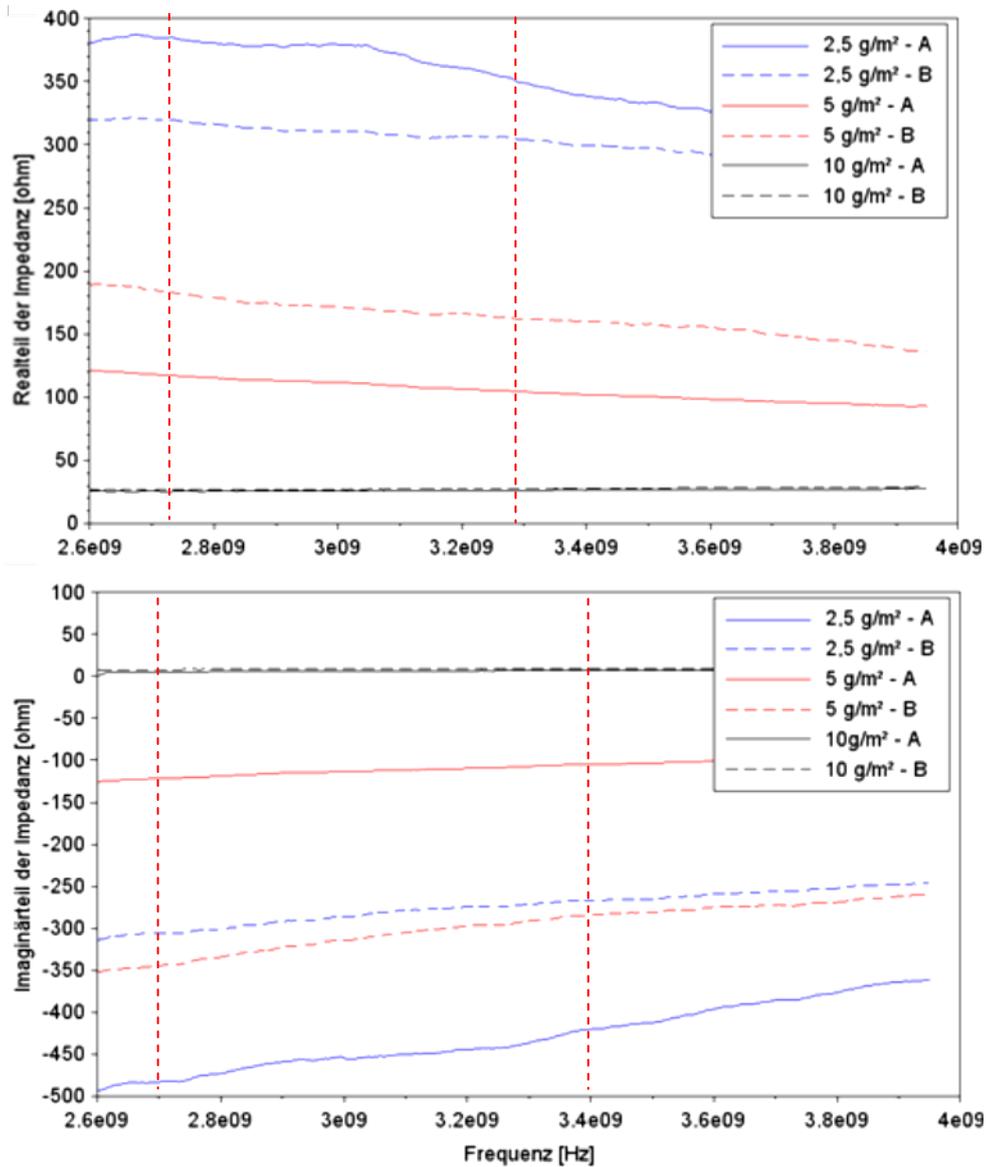


Abbildung 44: Impedanz der verschiedenen Pech-Faser-modifizierten Impedanzschichten (oben - $\Re(Z)$, unten - $\Im(Z)$)

Um die Nutzung der Impedanzen in der Simulation der Multilayersysteme zu vereinfachen, werden die Proben A und B jeweils zu einer gemittelten Kurve zusammengefasst. Dafür werden die Materialparameter der Proben an jedem Messpunkt (i) mit der Formel 33 gemittelt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 45 dargestellt.

$$Z_{M,i} = \frac{Z_{A,i} + Z_{B,i}}{2} \quad (33)$$

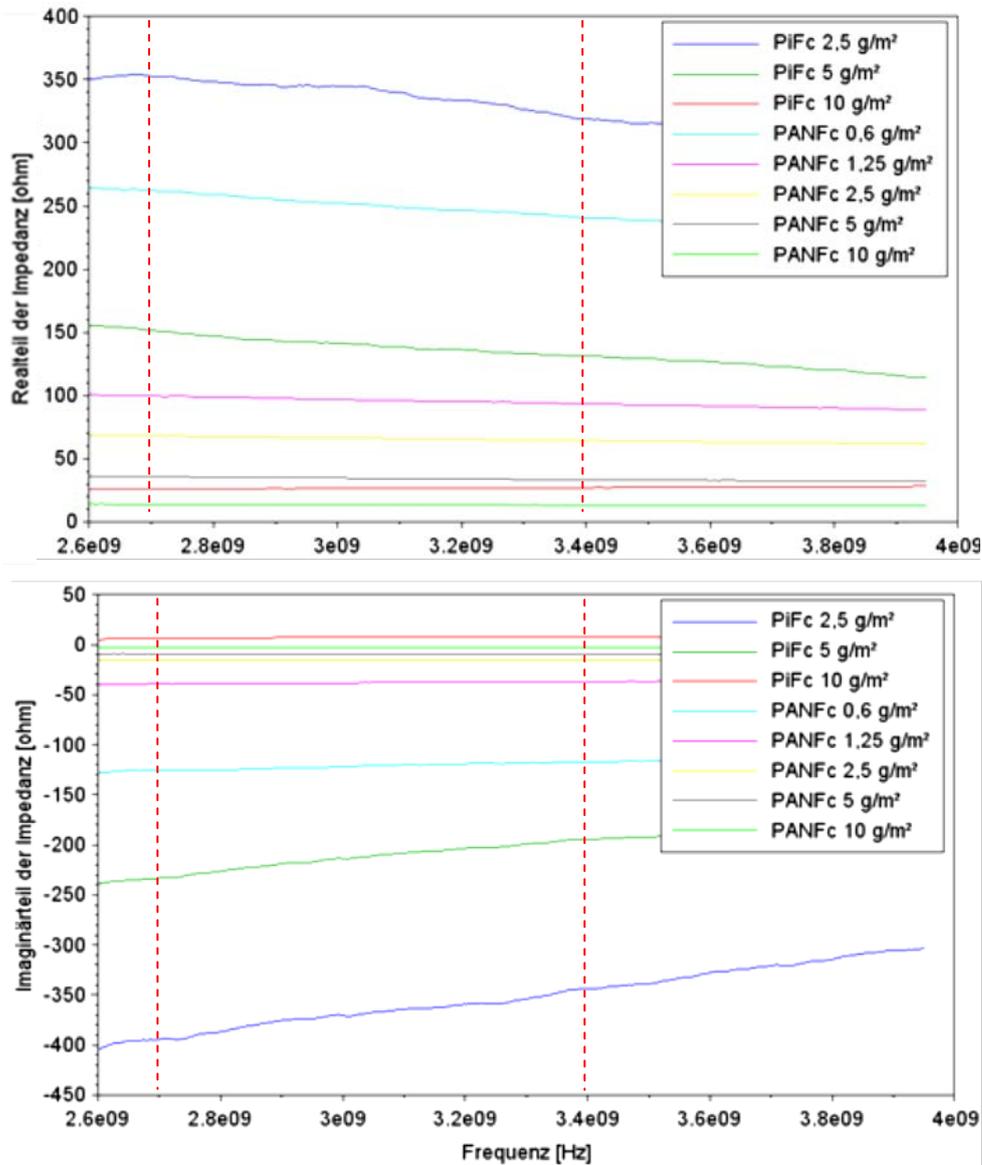


Abbildung 45: Gemittelte Impedanzen der Schichten (oben – $\Re(Z)$, unten – $\Im(Z)$)

Zum Abschluss der Bewertung der Materialparameter wird die gemittelte komplexe Impedanz der geschnittenen Fasern in Abhängigkeit der Flächengewichte in Abbildung 46 dargestellt. Bemerkenswert ist die schnelle Steigerung der Impedanz bei sinkenden Flächengewichten der aufgetragenen Pech-Fasern. Zudem ist das Verhältnis des verlustbehafteten Realteils zum Imaginärteil der Impedanz bei den geschnittenen PAN-Fasern im Schnitt höher als bei den Pech-Fasern.

