

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 20293 N

Thema

EMSHIELD - Entwicklung eines Werkstoffs aus recycelten Carbonfasern für die Schirmung, Reflektion und Absorption elektromagnetischer Strahlung

Berichtszeitraum

01.01.2019 - 31.12.2020

Forschungsvereinigung

Forschungskuratorium Textil e.V.

Forschungseinrichtung(en)

1. Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University (ITA)
2. Institut für Hochfrequenztechnik und Elektronik (IHE)
3. Institut für Textiltechnik Augsburg gGmbH

Aachen, 07.05.2021

Jonas Broening



Karlsruhe, 07.05.2021

Thomas Zwick



Augsburg, 07.05.2021

Philipp Abel



Ort, Datum

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der
Forschungseinrichtung(en)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

Thema	1
Berichtszeitraum	1
Forschungsvereinigung	1
Forschungseinrichtung(en)	1
Inhaltsverzeichnis	2
1 Projektzusammenfassung	5
2 Einleitung	6
2.1 Vorbemerkung.....	6
2.2 Forschungsziel	6
2.3 Angestrebte Forschungsergebnisse	6
2.4 Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse	7
2.5 Lösungsweg	8
3 Stand der Forschung	10
3.1 Verbundwerkstoffe aus Carbonfasern.....	10
3.2 Recycling von C-Fasern (rCF)	11
3.2.1 Mechanisches Recycling	11
3.2.2 Thermisches Recycling	15
3.2.3 Chemisches Recycling	15
3.3 Herstellung von Vliesstoffen	16
3.3.1 Definition von Vliesstoffen	16
3.3.2 Kardiervfahren.....	17
3.4 Verfestigungsprozesse für Vliesstoffe.....	21
3.4.1 Mechanische Verfestigung	21
3.4.2 Chemische Verfestigung	23
3.4.3 Thermische Verfestigung.....	24
3.5 Carbonfasern (C-Fasern)	25
3.6 Elektromagnetische Schirmwerkstoffe	27
3.7 Zusammenfassung	30
4 Ermittlung des Lastenheftes für die Demonstratoren (AP 1)	32
4.1 Zusammenfassung	34
5 Entwicklung und Aufbau eines Messstandes für die Bestimmung der elektromagnetischen Eigenschaften (AP 2)	35
5.1 Grundlagen	36

5.2	Messaufbauten zur Probencharakterisierung im Freiraum.....	42
5.3	Aufbau einer TEM-Messzelle.....	46
5.4	Aufbau zur Messung des Radarrückstreuverhaltens.....	48
5.5	Zusammenfassung.....	51
6	Charakterisierung der Materialparameter und der elektromagnetischen Eigenschaften der Benchmark-Produkte (AP 3).....	52
6.1	Messung der dielektrischen Eigenschaften.....	54
6.2	Messung der Transmissions- und Reflexionseigenschaften.....	57
6.3	Messung des elektrischen Widerstandes.....	61
6.4	Untersuchung der mechanischen Eigenschaften.....	62
6.5	Zusammenfassung.....	67
7	Probenherstellung und -prüfung (AP 4).....	68
7.1	Herstellung der CF-Vliese.....	69
7.2	Elektromagnetische Charakterisierung der konsolidierten Probenmaterialien und CF-Papiere.....	75
7.3	Prüfung des Absorptionsverhaltens zur Erwärmung.....	86
7.4	Untersuchungen zur Reduzierung der Reflexion.....	89
7.5	Untersuchungen zur Erhöhung der Reflexion.....	97
7.6	Mechanische Charakterisierung der untersuchten Materialien.....	101
7.7	Zusammenfassung.....	106
8	Entwicklung eines vereinfachten physikalischen Modells für die Vorhersage der elektromagnetischen Eigenschaften (AP 5).....	108
8.1	Zusammenfassung.....	113
9	Entwicklung einer Methodik für die geschlossene elektrische Kontaktierung von rCF-Verbundbauteilen (AP 6).....	114
9.1	Zusammenfassung.....	122
10	Erstellung eines Auslegungstools für rCF-Verbundbauteile mit maßgeschneiderten EM-Eigenschaften (AP 7).....	123
10.1	Zusammenfassung.....	125
11	Validierung des Auslegungstools (AP 8).....	126
11.1	Zusammenfassung.....	127
12	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (AP 9).....	128
12.1	Zusammenfassung.....	133
13	Zusammenfassung der Projektergebnisse.....	134
14	KMU-Nutzen.....	140
14.1	Wissenschaftlich technischer Nutzen.....	140

14.2	Wirtschaftlicher Nutzen insbesondere für KMU.....	141
14.3	Innovativer Beitrag.....	142
14.4	Industrielle Anwendung	142
15	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	144
16	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	146
17	Durchführende Forschungsstellen	150
18	Danksagung.....	151
19	Literaturverzeichnis	153
20	Anhang.....	157
20.1	Erweiterte Ergebnisse der Recherche zu Schirmungsmaterialien.....	157

1 Projektzusammenfassung

Ansatz des Projektes EMSHIELD war es, die elektrische Leitfähigkeit von Carbonfasern für die Beeinflussung elektromagnetischer (EM) Felder zu nutzen. Ziel war es Materialien zu entwickeln, welche eine gute Festigkeit, hohe Korrosionsbeständigkeit und niedriges Gewicht haben. Aus Gründen der Nachhaltigkeit und des Preises wurden recycelte Carbonfasern verwendet, da diese vergleichsweise preiswert sind und eine gute Ökobilanz aufweisen.

Da recycelte Carbonfasern nicht mehr als endlose Filamente vorliegen, können diese nur mit weniger Verarbeitungsverfahren weiterverarbeitet werden. Ein besonders effizientes und günstiges Verfahren, um aus den rCF ein flächiges Textil zu herzustellen, ist die Vliesherstellung. Daher wurden die rCF im Krempelverfahren in Mischung mit Polypropylen-Fasern zu Hybridvliesen verarbeitet. Die Hybridvliese wurden anschließend thermogeformt, wobei die Polypropylen-Fasern aufschmelzen und die rCF-Fasern imprägnieren und so beim Erkalten ein Faser-Matrix-Verbund entsteht.

Es wurden verschiedene rCF-Plattenwerkstoffe hergestellt und in einem, im Rahmen des Projektes am IHE entwickelten und in Betrieb genommenen Prüfstand, auf ihre elektromagnetischen Eigenschaften (unter anderem die Schirmwirkung) hin untersucht. Auf Basis der Ergebnisse wurde ein physikalisches Modell zur Abbildung und Simulation der elektromagnetischen Eigenschaften von Vliesstoffen entwickelt. Mit Hilfe des Modells wurde ein Auslegungstool für elektromagnetische Schirmwerkstoffe erstellt und validiert. Das Auslegungstool ermöglicht es, rCF-Vlies-Materialien anhand der gewünschten Schirmwirkung auszulegen.

Darüber hinaus wurden im Rahmen des Projektes auch die Kontaktierung der hergestellten Plattenwerkstoffe untersucht. Dafür wurden verschiedene Konzepte erstellt, anhand ihrer Relevanz für die Praxis bewertet und anschließend umgesetzt und geprüft.

Abschließend wurde eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Produktionsprozesses für das entwickelte Material durchgeführt.

Das Forschungsziel wurde erreicht.

2 Einleitung

2.1 Vorbemerkung

Dieser Schlussbericht gibt die Ergebnisse des Projekts „EMSHIELD“ wieder, welches vom 01.01.2019 bis zum 31.12.2020 durchgeführt wurde.

2.2 Forschungsziel

Ziel des Forschungsvorhabens war es die Nutzbarmachung recycelter Carbonfasern als Werkstoff für die Entwicklung von Bauteilen zur Beeinflussung elektromagnetischer Felder (z. B. Schirmung). Dabei sollten die recycelten Carbonfasern möglichst kosteneffizient zu einem textilen Halbzeug weiterverarbeitet werden, welches anschließend durch thermische Formgebung zu Organoblechen oder Bauteilen verarbeitet wird. Die Forschungsfrage dabei ist, welche Einflüsse die unterschiedlichen Produktionsparameter und Fasereigenschaften auf die EM-Eigenschaften des Bauteils haben.