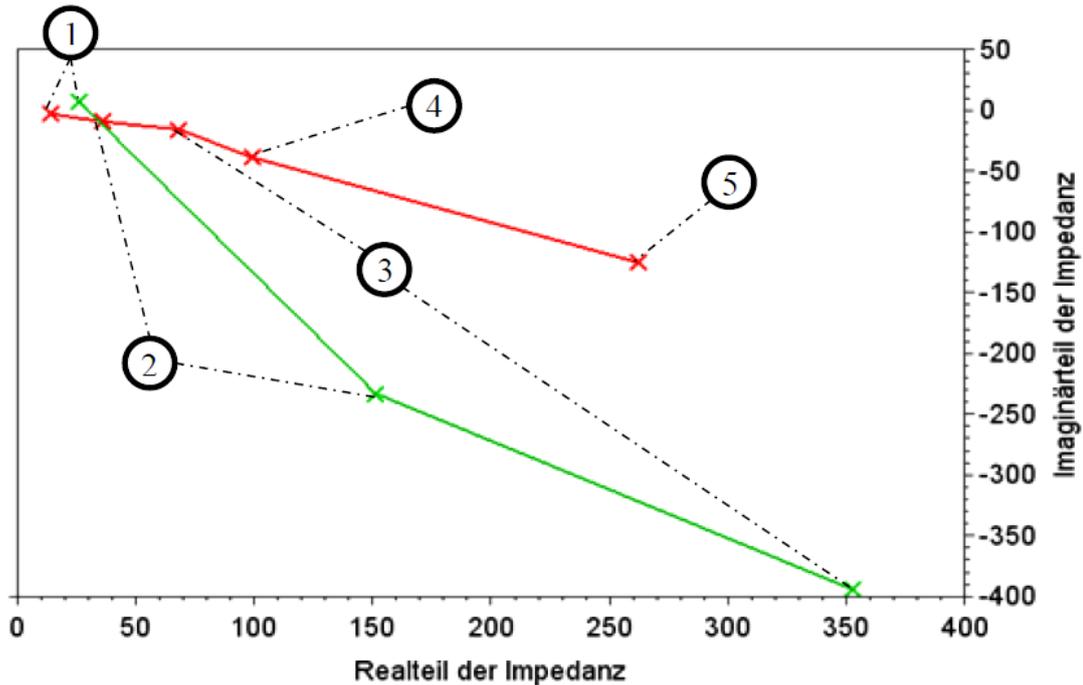


Abbildung 46: Vergleich der gemittelten, komplexen Impedanz in Abhängigkeit vom Flächengewicht.

Legende: 1 – 10 g/m², 2 – 5 g/m², 3 – 2,5 g/m², 4 – 1,25 g/m², 5 – 0,6 g/m²

6.5 Mechanische Charakterisierung der Impedanzschichten

Durch die Anforderung, die mechanischen Kennwerte des GFK durch die Integration eines Absorbersystems nicht negativ zu beeinflussen, soll der Einfluss einer absorbierenden Zwischenschicht auf die mechanischen Kennwerte des GFKs ermittelt werden.

Das Verfahren soll primär die Matriceigenschaften des Laminates prüfen, da die Auswirkung des PVBs und des *Carbon Black* auf die Matriceigenschaften nicht bekannt sind und eine Auswirkung des Absorbersystems auf das Glasfaserhalbzeug als sehr gering angenommen wird. Daher werden Verfahren zur Bestimmung der interlaminaren Schubfestigkeit gesucht. Ein Biegeversuch zur Bestimmung der *Interlaminar Shear Strength* (ILLS) nach DIN EN 2563 ist nicht für GFK-Lamine geeignet [10]. Stattdessen wird die Schubfestigkeit und -steifigkeit in einem Zugversuch nach DIN EN ISO 14129 ermittelt. Dabei wird auf einen rechteckigen Probekörper mit einem symmetrischen Lagenaufbau in $\pm 45^\circ$ zur Längsachse eine Zugkraft ausgeübt [11]. Gemessen werden die Zugkraft in Abhängigkeit vom Traversenweg sowie die globale Quer- und Längsdehnung der Probe. Der Versuch hat den Vorteil einer relativ einfachen Probenherstellung und eignet sich gut für die Bestimmung der Schubsteifigkeit. Die durch

den Versuch ermittelte Schubfestigkeit ist allerdings ungenau [2]. Grundlage für die Auswertung des Versuchs ist ein Vergleich der modifizierten GFKs mit einer Messreihe nicht modifizierter Probenkörper, weshalb Ungenauigkeiten in der ermittelten Schubfestigkeit tolerierbar sind.

Repräsentativ wird für jedes Material nur die Absorberschicht mit dem höchsten Füllgehalt mechanisch geprüft, da davon ausgegangen wird, dass die Absorberschichten mit geringerem Füllgehalt einen ähnlichen oder geringeren Einfluss haben.

Die Schub-GFK-Platte (Tabelle 9) besteht aus Segmenten mit unterschiedlichen Impedanzschichten. Aus ihr werden die benötigten Probenplatten für die sechs Probekörper mit den Maßen 250 x 250 mm in 0°/90°-Richtung herausgesägt werden. Die benötigten Aufleimerstreifen sind aus einer Platte (Glas/ Epoxidmatrix, Köpergewebe in $\pm 45^\circ$) herausgetrennt und besitzen 250 x 50 mm in ihren Maßen. Die Aufleimer werden mit Metallstiften (2 mm) an der GFK-Platte fixiert. Ein Zweikomponenten-Klebstoff²³ dient als Klebstoff zwischen dem GFK und den Aufleimerstreifen. Dieser wird in einer hydraulischen Presse bei ca. 20 kN und 60 °C für 2 Stunden ausgehärtet. Vor dem Heraussägen der endgültigen Probekörper werden die überschüssigen Klebstoffreste entfernt. Der Rand der Probeplatten ist aufgrund der dort angebrachten Fixierstifte nicht nutzbar. Abbildung 47 zeigt die Dimensionen eines Probekörpers.

Die Schubprüfung wird mit einer Universalprüfmaschine²⁴ durchgeführt. Die Traversengeschwindigkeit beträgt 2 mm/min. Die Prüfung sowie die mehrtägige Konditionierung der Proben erfolgen bei 23 °C und 50 % relativer Luftfeuchtigkeit.

²³ Scotch-Weld® 9323 B/A

²⁴ Zwick GmbH: Zwick 1476

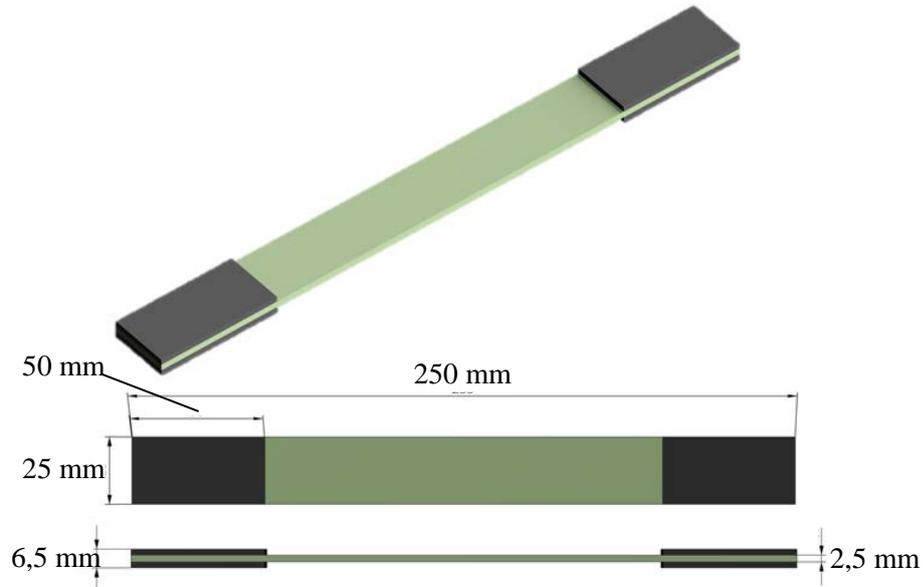


Abbildung 47: Probekörper für den 0°/90° Schubversuch

Als Vergleichsgrößen dienen die Schubfestigkeit τ_{12M} in der Lagenebene und das Schubmodul G_{12} . Das Schubmodul ist ein Sekantenmodul und berechnet sich aus der Schubspannung τ'_{12} und τ''_{12} , bei einer Schubverformung von $\gamma'_{12}=0,001$ und $\gamma''_{12}=0,005$.

$$G_{12} = \frac{\tau'_{12} - \tau''_{12}}{\gamma'_{12} - \gamma''_{12}} \quad (34)$$

Die Schubfestigkeit τ_{12M} berechnet sich aus der Zugkraft F_m bei $\gamma''_{12}=0,005$ und den Dimensionen der Proben.

$$\tau_{12M} = \frac{F_m}{2bh} \quad (35)$$

Das Bruchverhalten der Probekörper ist exemplarisch in Abbildung 48 zu sehen und bei jedem Probekörper ähnlich. Es handelt sich dabei um einen typischen Zwischenfaserbruch.



Abbildung 48: Bruchverhalten im Schubversuch

Die Ergebnisse der Schubversuche sind in Abbildung 49 dargestellt, dabei sind die Messproben gleicher Impedanzschicht zu Gruppen zusammengefasst. Der Vergleich zeigt eine nur geringfügige Abweichung der Vergleichsgrößen zur Referenz, während die Varianz der einzelnen Probekörper sehr gering ist.

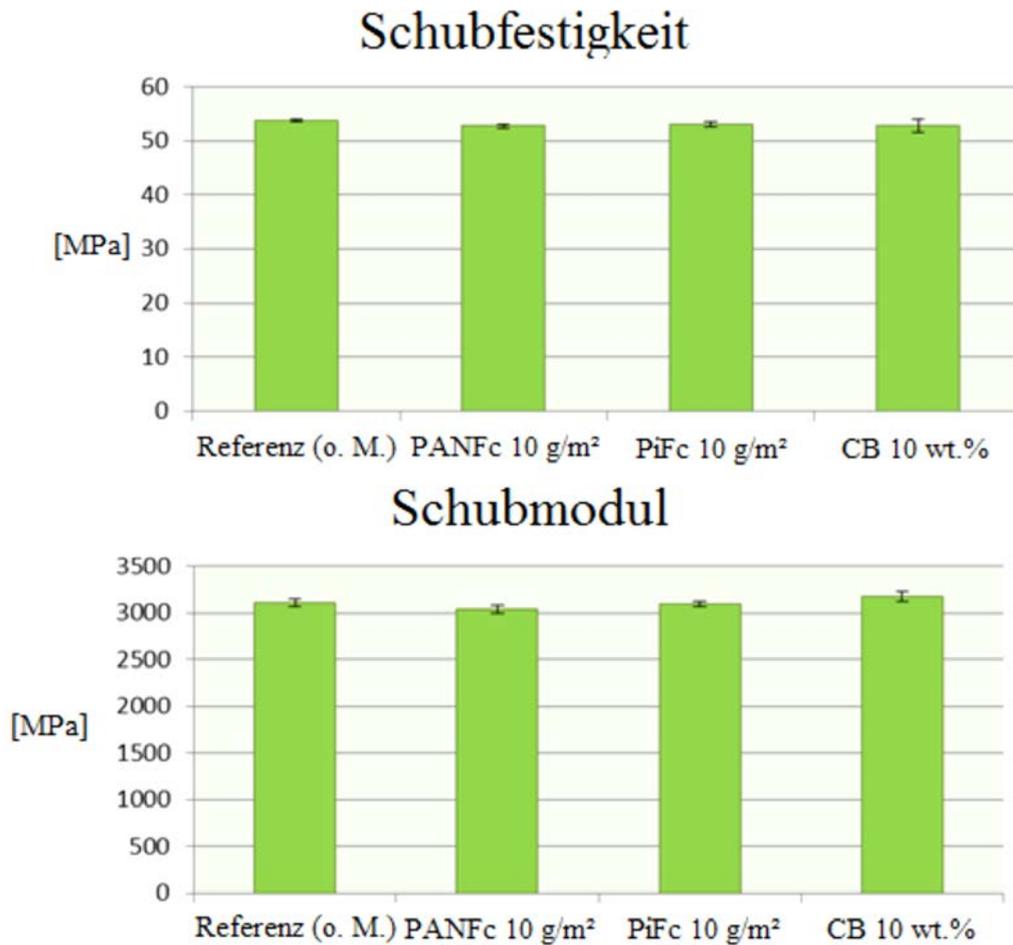


Abbildung 49: Ergebnisse des Schubversuchs nach DIN EN ISO 14129

7 ENTWICKLUNG UND HERSTELLUNG DES MULTILAYERABSORBERS

Grundlage für die Entwicklung des Multilayerabsorbers ist eine mathematische Auslegung für ebene Wellen. Nach der Fertigung des Multilayerabsorbers wird dieser im Hohlleiter vermessen. Für den Vergleich der gemessenen mit den simulierten Werten muss die vorher ermittelte Konfiguration des Multilayerabsorbers nochmals in einem Modell für TE₁₀-Wellen im Hohlleiter simuliert werden.

7.1 Auslegung des Multilayerabsorbers

Die mathematische Auslegung des Multilayerabsorbers basiert auf einem „*Brute Force*“-Ansatz, der alle möglichen Varianten des Modells berechnet. Die charakterisierten Impedanz- und GFK-Schichten werden als Grundlage für das in Kapitel 5.2 beschriebene Multilayer-Modell genutzt. Abbildung 50 zeigt das Vorgehen bei der Auslegung des Multilayerabsorbers. Aufgrund der hohen Streuung der Impedanzen bei den geschnittenen Pech-Fasern werden zwei Konfigurationen berechnet. Die erste hat nur Impedanzschichten der PAN-Fasern als Input für die Konfiguration, während die zweite alle möglichen Impedanzschichten beinhaltet. Um alle möglichen Varianten im „*Brute Force*“-Ansatz zu berücksichtigen, wird eine mehrstufige Permutationsmatrix berechnet (1). Diese geht von den fünf bzw. acht unterschiedlichen Impedanzschichten aus. Die Möglichkeit, dass keine Impedanzschicht zwischen zwei Lagen integriert wird, ist durch eine virtuelle Variante der Impedanzschicht, in der die Streumatrix eine Einheitsmatrix ist, realisiert. Die in Kapitel 5.2 beschriebenen sechs möglichen Integrationsorte ergeben somit einen Lösungsraum mit 6^6 bzw. 6^9 Varianten. Anschließend wird der erste Messpunkt (2,7 GHz) gewählt (2), für den die Streumatrix der Varianten berechnet wird (3 + 4). Im Modell beträgt die Dicke einer GFK-Schicht 0,88 mm. Die berechneten Streumatrizen werden in einer Variablen gespeichert. Schritt 3 und 4 werden folgend für alle möglichen Varianten durchgeführt, bevor der Prozess für den nächsten Messpunkt wiederholt wird. Dadurch entsteht für jeden Messpunkt eine Variable mit den Streumatrizen jeder Variante. Um die Variante mit der maximalen Reflexionsdämpfung über den betrachteten Frequenzbereich zu ermitteln, wird in einem darauffolgenden Schritt (5) die Dämpfung über den Frequenzbereich arithmetisch gemittelt. Das ist möglich, da die Messpunkte mit einer konstanten Abtastrate erfasst werden. Anschließend kann die Variante mit der maximalen Reflexionsdämpfung ausgewählt werden.