Die vorgewiesenen Halbzeuge sollen auf ihre elektromagnetischen Eigenschaften hin untersucht werden. Die Ergebnisse der Messungen sollen Rückschlüsse darauf zulassen, welchen Einfluss bestimmte Herstellungs- und Produktionsparameter auf die elektromagnetischen Eigenschaften der resultierenden Materialien hat.

Die mögliche Zusammenhang zwischen Schirmung, Reflexion, Transmission und Absorption mit den Werkstoff-, Herstellungs- und Halbzeugparametern ist bisher nicht bekannt und soll im Rahmen des Projektes untersucht werden.

2.3 Angestrebte Forschungsergebnisse

Ausgehend vom Forschungsziel ergeben sich die folgenden wissenschaftlich-technischen Forschungsergebnisse:

- Nutzbarmachung von CF als Schirmungsmaterial

- Für die Messung des elektromagnetischen Verhaltens der Bauteile wurde durch das IHE in dem Projekt ein Prüfstand entwickelt, mit dem die Proben hinsichtlich der elektromagnetischen Transmission, Reflexion und Absorption untersucht wurden
- Entwicklung des physikalischen Modells zur Simulation der elektromagnetischen Eigenschaften
- Untersuchung der Wechselwirkungen der elektromagnetischen Wellen mit dem Material basierend auf Simulationen
- Test zum Auslegen der Schirmwirkung von rCF-Materialien
- Methoden zur Herstellung der untersuchten Materialien

2.4 Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse

Ansatz in dem Projekt EMSHIELD ist es, Carbonfasern zu recyceln (rCF) und die elektrische Leitfähigkeit der Fasern für die Beeinflussung (Schirmung, Reflexion, Absorption) elektromagnetischer (EM) Felder zu verwenden. Der so entwickelte Werkstoff hat eine gute Festigkeit, hohe Korrosionsbeständigkeit, niedriges Gewicht und aufgrund des Recyclingmaterials einen niedrigen Preis und hohe Nachhaltigkeit.

Als Werkstoff aus rCF ist eine hohe gewichtsspezifische Dämpfung zu einem geringen Preis erreichbar. Die Eigenschaften der rCF-Werkstoffe als Schirmwerkstoff sind derzeit für KMU nicht nutzbar, da bisher keine Herstellungsverfahren für rCF-Werkstoffe als EM-Werkstoff vorliegen. Die Entwicklung dieser Verfahren ist Einzelprojekten für KMU nicht wirtschaftlich darstellbar. Ein Ergebnis des Forschungsvorhabens EMSHIELD ist daher ein Ausgangspunkt, auf dessen Grundlage Bauteile ausgelegt werden können.

Ein wirtschaftliches Herstellungsverfahren für die elektromagnetischen Eigenschaften existiert derzeit nicht. In EMSHIELD wird daher ein EM-Prüfstand entwickelt, mit dem rCF-Werkstoffe sowie Verbundbauteile hinsichtlich der EM-Performance untersucht werden. Zudem werden die Materialien hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften untersucht. Betrachtet werden neben einschichtigen rCF-Werkstoffen mehrschichtige Verbunde, bei denen eine optimierte Schirm- und Reflexionsleistung erwartet wird.

Werte werden aufbauend auf einfachen Strukturen, z.B. basierend in Lageranzahl und Vorgeprägung der Fasern umfangreiche Messreihen durchgeführt und heraus mathematische Zusammenhänge abgeleitet.

Das Ziel ist es, ein Grundmodell für die Berechnung zu erhalten, das mit weiteren Messungen validiert wird und in der Komplexität weiter ausgebaut werden kann. Parameter sind hierbei Größe des Vlieses, Aufbau der Lager, Orientierung der Lager, Konstruktion der Vliesbestandteile, Füllstoffe usw. Gleichzeitig sollen die Wechselwirkungen der elektromagnetischen Wellen mit dem Material basierend auf Simulationen untersucht werden. Damit werden zwei Ziele verfolgt:

1. Erstellen eines einfachen Konstruktionsmodells mit Messparametern basierend auf den Messergebnissen.
2. Validierung mit Hilfe einer 3D-Modellierung basierend auf den elektrischen Eigenschaften der Materialien.

Um die Ziele des Projektes zu erreichen, wurden die folgenden Arbeitspakete definiert:

- AP 1: Ermittlung des Leistungsverhalten für die Demonstrationen
- AP 2: Entwicklung und Aufbau eines Messstandes für die Bestimmung der elektromagnetischen Eigenschaften
- AP 3: Charakterisierung der Messparameter und der elektromagnetischen Eigenschaften der Benchmark-Produkte
- AP 4: Probenherstellung und -prüfung
- AP 5: Entwicklung eines vereinfachten physikalischen Modells für die Vorhersage der elektromagnetischen Eigenschaften
- AP 6: Entwicklung einer Methode für die genauere elektrische Charakterisierung von ICF-Verbundbauteilen
- AP 7: Erstellung eines Auslegungstools für ICF-Verbundbauteile mit maßgeschneiderten EM-Eigenschaften
- AP 8: Validierung des Auslegungstools durch Herstellung und Prüfung der Demonstrationen
- AP 9: Wissenschaftliche Publikation

3 Stand der Forschung

3.1 Verbundwerkstoffe aus Carbonfasern

In Kapitel 3.1 werden die am weitesten verbreiteten Produktionsprozesse für CFK beschrieben. Die Darstellung dieser Prozesse ist wichtig, um die Gründe für die Entstehung von C-Faserabfall aufzuzeigen. [GVW15]

Die Mehrheit der CFK wird in strukturellen Leichtbauanwendungen eingesetzt. Der hohe Preis von C-Fasern begrenzt einen weiteren Einsatz weitestgehend. Zur Herstellung des Prepreg werden Endrohrlasern zu festen Halbzeugen verarbeitet. Anschließend wird das Halbzeug zugeschnitten und mit einer thermoset- oder duroplastischen Matrix beschichtet. Diese bilden in diesem Zusammenhang eine eigene Materialgruppe, die als „Matrixverstärkte Komposite“ bezeichnet wird. Anschließend wird die Matrix thermisch oder chemisch ausgehärtet, um den Produktionsprozess abzuschließen. [The12], [LBN12], [M+H], [M+17]

Abbildung 3.1 zeigt beispielhaft einen Endrohrlasern-FBK-Produktionsprozess.

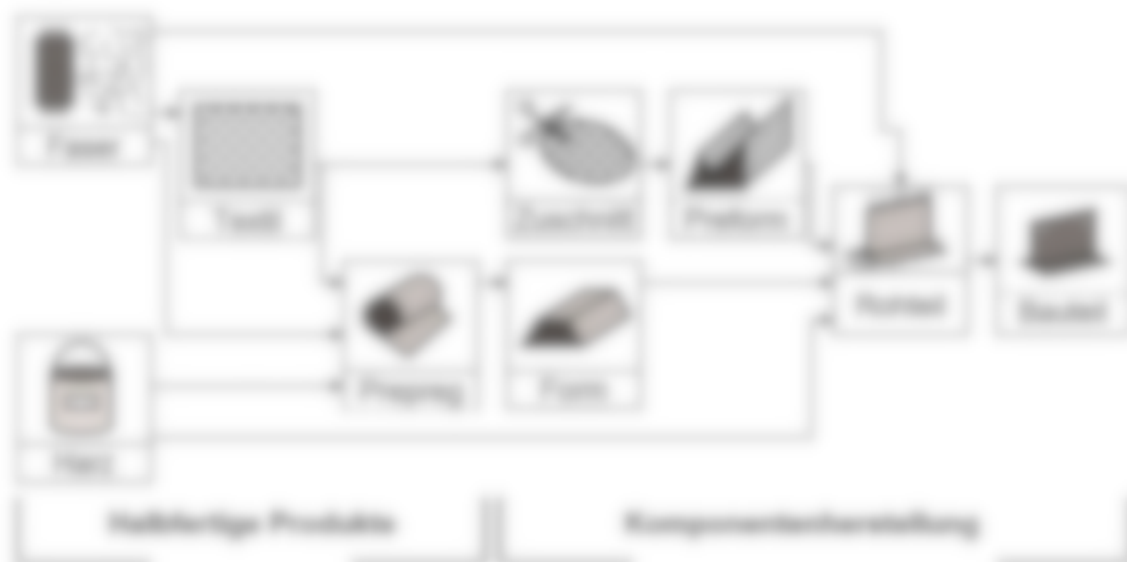


Abbildung 3.1: Produktionsprozess von FBK in Anlehnung an [LBN12]

Duroplastische Matrixsysteme sind aktuell am weitesten verbreitet. Die beherrschende Dominanz der Duroplaste ist hauptsächlich in der höheren Stabilität sowie des geringeren Gewichts begründet. Thermoplastische Matrixsysteme erfahren jedoch ein stetiges Wachstum. Dieses Wachstum ist durch kürzere Produktionszyklen und wird

reduzierte Kosten der thermoplastischen Systeme begründet. Weiterhin ermöglicht die thermoplastische Möglichkeit der späteren Verformbarkeit neuer Einzelgetriebe, die für konventionelle Systeme nicht verfügbar sind. Daher werden auch zukünftig konventionelle Systeme zunehmend durch thermoplastische Metalle ersetzt. (BfW 14) (Dlr 12) (LBM 12) (W 14) (Dlr 17) (Dlr 18)

Dieser generiert ein Produktionsprozess (wie in Abbildung 3.1 dargestellt) einen Materialverlust von ~ 20 %. Dieser Ausschuss entsteht dadurch, dass teils Halbzeuge großflächig produziert und anschließend zugeschnitten werden. Dabei stellt sich dieser Produktionsverlust als wirtschaftlicher im Vergleich zu verschleißbaren, zugeschnittenen Produktionsprozessen heraus. (W 14) (Dlr 12) (LBM 12)

C-Fasern können nicht chemisch oder thermisch aufgelöst und wieder neu als Endprodukt ausgewonnen werden. Daher fallen C-Faserabfälle immer als Faserabfälle an. Aus diesem Grund stellt die wachsende Menge an C-Faserabfall ein zunehmendes Problem dar. (W 14) (Dlr 12) (LBM 12) (Dlr 17)

3.2 Recycling von C-Fasern (rCF)

Nach einem Produktzyklus fallen Carbonfaserabfälle in der Regel als CFK-Bauteile an (Bsp.: Autoverkleidung, Sportutensilien etc.). Neben den Abfällen aus Produktzyklen, kommt er bereits bei der Herstellung von Carbonfasern oder CFK-Bauteilen zu Produktionsabfällen.

Produktionsabfälle bestehen sich durch hohe Sortenvielfalt aus und können sowohl als Isoliere (zur Carbonfasern) oder unzugelassene und unzugelassene Metallwerkstoff bzw. zugelassene (CFK-Bauteile) Abfälle entstehen. Technische Produktionsabfälle sind Schnitzabfälle von Carbonfasern, welche noch nicht mit der jeweiligen Matrix in Kontakt gekommen sind. Unzugelassene Produktionsabfälle sind CFK-Bauteile als Zuschritt und aus wirtschaftlichen Produktionen. Ausgelassene CFK-Abfälle entstehen durch das Erreichen des Endes des Produktzyklus von verschiedenen Produkten (Bsp.: Autokarosserie, Fahrradler etc.). (BfW 14)

3.2.1 Mechanisches Recycling

Technische Produktionsabfälle werden mechanisch zerkleinert und als Füllstoffe oder Verdichtungsfasern verwendet. Eingewertet werden Isoliere Produktionsabfälle als Zuschlag für Sortierungsprozesse, Baustoffe oder Pressmassen. (BfW 14)

Die Zerkleinerung von trockenen Carbonfasersprengelagern erfolgt in zwei Stufen. Die Fasern werden erst grob danach fein bzw. ultrafein zerkleinert. Die Grobzerkleinerung erfolgt durch scherende, schneidende oder rollende Beanspruchung (M11).



Abbildung 3.2: Übersicht über mechanische Recyclingprozesselemente. In Anlehnung an [M11].

Obwohl die Aggregate zur Zerkleinerung auf eine bestimmte Beanspruchung ausgelegt sind, bildet meist eine Kombination der genannten Beanspruchungen statt. Nach der Grobzerkleinerung haben die Fasern eine Länge von ≈ 100 mm. Die Ultrafeinzerkleinerung durch vorwiegend scherende Beanspruchung kann beispielsweise durch eine Rollschere realisiert werden. Eine Rollschere besteht aus zwei Walzen die gegeneinander rotieren. Die Walzen sind mit Schneidkanten ausgerüstet, welche geometrisch so angeordnet sind, dass die Walzen sich bei der Drehung nicht blockieren können. Die Aufgabe wird von den Walzen erfasst und durch die Schneidkanten zwischen den Walzen zerkleinert. Unter den Walzen verlässt das zerkleinerte Material die Rollschere. Das Prinzip der Rollschere ist in Abbildung 3.3 dargestellt. [M11].

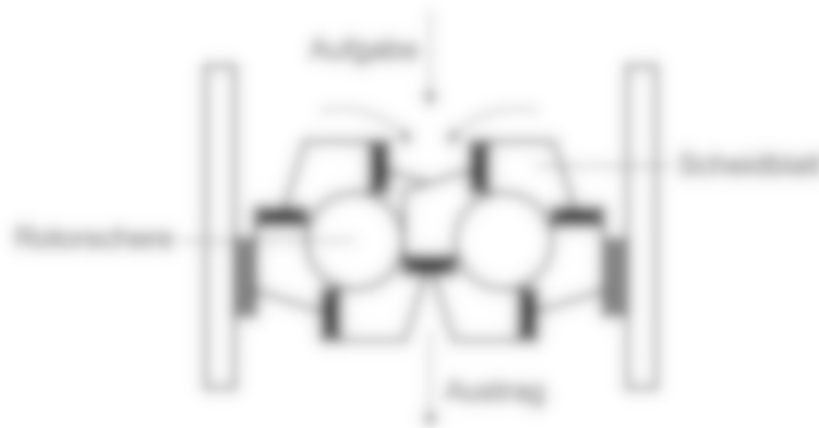


Abbildung 3.3: Prinzipskizze einer Rollschere

Für die Grobzerkleinerung über eine schneidende Beanspruchung eignet sich beispielsweise ein Erweichenzerkleinerer. Der Erweichenzerkleinerer besteht aus einer Walze mit Schneidblättern, einem Gehäusemesser, einem Deck und einem Schaber. Durch die Drehung der Walze wird der Abfall zwischen den Schneidblättern und dem Gehäusemesser geschritten. Unter dem Rotor ist das Deck angebracht um nicht ausreichend zerleinerte Stücke abzufangen. Das Prinzip des Erweichenzerkleinerers ist in Abbildung 3.4 dargestellt. (M211)



Abbildung 3.4: Prinzipskizze eines Erweichenzerkleinerers

Die Fein- bzw. Mittelzerkleinerung wird über verschiedene Ausführungen von Mühlen realisiert. Nach Fein- oder Mittelzerkleinerung ist die Länge der Carbonfasern, je nach Einstellung der Zerkleinerungsgruppe, auf 5 - 100 mm reduziert. In Abfallwirtschaft werden häufig Hammermühlen verwendet. Hammermühlen eignen sich besonders für spröde Materialien, da die mechanische Zerkleinerung über Prall erfolgt. Durch die Prallzerkleinerung ist die Hammermühle ungeeignet für die vorwiegend elastischen

Carbonfasern. Die Schweißbrücke ist für die Zerkleinerung von Carbonfasern besonders geeignet, da die Zerkleinerung vorwiegend schweißend erfolgt. (23/14)

Eine Schweißbrücke besteht aus einem zentralen, mit Messen ausgestatteten Rohr und um das Rohr angeordneten Messen (Stabmessern). Unter dem Rohr ist ein Deck angebracht, das auf die gewünschte Austragsgüte eingestellt werden kann. Die Zerkleinerung findet durch Schweißen zwischen den Stabmessern und dem Rohr statt. In Abbildung 1.0 ist das Prinzip der Schweißbrücke dargestellt. (24/14)