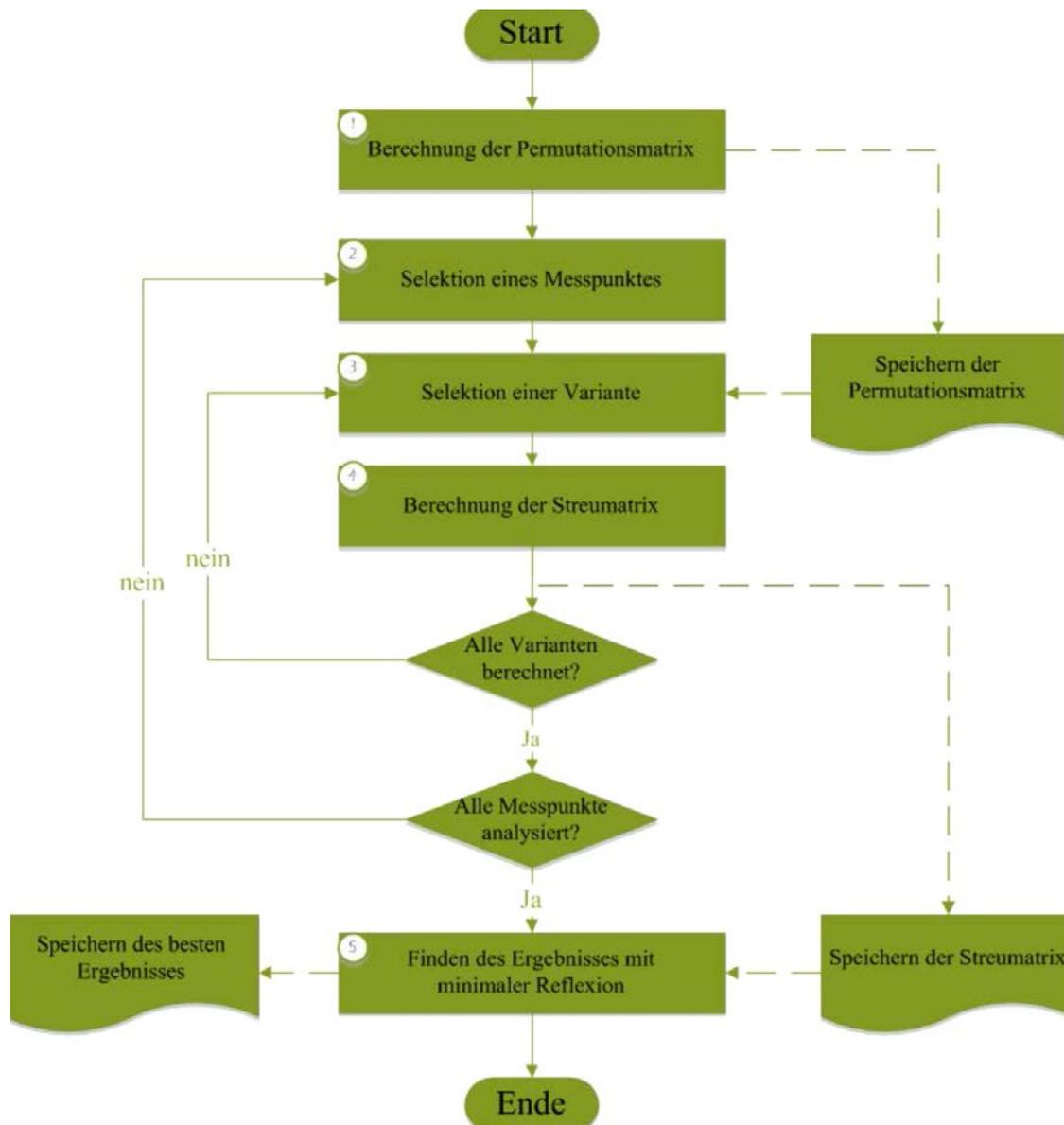


Abbildung 50: Prozessschritte bei der Auslegung des Multilayerabsorbers

Die berechneten Konfigurationen unterscheiden sich nicht in der Anordnung der Impedanzschichten, sondern nur durch die Füllgehalte ihrer Impedanzschichten. In die Konfiguration mit ausschließlich geschnittenen PAN-Fasern werden drei Impedanzschichten mit einem Flächengewicht von $0,6 \text{ g/m}^2$ PAN-Faser integriert. Die Konfiguration, in der als Berechnungsbasis alle Impedanzschichten verfügbar sind, setzt sich aus drei Impedanzschichten mit 5 g/m^2 Pech-Fasern zusammen. Der genaue Integrationsort der Impedanzschichten im GFK ist in Abbildung 51 dargestellt. Abbildung 52 zeigt die dabei simulierte Reflexionsdämpfung der beiden Konfigurationen für ebene Wellen.

Die Konfiguration 2 besitzt in der Simulation eine höhere Dämpfung als die Konfiguration 1.

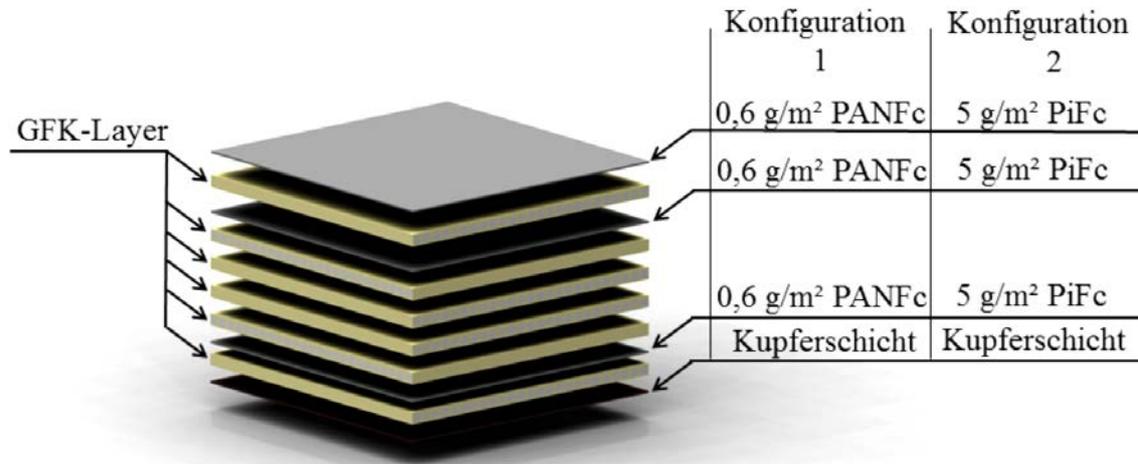


Abbildung 51: Die zwei besten Konfigurationen der berechneten Multilayerabsorber, die im Hohlleiterversuch vermessen werden

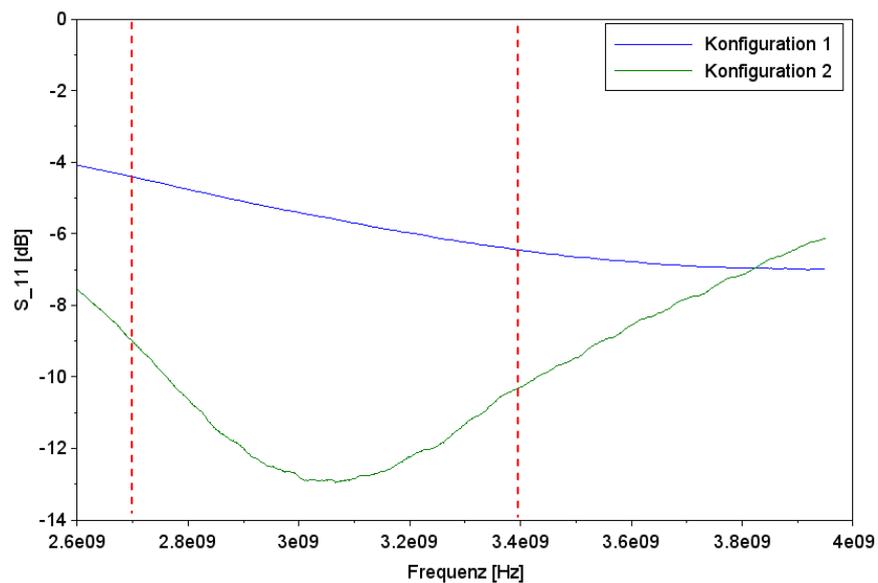


Abbildung 52: Simulierte Reflexionsdämpfung der Multilayerabsorber für ebene Wellen

7.2 Herstellung und Vermessung im Hohlleiter

Die Herstellung des Multilayerabsorbers wird wie in Kapitel 6.3 beschrieben durchgeführt. Die beiden Konfigurationen sind in einer GFK-Platte der Größe 300-mal-300 mm integriert. Deshalb werden die hergestellten Impedanzschichten mit den Maßen

300-mal-300 mm in 150-mal-300-mm-Stücke geteilt und, wie in Abbildung 53 gezeigt, auf unterschiedlichen Seiten der Preform in den Aufbau integriert.

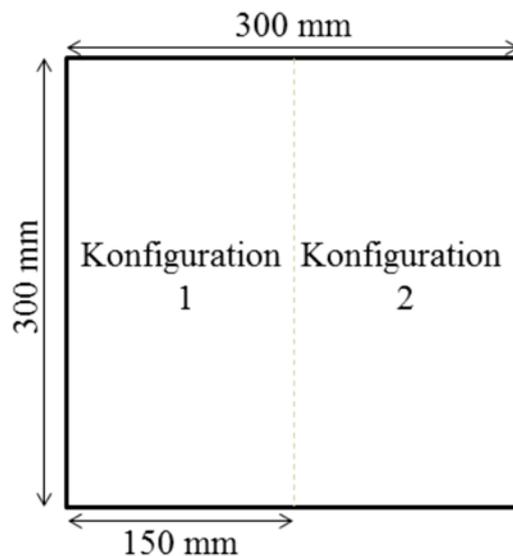


Abbildung 53: Aufteilung der Preform für die zwei unterschiedlichen Multilayerabsorber-Konfigurationen

Die Preform ist, bis auf die integrierten Impedanzschichten, identisch mit dem Aufbau der nativen 5-mm-GFK-Platte. Die gefertigte GFK-Platte hat eine durchschnittliche Dicke von 5,81 mm und einen FVG von 49,87 %. Zur Simulation eines reflektierenden Bauteils ist auf der Rückseite der GFK-Platte eine reflektierende Kupferschicht aufgebracht. Aus der Platte werden jeweils zwei Probekörper für jede Konfiguration zur Vermessung im Hohlleiterversuch herausgeschnitten. Als Referenzproben dienen die zwei Probekörper der nativen 5 mm dicken GFK-Platte. Für die Vermessung sind auch sie mit einer Kupferschicht behandelt. Die Kupferschicht realisiert eine Einfügungsdämpfung von 60 bis 100 dB.