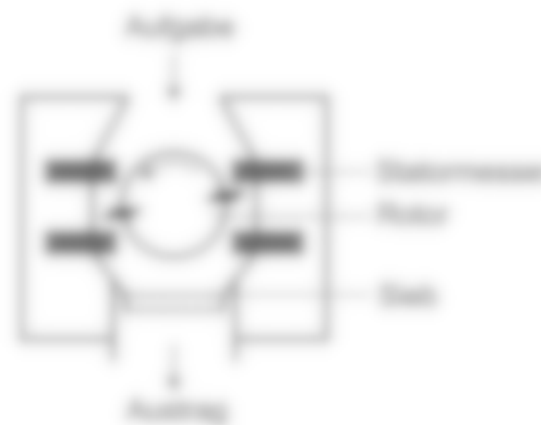


Abbildung 1.0: Prinzip einer Schweißbrücke

Nach der mechanischen Zerkleinerung sind die Eigenschaften der Carbonfasern verändert. Messungen wurden an Fasern durchgeführt. Die Höchstzugkraft ist verringert oder die Reißdehnung verringert. In Tabelle 2.1 ist ein Vergleich der Materialeigenschaften von neuen Carbonfasern und recycelten Carbonfasern dargestellt. (25/14)

Tabelle 2.1: Materialeigenschaften von neuen Carbonfasern und recycelten Carbonfasern

Eigenschaft	Neue Carbonfasern	IGF
Zugkraft (N)	1.100	1.100
Zugdehnung (%)	1.100	1.100
Reißdehnung (%)	1.100	1.100
Reißkraft (N)	1.100	1.100
Reißdehnung (%)	1.100	1.100
Reißkraft (N)	1.100	1.100
Reißdehnung (%)	1.100	1.100

3.2.2 Thermisches Recycling

Bei unausgehärteten und ausgehärteten CFK-Abfällen muss die Carbonfaser von der Matrix getrennt werden. Zur Trennung von Matrix und Carbonfaser gibt es zwei wesentliche Verfahren: Pyrolyse und Solvolyse. Vor der Pyrolyse bzw. Solvolyse müssen die CFK-Abfälle zerkleinert werden. Die Zerkleinerung erfolgt nach den in Kapitel 3.2.1 beschriebenen Verfahren [2014].

Bei der Pyrolyse werden die unterschiedlichen Zersetzungstemperaturen von Carbonfaser und Matrix genutzt. Die Pyrolyse läuft bei ca. 800 °C ab. Die Matrix verbrennt. Die Carbonfasern zersetzen sich erst bei 2000 °C und bleiben erhalten. Um die Oxidation von Carbonfasern bei 800 °C zu umgehen, erfolgt der Prozess in einer Inertgasatmosphäre mit Stickstoff [2014].

Eine technische Anlagenausführung der Pyrolyse ist der Drehrohrendler. Der Drehrohrendler ist ein von außen beheiztes Stahlrohr. Der Wärmeeintrag in das Stahlrohr findet über einen Heizmantel statt. Durch die Beheizung mit Heizmantel dringt keine potentielle Verkohlung in den Drehrohrendler ein. Das Stahlrohr ist leicht geneigt und transportiert das Pyrolysematerial durch Drehung um die eigene horizontale Achse. Das zersetzte Material verlässt am Auslauf des Drehrohrendlers. Bei der Pyrolyse entstehende Gase werden abgezogen und aufbereitet. In Abbildung 3.8 ist das Prinzip des Drehrohrendlers dargestellt [2011].



Abbildung 3.8: Prinzipskizze eines Drehrohrendlers

3.2.3 Chemisches Recycling

Die Solvolyse löst die Matrix von den Carbonfasern mit einem Lösungsmittel. Die CFK-Abfälle werden zerkleinert und in ein geeignetes Lösungsmittel (Propandiol) gegeben. Das Lösungsmittel muss an die jeweilige Kunststoffmatrix angepasst werden. Die Mischung

wird unter Druck erhitzt bis das Lösungsmittel die Matrix löst. Die Matrix wird im Lösungsmittel gelöst und die Carbonfasern bleiben als Feststoff zurück. Die Schmelze benötigt im Vergleich zur Pyrolyse weniger Energie. Zur vollständigen Gewinnung der Carbonfasern sind zusätzliche Aufbereitungsschritte nötig, um das Lösungsmittel von der Carbonfasern zu trennen. (2014)

Die zusätzliche Aufbereitung des Lösungsmittels gestaltet sich sehr aufwendig und ist in der Ausführung wenig wirtschaftlich. Ein weiteres Problem der Schmelze ist die Anpassung des Lösungsmittels an die Kunststoffmatrix. Um ein optimales Ergebnis zu gewährleisten, sollte der CFK-Anteil möglichst gering sein. Zusätzlich werden häufig komplexe Kunststoffe als Matrixwerkstoff verwendet, welche sich nur bedingt durch die Schmelze entfernen lassen. (2014)

Aus Pyrolyse und Schmelze gewonnene Carbonfasern können als Verstärkungsfasern in thermoplastischen Polymeren genutzt werden. Weitere Verwendungsmöglichkeit der Carbonfasern sind Vliesstoffe. Die Vliesstoffe werden zur Verbesserung der Oberflächenqualität von CFK-Bauteilen genutzt oder direkt als Verstärkungselement. (2014)

3.3 Herstellung von Vliesstoffen

Das nachfolgende Kapitel gibt eine Übersicht über die Vliesherstellungsprozesse.

Besondere Fokus liegt dabei auf den Prozessen welche im Rahmen des Projektes genutzt wurden.

3.3.1 Definition von Vliesstoffen

„Ein Vliesstoff ist ein Fächergewebe aus Fasern, Endstoffamenten oder geschüttelten Garnen gleicher Natur oder gleicher Ursprungs, die in ein Vlies geflochten und verfestigt werden und, mit allen möglichen Mitteln, außer durch Weben, Wirken oder Stricken.“ (2012)

Von dieser Definition ausgenommen sind Papiere. DIN EN 91 210 Teil 1, DIN EN 91 200, DIN EN 2000 und DIN EN 91 200 2012 01 fordern, dass Vlies vollständig oder zumindest zu einem großen Anteil aus Fasern bestehen. In Anlehnung an DIN 91 20 Teil 1 müssen jedoch nur diejenigen Teile des Vlieses aus Fasern bestehen, die die

Übergangswerte bestimmen / definieren. In diesem Fall sollen die Fasern ein Schmelzverhalten von maximal 200 aufweisen. (2P/12 Punkte)

Diese unterteilt sich in zwei Hauptklassen, deren Unterteilungsdetails die Länge der Hauptkette angibt:

- Stapelfasern
- Spinnfasern (Vordruckfasern)

(2P/12 Punkte)

In der nachfolgenden Abbildung 3.7 sind die verschiedenen Herstellungsverfahren integriert:



Abbildung 3.7: Unterteilung Faserherstellungsverfahren

Im Rahmen des Projektes lag der Fokus auf dem Kardierverfahren.

3.3.2 Kardierverfahren

Ziel des Kardierverfahrens ist die Auflösung der Faserflocken bis hin zur Einzelfaser und die anschließende Bildung eines zusammenhängenden Faserflores. Das Prinzip einer

rotierenden Karte aus mit Krallen besetzten Zylindern geht auf ein Patent aus dem Jahre 1766 zurück. Die Grundelemente, Hauptkomponenten Karte, sind

Hauptbestandteil Arbeiter-Maschinen, werden heute noch für die Herstellung verwendet (M12).

Es sind auch folgende Definitionen für die Funktion einer Koppel gegeben: „Die Koppel hat die Aufgabe, die aus der Faseröffnung resultierende Spannung einer vorliegenden Fasermasse in eine gestreckte und gestreckte Faserlage zu bringen. Dies soll bis zur Einzelhaar erfolgen, also ein Entwirren der Flocken und Faserbündel erlauben. Die Auflösung soll ebenfalls so erfolgen, dass eine Parallel- oder eine Wirrlage entsteht. Dies geschieht in der Regel in der zweidimensionalen Ebene (MD = Machine Direction) und quer (CD = Cross Direction) zur Maschinenaufrichtung. Anschließend werden die Einzelhaare gestreckt zu einem zusammenhängenden Faserstrang zusammengeführt, um diesen dann zum weiteren Verarbeitungsprozess transportieren zu können (M12).“

Daraus lassen sich die vier Hauptaufgaben einer Koppel ableiten (M12):

- Die korrekte Zuführung der Faserflocke je Zylinder über Länge und Breite
- Das Öffnen und Ausschleusen von Fremdkörpern, wie z. B. Schmutz und Klumpen bei Sekundärfasern
- Das Öffnen der Faserflocke bei minimaler Faserbeanspruchung bis hin zur Einzelhaar
- Das Ordnen der Faser in Faser mit bestimmter Faserlage in Maschinenaufrichtung als Parallelfaser oder mit unbestimmter Faserlage als Wirrlaser

Eine grundlegende Anordnung der Rollen, wie sie in vielen Anlagen verwendet wird ist in der folgenden Abbildung 3.8 skizziert:



Abbildung 1.8: Anordnung der Rollen in einer Kringelmaschine (in Anlehnung an [Pul1])

Grundsätzlich benötigt eine Kringel eine Spinnung, durch die die Fasern dem Einzug der Kringel zugeführt werden. Der Einzug gibt die Fasern auf den Tambour (Hauptwalze). Die Arbeiter-Walzen-Paare nehmen die Fasern wiederum vom Tambour ab und geben sie auch wieder auf diesen zurück. Der Faserfloss wird dann durch die Arbeiter von Tambour abgenommen [Pul1].

Das Hauptmerkmal der Qualität eines Faserflosses ist dessen Gleichmäßigkeit. Da eine Kringel bei optimalen Betriebsparametern keine Unregelmäßigkeiten erzeugt, hat die Spinnung einen großen Einfluss auf die Qualität [Pul1]. Eine gleichmäßige Spinnung ist somit Voraussetzung für einen gleichmäßigen Faserfloss.

Das eigentliche Kardieren wird in heutigen Anlagen größtenteils mit Wasserstrahlen durchgeführt. Für ein optimales Ergebnis sind vor allem die Zahnabmessungen der Garder und die Zähne- bzw. Spitzenzahl pro Flächeneinheit auf der Walze von Bedeutung. In der nachfolgenden Abbildung 1.9 sind die wichtigsten Größen einer Garder dargestellt.



Abbildung 1.8: Wichtige Größen einer Faser (Quelle?)

Das beste Ergebnis wird erreicht, wenn die Zahl der Spitzen mit zunehmender Öffnungszeit der Faserhülle steigt. Überbleibsel von Befestigung ist die Faserhülle, die für mehrere Fasern mehr Spitzen benötigt werden. Weiterhin haben die Anzahl der Faser-Spitzen (Abstände-Wander-Paare auf der Haupttrasse), die Geschwindigkeit der Waben und deren Durchmesser und die Faserbeladung in g/m³ der Haupttrasse Einfluss auf den Faser-Vorgang (P 12).

Für den Faser-Vorgang zwischen Haupttrasse und Abstreifenwabe sind die Geschwindigkeitsdifferenz der Waben und die Faserkräfte, die auf die Faserhülle wirken, entscheidend. Die Faserkräfte werden maßgeblich von der Größe des Faserkopfes und dem Winkel von Abstand der Waben zueinander beeinflusst. Übertrag der Faserkraft, die auf die Fasern wirkt, die Faserkräfte zwischen den Fasern, um die Abstreifen einen Teil der Fasern von der Haupttrasse ab. Grundsätzlich sollte die Geschwindigkeit eines Abstreifers möglichst hoch sein, da so mehr Fasern pro Zeitintervall abgenommen werden können und gleichzeitig die Fasern am wenigsten beansprucht werden. Die gegenüberliegende laufende Wander-Wabe übernimmt die Fasern vom Abstreifer, windet sie und führt sie wieder der Haupttrasse zu. Durch mehrere Abstreifer-Wander-Paare kann der Vorgang mehrfach wiederholt werden. Währenddessen werden die Fasern zu Wirlen ausgerichtet und durchmischt. Als Richtwert für die Menge an Fasern, die von Abstreifer von Tandem abgenommen werden, wird in der Literatur ca. 10% angegeben (P 12).

Der Vorgang zwischen Haupttrasse und Abstreifer-Wander-Paar ist in der folgenden Abbildung 1.9 dargestellt.

Vorteil der mechanischen Verfestigung ist die Anwendbarkeit auf alle beliebigen Faserverhalten und -mischungen sowie Vliesstrukturen. Nachteil ist die hohe mechanische Belastung der Fasern während der Verfestigung (Frost/T) (PFI12)

3.4.2 Chemische Verfestigung

Bei der chemischen Verfestigung wird die Verfestigung durch Verkleben der Fasern durch Binderpolymere erzeugt. Typischerweise werden folgende Binderpolymere eingesetzt:

- Vinylpolymere und Co-Polymere
- Acryl-Ester-Polymere und Co-Polymere
- Kautschuk und
- Stärke

Die Auswahl Beschichtungsverfahren hängt primär von der Wahl des Binderpolymers ab. Aufgrund der Fülle der möglichen Anwendungsfälle können nicht alle Verfahren im Rahmen dieses Berichts präsentiert werden.

Vorteil der chemischen Verfestigung ist die erweiterte Anwendbarkeit auf alle Faserverhalten und -mischungen sowie Vliesstrukturen. Nachteil ist die Einbringung einer zusätzlichen Mineralienkomponente in Vlies. Diese Mineralienkomponente übt einen (z.T. unerwünschten) Einfluss auf die finalen Eigenschaften des Vlieses. Beispielhaft wird nachfolgend der Prozess zur Aufbringung einer chemischen Bindung skizziert. Frost-Tiefenbindungen oder Spritzbeschichtungen sind ebenfalls prominente Prozesse in industriellen Anwendungen. (PFI17)



Abbildung 3.12: Chemische Beschichtung (Horizontale überflutete Spalt-Verfäbrung), in Anlehnung an [Fuss17]

3.4.3 Thermische Verfestigung

Um das thermische Verfahren zur Vliestoffverfestigung anwenden zu können, muss das Vlies thermoplastische Fasern enthalten. Die thermoplastische Anteil der Fasern wird

als Binder genannt. Wichtige Eigenschaften des Binders sind hohe Schmelzgeschwindigkeit, geringes Schrumpfen in Schmelzlage und ein enger Schmelzbereich. Unter Hitzebestrahlung wird der Binder aufgeschmolzen. Der aufgeschmolzene Binder fließt in Hohlräume zwischen den restlichen Fasern und verbindet damit die Fasern. Danach wird das Vlies abgekühlt. [Fuss17]

Im Bereich der thermischen Vliestoffverfestigung haben sich zwei Verfahren durchgesetzt: Kalenderverfestigung und Heißluftverfestigung. Bei der Kalenderverfestigung wird das Vlies zwischen zwei erhitzten Walzen durchgeführt. Diese Walzen verformen das Vlies zusätzlich. Das Kalenderverfahren eignet sich besonders für Vlies von geringer bis mittlerer Dicke (< 3 mm). Bei zu dicken Vliesen kann die Wärme der Walzen nicht mehr ausreichend in das Vlies eindringen, was zu einer unzureichenden Verfestigung führt. In Abbildung 3.13 ist das Kalenderverfahren dargestellt. Nachfolgend wird das behavete Kalenderverfahren schematisch dargestellt. [Fuss17] [NF12]



Abbildung 3.13: Schmelzspinnverfahren. Schematische Darstellung, in Anlehnung an [247]

Die Hochdruckverfestigung nutzt heiße Luft um die Verfestigung zu erzielen. Dabei wird das Vlies entweder durch eine perforierte Trommel, Flachblech oder ein Jet-System geführt. Die heiße Luft durchdringt das Vlies und löst die beschriebenen Verfestigungsprozesse aus. Vorteile bietet das thermische Verfestigungsverfahren besonders gegenüber dem chemischen Verfahren. Es wird weniger Wasser während dem Prozess verbraucht und die nötigen Maschinen weisen einen einfacheren Aufbau auf. [247]

3.5 Carbonfasern (C-Fasern)

Das nachfolgende Kapitel soll einen Überblick über die Eigenschaften der eingesetzten Fasermaterialien geben.