Die Reflexionsdämpfungen der Probekörper der ersten Konfiguration sind in Abbildung 54 dargestellt. Im relevanten Frequenzbereich zwischen 2,7 und 3,4 GHz erreicht der gewählte Absorberaufbau eine Reflexionsdämpfung von -2,5 bis -7 dB. Die nicht mit Impedanzschichten modifizierten GFK-Proben (o. M.) reflektieren die Strahlung fast komplett.

Der Vergleich in Abbildung 55 zeigt die gemessene und die simulierte Reflexionsdämpfung in einem Hohlleiter. Die gemessenen Reflexionsdämpfungen

weichen von den simulierten Werten ab. Ein möglicher Grund für die Abweichung ist die reale Schichtdicke, die im Gegensatz zur simulierten Schichtdicke (0,88 mm) einen Wert von durchschnittlich 0,97 mm hat. Zudem sind die Abstände im realen Aufbau nicht ideal. Auch ist die angenommene Impedanz der Schichten ein Mittelwert der, wie in Kapitel 6.4.3 gezeigt, eine gewisse Varianz aufweist.

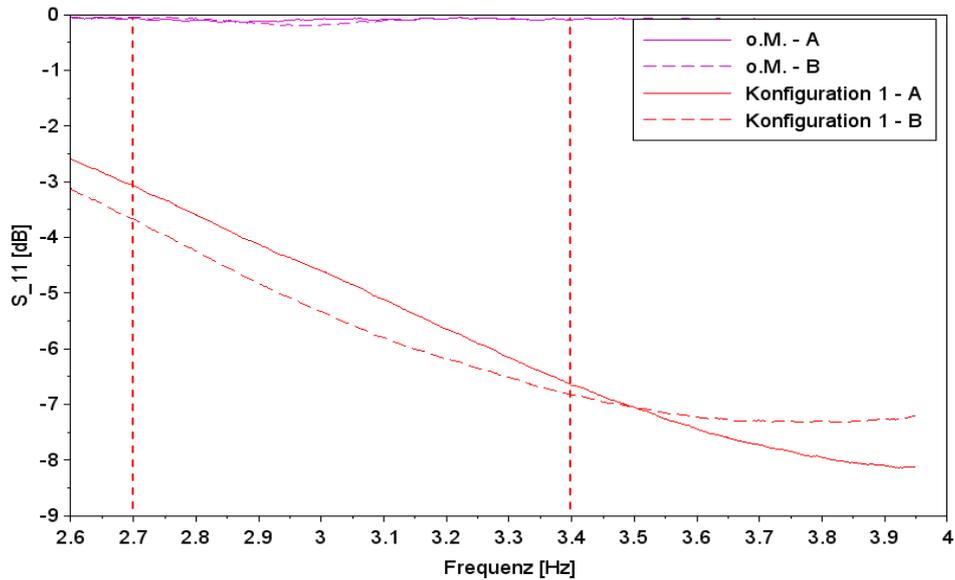


Abbildung 54: Gemessene Reflexionsdämpfung des Multilayerabsorbers (Konfiguration 1) im Vergleich zu einem GFK ohne Absorbersystem (o. M.)

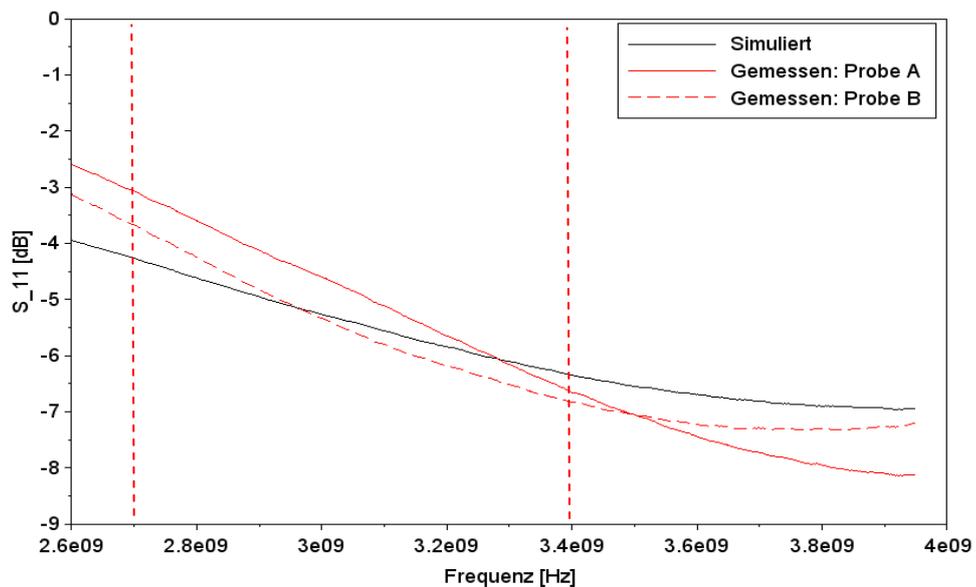


Abbildung 55: Gemessene und simulierte Reflexionsdämpfung des Multilayerabsorbers für eine TE_{10} -Welle (Konfiguration 1)

Die Reflexionsdämpfung der zweiten Konfiguration ist in Abbildung 56 dargestellt. Der Multilayerabsorber erreicht nur eine Reflexionsdämpfung zwischen -0,8 und -1,4 dB im relevanten Frequenzbereich. Die Abweichung von der simulierten Reflexionsdämpfung (Abbildung 57) ist enorm. Zudem zeigt sich ein sehr flacher Verlauf der Reflexionsdämpfung. Der Verdacht liegt nahe, dass die Welle schon von der ersten Impedanzschicht im Multilayerabsorber stark reflektiert wird. Die enorme Abweichung zwischen simulierter und gemessener Reflexionsdämpfung wurde schon in Kapitel 6.4.3 prognostiziert, da der ermittelte Materialparameter der Impedanzschicht mit einem Flächengewicht von 5 g/m² geschnittenen Pech-Fasern eine hohe Varianz aufweist. Auch wurde in diesem Kapitel die Vermutung geäußert, dass die Bestimmung der Impedanz in diesem Fall, aufgrund des niedrigen FVG der GFK-Platte und der vermuteten Abweichung des Integrationsortes der Impedanzschicht von der Symmetrieebene, nicht korrekt sein könnte.

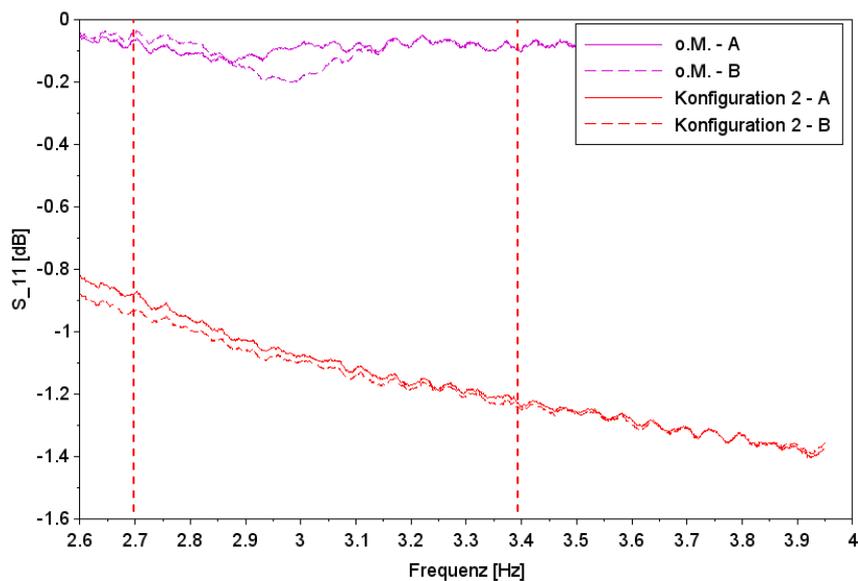


Abbildung 56: Gemessene Reflexionsdämpfung des Multilayerabsorbers (Konfiguration 2) im Vergleich zu einem GFK ohne Absorbersystem (o. M.)