Bei C-Fasern handelt es sich um amorphisierte Fasermaterialien, die aus organischen Polymeren (z.B. Precursor) durch thermischen Abbau hergestellt werden. Der Abbauprozess endet, wenn der Kohlenstoffanteil in der Faser mind. 90 % beträgt. C-Fasern weisen einen negativen Wärmeausdehnungskoeffizienten in Faserrichtung auf. Aufgrund dieser Eigenschaft sind die Fasern besonders geeignet für den Einsatz in Hochtemperaturanwendungen. Wechselt man von diesem negativen Koeffizienten der üblicherweise positiven Koeffizienten von polymeren Materialen aus. Durch diese Kombination der Eigenschaften sind die Formstabilität von FCF deutlich gesteigert. [247], [248], [249], [250]

Um eine C-Faser herzustellen wird der Precursor in einem Sulfonierungsprozess dehydriert. Durch die Dehydrierung bilden sich Doppelbindungen auf molekularer Ebene im Precursor aus. Anschließend wird der Precursor in Carbonisierungsprozess weiter. Durch diesen Schritt wird die Schichtstruktur in der Faser aufgebaut und gestärkt.

Reinheitsgrad wird im Graphitisierungsschritt der Kohlenstofffaser durch Verdampfung und Umwandlung restlicher organischer Rückstände auf über 99% gesteigert. Der Prozess zur Herstellung einer C-Faser aus PVA-Precursem ist nachfolgend dargestellt.

Die finale molekulare Struktur der C-Faser stellt sich in Abhängigkeit der gewählten Prozessparameter ein. Vor allem die Schichtstruktur sowie der Kohlenstoffanteil hängen von den anstehenden Temperaturen, besonders während des Carbonisierungs- und Graphitisierungsschritts, ab. Die nachfolgende Tabelle gibt eine Übersicht über die relevanten Temperaturbereiche zur Herstellung der unterschiedlichen Fasertypen sowie die zugehörigen Materialeigenschaften.

In Abbildung 3.14 ist der C-Faser-Herstellungsprozess skizziert.



Abbildung 3.14 Darstellung des C-Faserherstellungsprozesses (PVA)

Carbonfasern zeichnen sich besonders durch ihre guten mechanischen Eigenschaften in Faserrichtung aus. Die Carbonfasern haben eine hohe Steifigkeit und Festigkeit. Das E-Modul von Carbonfasern beträgt zwischen 230 GPa und 400 GPa. Die Zugfestigkeit liegt zwischen 3.000 und 5.000 MPa. Eine einzelne C-Faser besitzt eine Faserdicke von 0,07 µm, sowie eine gute chemische Beständigkeit. Aufgrund ihrer Faserdicke werden C-Fasern in Form von Bündeln (z.B. Rovings) von 1.000 - 24.000 Einzellementen

verloren. Carbonfasern sind sehr temperaturstabil und elektrisch leitend, wobei die thermische Leitfähigkeit bei gechlusener C-Faser besonders ausgeprägt ist. Die elektrische Leitfähigkeit wirkt sich in der Verarbeitung von Carbonfasern oft nachteilig aus. Gerade durch die Bildung von Carbonfaserverbund gelangt Carbon in die elektrischen Komponenten der Maschinen und verursacht elektrische Störungen. (P112)

Besonders im Verbund mit Kunststoffen wie Thermoplasten (Polyamid, Polypropylen) oder Duroplasten (Epoxyd oder Phenolharz), als carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK), finden Carbonfasern Anwendung (P114). Im Vergleich mit Werkstoffen mit ähnlicher Steifigkeit und Festigkeitswerten (Stahl, Aluminium) haben CFK-Werkstoffe den Vorteil, dass sie eine geringere Dichte (1,7 bis 1,8 g/cm³) aufweisen. Somit haben CFK-Werkstoffe eine höhere gewichtsspezifische Steifigkeit und Festigkeit als vergleichbare Werkstoffe. Als Resultat finden CFK-Werkstoffe häufig Anwendung in Leichtbau. (P112)

Üblicherweise zeigen C-Fasern ein sprödes Bruchverhalten sowie einen negativen thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Diese Eigenschaften machen die C-Fasern anfällig für Quersprünge. Daher sind C-Fasern bei mechanischen Verarbeitungsprozessen wie dem Faserlegen und Kardieren einem erhöhten Faserschädigungsrisiko ausgesetzt. (P412) (P112) (P412) (P112) (P412)

3.6 Elektromagnetische Schirmwerkstoffe

Elektromagnetische Felder werden aufgrund wachsenden Einsatzes verschiedenster Techniken in der heutigen Zeit eine immer bedeutendere Rolle. Daher sind auch die rechtlichen Vorgaben in den letzten Jahren angepasst worden.

Sowohl für die allgemeine Bevölkerung als auch geschultes Personal im Umgang mit elektromagnetischer Strahlung existieren bestimmte Grenzwerte für elektromagnetische Felder (EMF). Die gesetzliche Grundlage bilden die Empfehlungen des EU Rates vom 12. Juli 1986 zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (2 Hz – 300 GHz) (1986/609/EG) und die Richtlinie für die Begrenzung der Exposition durch zeitlich veränderliche elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder bis 300 GHz (2013).

Werte werden in Form von Abweichungsbedingungen, wie sie z. B. durch die Berufsgenossenschaften (BGR) vorgeschrieben werden, weitere Grenzwerte Zellen sind in diesem Standard Grenzwerte für die elektromagnetische Verträglichkeit von Geräten festgelegt. In ähnlicher Weise ist es notwendig, die Abstrahlung elektromagnetischer Wellen entweder zu verhindern oder zumindest zu minimieren. Verantwortlich sind dafür die Hersteller von elektrischen Geräten bzw. der Betreiber elektrischer Anlagen. Die Maßnahmen dienen zum einen dem Schutz der Bevölkerung, zum anderen der Vermeidung von Störungen anderer technischer Einrichtungen.

Abhängig vom Anwendungsfeld und der Frequenz sind die Anforderungen an die Schirmung nicht unterschiedlich. Die Randbedingungen sind sehr unterschiedlich wie z. B. das Gewicht und die Umwelteigenschaften (Temperatur, Korrosion und verschleiß). In vielen Fällen erfolgt im Fall von schwingungsgebundenen Störungen, z. B. abstrahlenden Störungen, die Schirmung über ein metallisches Gehäuse. Dabei ermöglicht ein vollständig geschlossenes Gehäuse ohne Fugen und mit ausreichender Dicke die bestmögliche Schirmung. Allerdings ist oftmals gar keine vollständige Schirmung notwendig, z. B. wenn nur ein bestimmter Grenzwert eingehalten ist oder wenn die abgestrahlte Leistungsdichte nur gering ist. In solchen Fällen können beispielsweise metallbeschichtete Kunststoffteile oder auch abschirmende Materialien zum Einsatz kommen. In anderen Fällen ist es weiterhin notwendig, Luftkavitäten oder offene Türen zu gewährleisten. Dabei verwendet man auf die abstrahlende Frequenz angepasste Materialien oder metallisierte Oberflächen.

Die Höhe der Schirmwirkung eines Materials ist abhängig von der Dicke bzw. der Dicke des Materials und von der abstrahlenden Frequenz. Eine Auswahl zur Verfügung stehender Materialien zur elektromagnetischen Schirmung ist in Tabelle 3.2 dargestellt.