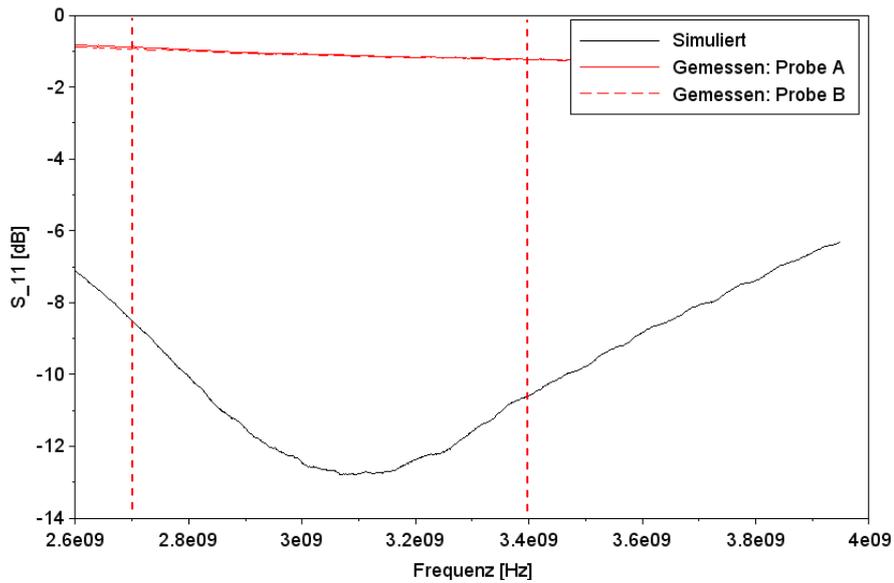


Abbildung 57: Vergleich der gemessenen und der für den Hohlleiter simulierten Reflexionsdämpfung des Multilayerabsorbers (Konfiguration 2)

Die Reflexionsdämpfungen der ebenen Welle erhöht sich im Vergleich zur TE_{10} -Welle nur geringfügig, weshalb bei einer konservativen Betrachtung die Reflexionsdämpfung des Hohlleiters auch auf die ebenen Wellen übertragen werden kann.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Arbeit hat eine Charakterisierung von kohlenstoffbasierten Materialien hinsichtlich ihrer Einsetzbarkeit als radarabsorbierende Materialien zur Reflexionsdämpfung elektromagnetischer Strahlung im Frequenzbereich zwischen 2,7 bis 3,4 GHz als Ziel. Die Weiterverarbeitung der Materialien erfolgte zu dünnen Impedanzschichten, die in die GFK-Platten integriert sind. Eine Reihe von Hohlleiterversuchen ermöglichte die elektromagnetische Vermessung der mit Impedanzschichten modifizierten GFK-Platten. Durch eine Materialparametersimulation wurden die Impedanzen der integrierten Schichten zurückgerechnet. Im Anschluss wurde ein Multilayerabsorber aus den berechneten Impedanzschichten hergestellt und wiederum im Hohlleiterversuch vermessen. Der aus den charakterisierten Impedanzschichten realisierbare optimale Aufbau des Absorbersystems wurde vorher in einer Simulation berechnet.

Vor der Bewertung der Materialien soll an dieser Stelle eine Bewertung der genutzten Simulationsmethodik angesprochen werden. Die Umsetzung der verschiedenen Modelle als *Transmission Line* ist eine Methode, mit deren Hilfe flexibel auf Veränderungen im Modellaufbau reagiert werden kann. Die eigentliche Rückrechnung der Materialparameter durch die „*Brute Force*“-Methode ist im Rahmen dieser Arbeit ausreichend. Jedoch ergaben sich durch große Lösungsräume der Materialparameter und entsprechend kleine Schrittweiten bei der Variation der Materialparameter extrem hohe Rechenaufwände pro abgetasteten Frequenzpunkt (>500.000), was jeweils eine erhebliche Simulationsdauer zur Folge hatte. Auch bei der Auslegung des Multilayerabsorbers ist die Methode bei mehr möglichen Impedanzschichten oder Integrationsorten aufgrund der Rechendauer unhandlich. Auf die Güte der berechneten Materialparameter lässt sich teilweise durch die Abweichung zwischen den gemessenen und simulierten Reflexionsdämpfungen der Multilayerabsorber schließen. Hier zeigt sich eine große Diskrepanz. Die Vermutung liegt nahe, dass nicht alle anfangs getroffenen Modellannahmen vollständig valide sind. Vor allem die Annahme einer idealen Schichtdicke im Modell zur Berechnung der Materialparameter könnte zu hohen Abweichungen der berechneten Materialparameter geführt haben und hat wahrscheinlich in dieser Form keinen Bestand. Auch die Vereinfachung des Faser-Matrix-Verbundes zu einer homogenen Schicht, das heißt einer globalen isotropen Permittivität, kann zu Verfälschungen der Simulation führen. Zumindest beim Vergleich der vermessenen

nativen GFK-Platten (5 mm und 10 mm) weichen die Ergebnisse der berechneten Permittivitäten geringfügig voneinander ab. Dies lässt auf einen Einfluss der Faserausrichtung sowie des FVG auf die Permittivität schließen. Eine genauere Untersuchung der Korrelationen ist hier notwendig, bevor entschieden werden kann, ob die Vereinfachung falsifiziert werden muss.

Das *Carbon Black* ist in der Herstellung der Suspension unproblematisch. Die Bestimmung der genauen Partikelgröße ist mit den genutzten Technologien nur bedingt möglich. Das genutzte Tauchbeschichtungsverfahren bietet die Möglichkeit, mit geringem technologischem Aufwand eine Beschichtung von Fasermaterialien durchzuführen. Der resultierende Materialeintrag in die Impedanzschicht ist jedoch bei dieser Art und Anwendung des Beschichtungsverfahrens sehr gering. Die Ergebnisse der Hohlleitermessung ergeben dadurch eine nicht verwertbare Veränderung im Reflexionsverhalten. Das führte zu der Entscheidung, dieses Material innerhalb dieser Arbeit nicht weiter zu untersuchen. Grundsätzlich kann *Carbon Black* jedoch nicht als Option ausgeschlossen werden, da der Einfluss einer variierenden Partikelgröße sowie die Steigerung des Materialeintrages in die Impedanzschicht nicht weiter verfolgt wurden.

Die gemahlene Kohlenstofffasern sind in der Herstellung der Suspension für das Beschichtungsverfahren einfacher zu handhaben, als die geschnittenen Kohlenstofffasern. Das liegt vor allem daran, dass sie nicht wie die geschnittenen Kohlenstofffasern in Form von Rovings, sondern in schon vereinzelt Filamenten vorliegen. Das eingesetzte Papierschöpfverfahren zur Beschichtung des Glasfasergewebes ist nicht geeignet für die Beschichtung mit Fasern einer so geringen Länge. Der Einsatz eines Gewebes mit geringerer Maschenweite oder eine andere Beschichtungsmethode können den Einsatz der geschnittenen Fasern allerdings ermöglichen. Da die gemahlene Fasern nicht elektromagnetisch vermessen wurden, ist keine Aussage über die Nutzung der Fasern in einem Absorbersystem möglich.

Die geschnittenen Pech-Fasern erweisen sich bei der Verarbeitung als problematisch. Durch ihre Neigung zum Faserbruch und die gleichzeitig hohen benötigten Scherkräfte zum Aufspalten der Rovings ist es mit den genutzten Methoden nicht möglich, die Faserlängen zu erhalten. Im Rahmen des Papierschöpfverfahrens wird eine relativ homogene Verteilung der Fasern auf dem Trägermaterial erreicht. Während der Charakterisierung im Hohlleiter und der Berechnung der Impedanzen ergeben sich

allerdings große Abweichungen zwischen den Proben einer Impedanzschicht. Besonders irritierend ist die stark gestiegene Abweichung der Ergebnisse innerhalb der Probesätze zwischen Reflexionsdämpfung und zurückgerechnetem Materialparameter. Die Vermutung liegt nahe, dass die Impedanzschichten zu weit entfernt von der Symmetrieebene im GFK integriert sind. Der dadurch entstandene Fehler spiegelt sich in der hohen Abweichung zwischen simulierter und gemessener Reflexionsdämpfung des Multilayerabsorbers (Konfiguration 2) wider.

Die geschnittenen PAN-Fasern haben sich im Multilayerabsorber hinsichtlich der Reflexionsdämpfung bewährt. Die Fasern sind sowohl in der Herstellung der Suspension als auch im Papierschöpfverfahren einfach zu verarbeiten. Die Ergebnisse der elektromagnetischen Charakterisierung sind dabei auch hinsichtlich der Streuung zwischen den Probekörpern hinreichend zuverlässig. Dadurch ist die Abweichung zwischen simulierter und gemessener Reflexionsdämpfung des Multilayerabsorbers nicht so gravierend wie bei den Pech-Fasern. In Anbetracht dieser Tatsachen wird die PAN-Faser in dieser Arbeit als das beste RAM bewertet.