Tabelle 3.2: Verfügbare Materialien zur EM-Abschirmung und deren Defekte (M11)

Material	Defekt
Stahlblech glatte	Schwer ($7,8 \text{ g/cm}^3$), nicht für Leichtbau geeignet
Aluminium	Korrosionsfähig Niedrige mechanische Festigkeit Leichte Beschädigung durch Kratzer Nur für hohe Frequenzen geeignet ($> 1 \text{ GHz}$) Teuer ($20 - 40 \text{ €/m}^2$)
Bestehende Carbonfasern Fasern mit Kohlenstoff	Empfindlich Verlust der Wirksamkeit bei Abplatzern der Beschichtung Gesundheitsschädlich durch Freisetzung der Substanzen (z. B. NIKK)
Leitfähige Beschichtung Kunststoffsubstrat	Aufwändige Herstellung, teuer Hohe Anfälligkeit gegenüber Beschädigung

In [M11-12] wird erstmals von nicht näher erläuterten Carbonfasern „Schichten“ für die Schirmung elektromagnetischer Strahlung berichtet. Es wurden Schirmwertungen von bis zu 40 dB bei Flächenengewichten von 100 g/m^2 erreicht. Es wurde zudem beobachtet, dass eine Kombination zweier voneinander isolierter Schichten mit hohem Flächengewicht, z. B. zweimal 50 g/m^2 eine signifikante Steigerung der Schirmleistung auf bis zu 70 dB erreicht wird [M11-12].

In Versuchen an der RWTH Aachen wurden Vliesstoffe aus PEEK- und PPS-Carbonfasern hergestellt und hinsichtlich ihrer Schirmwirkung und Reflexion untersucht [M11-13]. Die Vliesstoffe wurden im ungeschichteten Zustand gemessen. Die Ergebnisse in Abbildung 3.15 zeigen eine Schirmwirkung von bis zu 100 dB für einlagige Vliesstoffe aus CF mit einem Flächengewicht von 30 g/m^2 im betrachteten Frequenzspektrum. Es ist zu beachten, dass die Vliesstoffe aus pyrolysierten Fasern eine $20 - 40 \text{ dB}$ höhere Schirmwirkung erzielen. Es wird davon ausgegangen, dass der Grund für die höhere Schirmwirkung insbesondere in der höheren Leitfähigkeit der Vliesstoffe infolge der Schichten (als verstreuten) Schichten auf den Fasern zurückzuführen ist.

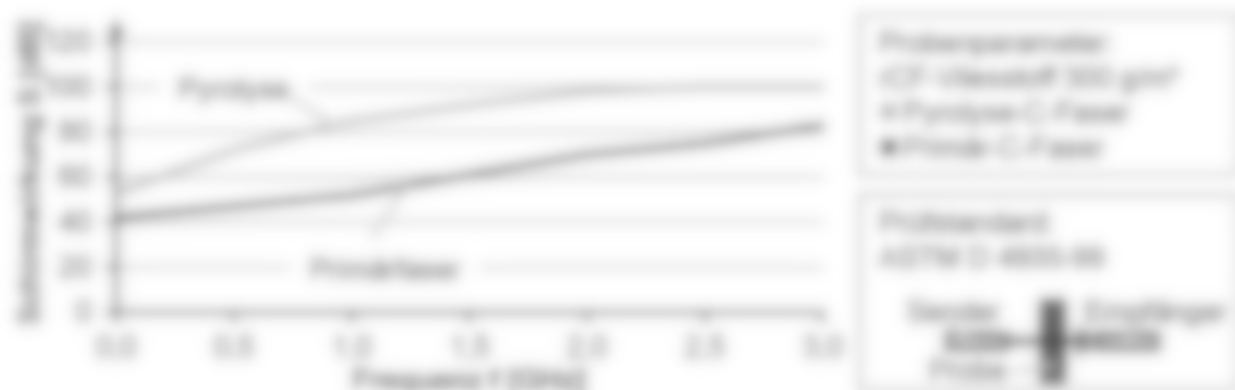


Abbildung 3.15: EM-Schirmwirkung von Vliesstoffen aus Pyrolyse- und Pyrolyse-ICF

In Abbildung 3.16 ist eine Versuchsanlage zur Reflexion von EM-Wellen an ICF-Vliesstoffen und einer Eisenplatte dargestellt. Die Eisenplatte reflektiert nahezu 100 % der Wellen. Die Amplitude der von dem ICF-Vliesstoff reflektierten Wellen ist um rund 40 dB geringer.

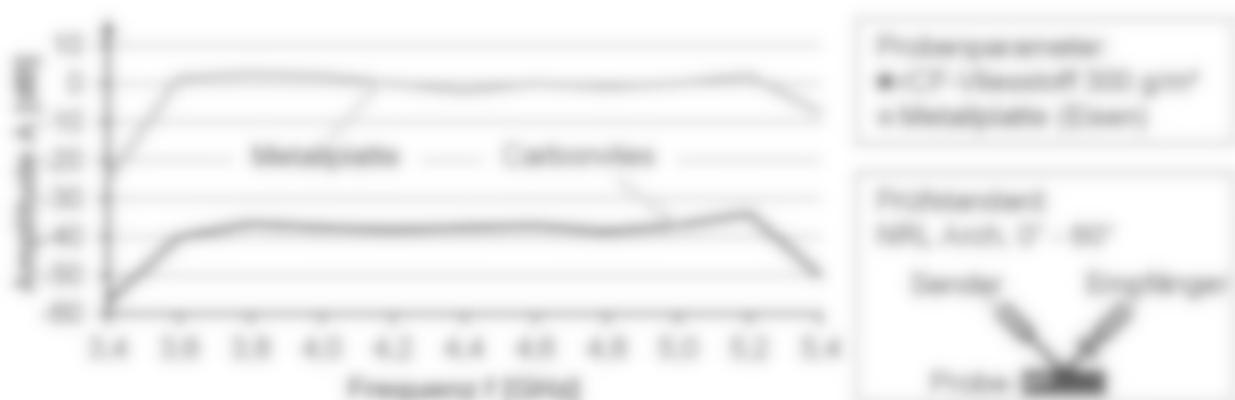


Abbildung 3.16: Reflexion von EM-Strahlung durch Metall und ICF-Vliesstoff

Die exakte Zusammenhänge zwischen Schirmung, Reflexion, Transmission und Absorption mit den Werkstoff-, Herstellungs- und Füllungsparametern ist bisher nicht bekannt.

3.7 Zusammenfassung

Im vorangegangenen Kapitel wurde ein Überblick über den aktuellen Stand zur Verarbeitung von recycelten Carbonfasern gegeben. Dabei wurde zunächst ein Überblick zur Herstellung von CFK gegeben und anschließend wurde verschiedene Arten des Recyclings von Carbonfasernähten erläutert.

Es wurde die Prozesskette zur Weiterverarbeitung von ICF zu Kunststoffen dargestellt. Dabei spielen sowohl die Herstellung als auch die Verfestigung eine wichtige Rolle.

Zudem wurden verfügbare elektronenmikroskopische Schichtenhersteller und ihre Eigenschaften dargestellt. Dabei wurden sowohl Vor- als auch Nachteile beleuchtet.

4 Ermittlung des Lastenheftes für die Demonstratoren (AP 1)

Das Lastenheft für die Demonstratoren unterscheidet sich stark je nach Anwendung. Durch die Eigenschaften der neuartigen Carbonfasern sind mehrere Anwendungsfelder möglich. Im Rahmen der Gespräche mit den beteiligten Industriepartnern haben sich besonders auf den Hauptanwendungsbereichen Schwingung und Reflexion die Bestimmung der nachfolgenden physikalischen Eigenschaften als notwendig erwiesen:

Transmission

Diese ist vorrangig für Schwingungsmaterialien entscheidend. Dabei wird eine möglichst hohe Dämpfung, d.h. eine niedrige Transmission angestrebt. Die Schwingung ist hauptsächlich relevant für niedrigere Frequenzen von einigen 100 MHz bis ca. 10 GHz, wo sie typischerweise in Rundfunk- und Kommunikationsbereichen verwendet werden, z.B. TV, Radio, DAB, Mobilfunk, WLAN, Amateur- oder CB-Funk.

Reflexion

Die Reflexion ist ebenfalls ein Mechanismus, der zur Abschirmung verwendet werden kann, das Hauptanwendungsfeld liegt hier allerdings eher im Radarbereich, z.B. zur gezielten Sichtbarmachung von Objekten (Verkehrsmittelbereich liegt: Automobilradar, Flugabwehr). Dabei sollen die Reflektoren gezielt in Richtung des Senders (Radar) ausgerichtet sein, d.h. sogenannte Reflektor oder zumindest gerichtete Reflektor.