Die Reflexionsdämpfung des Multilayerabsorbers zeigt eine erreichte Reflexionsdämpfung für den 1-D-Fall einer orthogonal einfallenden Welle im Hohlleiter. Sie gibt keinen Aufschluss über das Reflexionsverhalten im Falle eines variierenden Inzidenzwinkels. Das Ergebnis ist nicht als maximale Dämpfung zu verstehen, da als mögliche Impedanzvarianten nur die vorher hergestellten Impedanzschichten und keine Schichten mit optimierter Impedanz zur Verfügung standen.

Die Auswirkung der Impedanzschichten auf die mechanischen Kennwerte wurde nur hinsichtlich der Schubkennwerte des Laminates durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen einen geringen Einfluss der Impedanzschichten auf die Schubfestigkeit und das Schubmodul, sodass von keiner negativen Beeinträchtigung des GFKs durch die Impedanzschichten ausgegangen werden kann. Weiterführende mechanische Prüfungen zur Bestätigung dieser Vermutung stehen noch aus.

Innerhalb der Bearbeitungszeit konnte eine Reihe von Problematiken nicht geklärt werden. Die wichtigsten Problematiken für eine weiterführende Betrachtung des Themas sind folgend aufgelistet:

- Es wurde keine Methode für die Verarbeitung der gemahlene Kohlenstofffasern gefunden. Hier können alternative Beschichtungsverfahren zielführend sein.
- Die Länge der Pech-Fasern konnte aufgrund der angewendeten Verarbeitungsverfahren nicht erhalten werden. Eine alternative Methode wurde nicht identifiziert. Auch bedürfen die ermittelten Materialparameter der Pech-Faser-modifizierten Impedanzschichten einer erneuten Prüfung mit genauer bestimmten Positionen im GFK-Verbund.
- Es war insgesamt nicht möglich, den Einfluss einzelner Charakteristika eines Materials auf das Reflexionsverhalten zu bewerten.
- Mit den angewendeten Verarbeitungsmethoden konnte kein optimales Ergebnis mit identischer Dämpfung der Schichten gewährleistet werden. Hier gilt es die Verfahren zu optimieren oder auf industrielle Verfahren auszuweichen.
- Das Verhalten des Multilayerabsorbers bei variierendem Inzidenzwinkel der elektromagnetischen Strahlung oder nicht linearer Polarisation der Welle wurde nicht analysiert. In einer industriellen Anwendung muss das Absorbersystem hinsichtlich aller möglichen Fälle optimiert werden.

Die Arbeit schafft es, einen weitreichenden Überblick über die Problematik bei der Herstellung und Integration eines Absorbersystems für GFK-Werkstoffe zu geben. Dabei wurde eine Vielzahl unterschiedlicher Themen betrachtet. Diese gehen von der industrienahen Analyse der Anforderungen, einer Betrachtung unterschiedlicher radarabsorbierender Materialien sowie möglicher Dispersions- und Beschichtungsmethoden, der Ermittlung elektromagnetischer und mechanischer Kennzahlen hin zu einer anwendungsnahen Berechnung und Umsetzung eines Multilayerabsorbers.

Dabei reicht die Präzision der gefundenen Materialparameter aus, um einen Rückschluss von benötigten Materialmengen auf die Beeinflussung der Impedanz einer Schicht zu ziehen. Auch ist es gelungen, mit hinreichender Genauigkeit einen Multilayerabsorber zu berechnen, herzustellen und in ein GFK zu integrieren. Dabei wurde die anfangs erwartete Reflexionsdämpfung von ca. 5 dB teilweise erreicht. Das beste realisierte Absorbersystem (Konfiguration 1) erzielt im Hohlleiterversuch eine Dämpfung von

-2,5 bis -6,5 dB bei einem theoretischen Faserzusatzgewicht an geschnittenen PAN-Fasern von 1,8 g/m². Die erreichte Reflexionsdämpfung des Multilayerabsorbers stellt dabei nicht die maximal mögliche Dämpfung dar und bietet Perspektiven für höhere Reflexionsdämpfungen.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] **Akhtar, M. J.; Feher, L.; Thumm, M.:** A Multi-Layered Waveguide Technique for Determining Permittivity and Conductivity of Composite Materials. GeMiC (2005), S. 37–40
- [2] **Basan, R.:** Untersuchung der intralaminaren Schubeigenschaften von Faserverbundwerkstoffen mit Epoxidmatrix unter Berücksichtigung nichtlinearer Effekte. ISBN: 978-3-9814281-3-1. Berlin 2011
- [3] **BASF:** Wie Windflügel den Kräften der Natur trotzen, 2015.
<https://www.basf.com/de/company/news-and-media/science-around-us/how-rotor-blades-defy-the-forces-of-nature.html>, abgerufen am: 06.01.2015
- [4] **BMWi:** Die Energie der Zukunft. Erster Fortschrittsbericht zur Energiewende. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.), Berlin 2014
- [5] **BMWi:** Erneuerbare Energien: Innovation durch Forschung. Jahresbericht 2013 zur Forschungsförderung. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.), Berlin 2014
- [6] **Bundesverband Windenergie:** BWE Umfrage. Windenergie und Flugsicherung, 2013. <http://www.wind-energie.de/sites/default/files/attachments/page/arbeitskreis-luftverkehr-und-radar/20131107-bwe-umfrage-radar.pdf>, abgerufen am: 26.01.2015
- [7] **Collier, R. J.:** Transmission Lines. Equivalent Circuits, Electromagnetic Theory and Photons. ISBN: 978-1-107-02600-1. New York: Cambridge University Press 2013
- [8] **David, J.; Cuong, T.:** Wind Turbine Radar Cross Section. International Journal of Antennas and Propagation 2012 (2012) 1, S. 1-14
- [9] **De Rosa, I. M.; Sarasini, F.; Sarto, M. S.; Tamburrano, A.:** EMC Impact of Advanced Carbon Fiber/Carbon Nanotube Reinforced Composites for Next-Generation Aerospace Applications. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility 50 (2008) 3, S. 556-563
- [10] **DIN EN 2563.** Bestimmung der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit, 1997
- [11] **DIN EN ISO 14129.** Zugversuch an 45°-Laminaten zur Bestimmung der Schubspannungs-/Schubverformungs-Kurve des Schubmoduls in der Lagenebene, 1998

- [12] **Draken, D.:** Bundeswehr und Windenergieanlagen, 2013.
<http://www.energieatlas.bayern.de/file/pdf/1111/Bundeswehr>, abgerufen am:
02.03.2015
- [13] **Electronic Communications Committee (ECC):** THE EUROPEAN TABLE OF
FREQUENCY ALLOCATIONS AND APPLICATIONS IN THE FREQUENCY
RANGE 8.3 kHz to 3000 GHz (ECA TABLE), 2014
- [14] **EMC-Technik:** Glas-Vlies mit definiertem Widerstand. C-RAM RTG, 2014
- [15] **EMERSON & CUMING:** ECCOSORB® VHP-NRL. Technical Datasheet
- [16] **European Organisation for the Safety of Air Navigation:** Eurocontrol. Wind
Turbines - possible impact on air operations, 2015.
<http://www.eurocontrol.int/articles/wind-turbines-possible-impact-air-operations>,
abgerufen am: 27.01.2015
- [17] **Flemming, M.; Roth, M. S.:** Faserverbundbauweisen Eigenschaften.
mechanische, konstruktive, thermische, elektrische, ökologische, wirtschaftliche
Aspekte. ISBN: 978-3-642-62459-9. Berlin: Springer Verlag 2003
- [18] **Georg, O.:** Elektromagnetische Wellen. Grundlagen und durchgerechnete
Beispiele. ISBN: 3-540-62924-6. Berlin: Springer Verlag 1997
- [19] **Goldschmidt, A.; Streitberger, H. J.:** Basics of Coating Technology. ISBN: 3-
87870-798-3. Hannover: Vincentz Network 2003
- [20] **Hänsch, A.:** VAP® Vacuum Assisted Process, 2015. [http://www.vap-
info.com/de/download/VAP-vacuum-assisted-process.pdf](http://www.vap-info.com/de/download/VAP-vacuum-assisted-process.pdf), abgerufen am: 23.02.2015
- [21] **Hau, E.:** Windkraftanlagen. Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit.
Berlin, Heidelberg: Springer 2012
- [22] **Icpinar C.; Tessmer J.:** Smart Blades, 2014. <http://www.smartblades.info/>,
abgerufen am: 26.01.2015
- [23] **IoLiTec:** Io-li-tec - Technical Data Sheet. Fullerne C_60, Heilbronn 2009
- [24] **Knott, E. F.; Shaeffer, J. F.; Tuley, M. T.:** Radar Cross Section. ISBN: 978-1-
891121-25-8. New York: SciTech Publishing 2004
- [25] **Kuraray Specialities:** Mowital®. Polyvinylbutyral vom Feinsten. Kuraray
Specialities Europe GmbH (Hrsg.), Frankfurt a.M. 2003
- [26] **Lee, S. E.; Kang, J. H.; Kim, C. G.:** Fabrication and design of multi-layered
radar absorbing structures of MWNT-filled glass/epoxy plain-weave composites.
Composite Structures 76 (2006) 4, S. 397-405

- [27] **Ludorf, M.:** Orion Engineering Carbons. Sicherheitsdatenblatt - XPB 552. Orion Engineering Carbons (Hrsg.), 2013
- [28] **Luukkonen, O.; Maslovski, S. I.; Tretyakov, S. A.:** A Stepwise Nicolson-Ross-Weir-Based Material Parameter Extraction Method. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters 10 (2011), S. 1295-1298
- [29] **Meinke, H. H.; Grundlach, F. W.:** Taschenbuch der Hochfrequenztechnik. ISBN: 3-540-54716-9. Berlin: Springer Verlag 1992
- [30] **Mitsubishi Plasitics. Inc.:** DIALEAD Catalog. Dialed Coal Tar Pitch-based carbon Fiber, 2015
- [31] **Monka, C.:** Characterisation of low loss dielectric using a transmission line method. ISBN: 978-3-8007-3585-3. Berlin: VDE Verlag 2014
- [32] **Morgan, P.:** Carbon Fibers and their Composites. ISBN: 978-0-8247-0983-9. Boca Raton: Taylor & Francis Group 2005
- [33] **Nehse, D.:** DaNA -Informationen zu Nanomaterialien und Nano-Sicherheitsforschung. Kohlenstoff-Nanoröhrchen (Carbon Nanotubes). <http://www.nanopartikel.info/nanoinfo/materialien/kohlenstoff-nanoroehrchen/materialinfo-kohlenstoff-nano>, abgerufen am: 11.02.2015
- [34] **Nehse, D.:** DaNA -Informationen zu Nanomaterialien und Nano-Sicherheitsforschung. Fullerene. <http://nanopartikel.info/nanoinfo/materialien/fullerene/materialinfo-fullerene>, abgerufen am: 11.02.2015
- [35] **Peesapati, V.; Cotton, I.; Rashid, L. S.; Brown, A.; Jamshidi, P.; Hogg, P. J.:** Resolving Performance In New Wind Turbine Blade Designs, Manchester 2014
- [36] **Pieronek, J. V.:** The ASR-9 Processor Augmentation Card (9-PAC). The Lincoln Laboratory Journal (1994) 7, S. 355-378
- [37] **Rashid, L.; Brown, A.:** Partial Treatment of Wind Turbine Blades with Radar Absorbing Materials (RAM) for RCS Reduction. ISBN: 978-84-7653-472-4. IEEE 2010
- [38] **Saville, P.:** Review of Radar Absorbing Materials. Technical Memorandum, Defence R&D Canada. Dartmouth 2005
- [39] **Schiek, B.:** Grundlagen der Hochfrequenz-Messtechnik. ISBN: 3-540-64930-1. Berlin: Springer 1999

- [40] **Schmidt, H.:** XE-NMR-spektroskopische Untersuchung an Carbon Black und Graphit, Universität Duisburg Dissertation. Duisburg 2003
- [41] **Schürmann, H.:** Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. ISBN: 978-3-540-72189-5. Berlin: Springer 2007
- [42] **SGL Carbon Fibers Ltd:** SGL Carbon Fibers – Product Data Sheet. SIGRAFIL C30 M150 UNS, 2012
- [43] **SGL Carbon Fibers Ltd.:** SGL Carbon Fibers – Product Data Sheet. Sigrafil C30 S001/003/006 EPY, 2013
- [44] **Sigmar Aldrich Co. LLC.:** Technical Documents. CoMoCAT® MWNTs, 2015. <http://www.sigmaaldrich.com/technical-documents/articles/materials-science/multi-walled-carbon-nanotubes.html>, abgerufen am: 19.02.2015
- [45] **Stroth, U.:** Experimentalphysik. Online-Skript. <http://www.ipf.uni-stuttgart.de/lehre/online-skript/edynamik/hohlleiter.gif>, abgerufen am: 01.03.2015
- [46] **Thurner, S.:** Mess- und Prüfmittelverwaltung Hohlleiter S-Band. Bericht, 2014
- [47] **U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE:** Federal Radar Spectrum Requirements, Bd. 2000
- [48] **Weber, M. E.:** FAA SURVEILLANCE RADAR DATA AS A COMPLEMENT TO THE WSR-88D NETWORK. American Meteorological Society (AMS). (Hrsg.), Lexington 2000
- [49] **Wohlmann, B.:** Handbuch Faserverbundkunststoffe. Grundlagen, Verarbeitung, Anwendung, Bd. 2009. ISBN: 978-3834808813. AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V. 2009

ANHANG

1. Messergebnisse der Schubprüfung

Tabelle 11: Messwerttabelle der gemittelten Probensätze aus der Schubprüfung nach DIN EN ISO 14129: Probensatzname, Probenumfang in Stück, Mittelwert \pm Standardabweichung des Schubmoduls und der Schubfestigkeit.

Probensatz	Umfang	G_{12}	$\tau_{12,M}$
	[Stck.]	[MPa]	
Referenzproben	6	3101,6 \pm 43,2	53,74 \pm 0,29
PANFc 10 g/m ²	5	3032,2 \pm 43,1	52,71 \pm 0,34
PiFc 10 g/m ²	5	3088,4 \pm 28,4	53,06 \pm 0,43
CB 10 wt.%	5	3174,1 \pm 52,1	52,76 \pm 1,09

2. Hohlleiterproben und die durchschnittliche Distanz bei der Rückrechnung im Simulationsmodell

Tabelle 12: Tabelle der durchschnittlichen Werte der Distanzfunktion für die geprüften GFK-Platten und ihrer Hohlleiterproben A und B bei der Simulation der Materialparameter.

GFK-Platte	Ø-Distanz Probe A	Ø-Distanz Probe B
10mm_GFK-1	0,0000793	0,0000793
5mm_GFK-1	0,0000354	0,0000499
PANFc_0,6-GFK-1	0,0000394	0,0000514
PANFc_1,25-GFK-1	0,000197	0,000176
PANFc_2,5-GFK-1	0,000308	0,000347
PANFc_5-GFK-1	0,000339	0,000193
PANFc_10-GFK-1	0,000159	0,000443
PiFc_2,5-GFK-1	0,0000835	0,0000354
PiFc_5-GFK-1	0,000173	0,000198
PiFc_10-GFK-1	0,000523	0,000321

3. Ergebnistabelle der Schnittprobenauswertung

Tabelle 13: Gemessene Schichtdicken der gefertigten GFK-Platten mit integrierter Impedanzschicht, dargestellt als Mittelwert \pm Standardabweichung. Die daraus berechnete Abweichung der Impedanzschicht von der Symmetrieebene in Prozent dargestellt als Mittelwert \pm Toleranz.

GFK-Platte	Obere Schicht [mm]	Untere Schicht [mm]	Impedanzschicht [mm]	Abweichung [%]
PANFc_0,6-GFK-1	2,44 \pm 0,05	2,50 \pm 0,04	0,16 \pm 0,04	2,3 \pm 3,5
PANFc_1,25-GFK-1	2,71 \pm 0,10	2,60 \pm 0,04	0,19 \pm 0,01	-4,3 \pm 5,5
PANFc_2,5-GFK-1	2,58 \pm 0,09	2,58 \pm 0,09	0,22 \pm 0,04	0,0 \pm 7,0
PANFc_5-GFK-1	2,62 \pm 0,08	2,55 \pm 0,03	0,88 \pm 0,02	-2,8 \pm 4,3
PANFc_10-GFK-1	2,52 \pm 0,03	2,52 \pm 0,04	0,22 \pm 0,04	0,0 \pm 2,8
PiFc_2,5-GFK-1	2,52 \pm 0,07	2,44 \pm 0,06	0,16 \pm 0,03	-3,4 \pm 5,4
PiFc_5-GFK-1	2,72 \pm 0,05	2,55 \pm 0,09	0,25 \pm 0,04	-6,9 \pm 5,7
PiFc_10-GFK-1	2,38 \pm 0,08	2,47 \pm 0,06	0,18 \pm 0,33	3,5 \pm 5,6

4. Daten auf CD-ROM

Auf der beiliegenden CD-ROM sind die folgenden Daten zu finden:

- Rohdatensätze der Hohlleitermessung
- Rohdatensätze des Schubversuchs
- Scilab-Skripte
 - o Import der Rohdaten
 - o Berechnung der Permittivität des nativen GFK
 - o Berechnung der Impedanzschicht
 - o Berechnung des Multilayers für ebene Wellen
 - o Berechnung des Multilayers für TE₁₀-Wellen
- Ergebnisdatensätze der berechneten Permittivität
- Ergebnisdatensätze der berechneten Impedanzen
- Bericht im PDF-Format