Diffuse Reflexion

Die diffuse Reflexion ist hauptsächlich ausgerichtet, um die Radarerkennungseigenschaften eines Objekts zu reduzieren, z.B. um Objekte wie Flugzeuge oder Schiffe auf dem Radar möglichst wenig sichtbar zu machen. Man möchte also gerade erreichen, dass die ankommende Welle nicht zum Sender zurück reflektiert wird. Das wird durch die diffuse Reflexion erreicht, d.h. die ankommenden Leitungsanteile werden möglichst in alle Richtungen gestreut.

Absorption und diffuse Reflexion

Die Absorption im Material reduziert sowohl die Transmission als auch die Reflexion, die ankommende Leitungsanteile durch die Verluste des Materials in Wärme umgewandelt werden. Damit hat die Absorption einen Einfluss auf die Schwingung und auch die Rückstrahlung, allerdings ist sie in der Regel von untergeordneter Bedeutung. Als

möglicher Einsatz in reflexionslosen Räumen (Hochfrequenzkammern, Antennenkammern, EMV-Kammern) ist die Absorption jedoch die entscheidende Größe. Hier muss erreicht werden, dass möglichst wenige Reflexionen stattfinden. Darüber hinaus kann die Absorption vor allem im Mikrowellenbereich um 2,45 GHz bei hohen Leistungen auch gezielt zur Erwärmungszwecken ausgenutzt werden.

Tabelle 4.1: Überblick über das Leistungsverhalten der Demonstratoren

Anwendung	Welle Frequenz	Welle reflexionslos	Welle reflexiv	Absorber	Erwärmung
Frequenz [GHz]	0,1 – 10	4-40	24 / 10-20	0,1 – 40	0,5 – 2,5
Transmission [dB]	+ 20	nicht def.	nicht def.	nicht def.	nicht def.
Reflexion [dB]	nicht	+ 10 ²	+ 10 ²	+ 20	nicht def.
Verlustkoeffizient	nicht	nicht def.	nicht def.	nicht def.	+ 0,10
Anzeige	nicht	Sensoren	Sensoren	Leuchtdioden	Wärme
	Druckkopf	keine, nicht	keine	schwarz	beständig
	keine	Druckkopf		weiß	
		keine		keine	beständig

Basieren auch auf der Verbesserung des ursprünglichen RCS-Wertes.

Zusätzlich wurde zur Einordnung der späteren Ergebnisse eine umfangreiche Recherche zu den am Markt verfügbaren Schwingungsmaterialien durchgeführt. Dabei wurden vorrangig Preis, Schwingung und Gewicht betrachtet. In der nachfolgenden Tabelle sind die Ergebnisse der Recherche nach Materialkategorien zusammengefasst.

Tabelle 4.2: Verfügbare Schwingungsmaterialien (zusammengefasst)

	n Preis [€]	n Schwingung [dB]				Gewicht [g/cm ³]
		+ 1 [dB]	+ 2 [dB]	+ 3,3 [dB]	+ 5 [dB]	
Verbleibend	20,00	27	24	24	24	24
Fluss	100,00	28	22	22	22	200,00
Leinwand	20,00	27	22	22	22	120,00
Leinwand	40,00	27	22	22	22	140,00
Fluss	40,00	27	22	22	22	20,00
Fluss	20,00	28	22	22	22	200,00
Fluss	20,00	28	22	22	22	20,00

Es ist zu erkennen, dass Vliesstoffe einige Vorteile gegenüber anderen Materialien haben. Vliesstoffe sind zum einen günstiger als vergewichtete Materialien und in der meisten Fällen auch leichter. Dabei haben sie trotzdem eine überdurchschnittliche Schwingdämmung. Bei den dargestellten Werten handelt es sich um gemittelte Werte aus der jeweiligen Herstellerkategorie. Die vollständige Tabelle der Materialien befindet sich im Anhang (Kapitel 20).

Im Rahmen der Kick-Off-Meeting am 07.06.2019 wurde beschlossen, dass keine neuen Probestücke erstellt werden, sondern nur Grundlagen erforscht werden sollen. Aufgrund der sehr geringen Probestückanzahl der getesteten Messsysteme und zur Vergleichbarkeit der damit ermittelten Messergebnisse, wurde erstellt eine komplexere Demonstrationsmontage aus einem Polstergerüst für den weiteren Probestückaufbau gemäß. Außerdem wurden die in Tabelle 4.1 aufgeführten elektromagnetischen Eigenschaften als primäre Anforderungen des Lautsprechers verwendet, die im deutschen Lautsprecher nach VDE 0221 für den vorliegenden Fall einer Mikroverleumdung als wenig relevant eingeschätzt wurde.

4.1 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die Anforderungen an Schwingungsmaterialien aufgestellt und mit erhältlichen Schwingungsmaterialien verglichen.

Es ist zu sehen, dass die gewünschten elektromagnetischen Materialeigenschaften stark von Verwendungszweck abhängen und teilweise sogar gegensätzliche Anforderungen erfüllen müssen. Deshalb sind die gerade im Folgenden, genannten Schwingmaterialien im Gegensatz zu Richtstrahlung nicht mehr geeignet.

Neben allen Anwendungsebenen gesehen sind jedoch die mechanischen und chemischen Eigenschaften, die jedoch die Carbonfasern in der Regel von Haus aus erfüllen. Dazu gehören das geringe Gewicht, gute Formstabilität, einfache Handhabung, geringe Entflammbarkeit und Dampfbildung. Abhängig von der verwendeten Matrix können weitere Eigenschaften wie Temperaturbeständigkeit, chemische Beständigkeit und die Feuchtigkeitsaufnahme beeinflusst und auf den Anwendungszweck hin optimiert werden.

5 Entwicklung und Aufbau eines Messstandes für die Bestimmung der elektromagnetischen Eigenschaften (AP 2)

Die Bestimmungen der elektromagnetischen Eigenschaften ist ein grundlegendes Arbeitspaket innerhalb dieses Projekts. Dabei werden innerhalb des Projekts zwei Ansätze verfolgt:

Zunächst sollen die elektromagnetischen Eigenschaften von Transmissoren, Reflektoren und Absorptoren gemessen werden, zum anderen sollen die dielektrischen Materialparameter bestimmt werden. Während die Eigenschaften direkt die Eignung des Materials für die Anwendung ausdrücken (geringe Transmissoren, gut für Schirmung, hohe Reflektoren, gut für Reflektivität), werden die Materialparameter immer dann benötigt, wenn die Materialien innerhalb elektromagnetischer Simulationsprogramme verwendet werden sollen. Sind die Materialparameter der benötigten Materialien bekannt, können aus diesen neue Materialkombinationen erzeugt und berechnet werden, z.B. Carbonfasern in Trägermatrix A oder Trägermatrix B. Die Messung hingegen liefert einen Schmeißel bei einer gegebenen Materialzusammensetzung. Versucht man sich mit der Messung Materialien anzupassen, bei Kenntnis der jeweiligen dielektrischen Materialparameter lassen sich auch Materialien synthetisieren.

Im Rahmen dieses Kapitels wird ein Messsystem vorgestellt, mit dem die Transmissoren (Dämpfung, Dämpfung), die Reflektoren und die Absorptoren einer Probe gemessen werden können. Dabei kann die Transmissoren in Abhängigkeit des Winkels der Probe gemessen werden, ebenso wie die Reflektoren, sowohl normalstrahlend als auch schräg. Bei normalstrahlenden Messungen ist die Position von Sender- und Empfängerantenne identisch, bei schrägen Messungen unterscheidet sich die Position von Sender- und Empfängerantenne. Dies ist insbesondere bei Messung der diffusen Reflektoren entscheidend bzw. bei nicht-vertikalen Einfall der Wellen. Das Messsystem muss darüber hinaus in der Lage sein, verschiedene Probenarten zu messen. Das bedeutet Proben mit unterschiedlicher Konstruktionsverfahren und Konstruktionsmaterialien, Proben unterschiedlicher Formate, unterschiedlichen Schichtaufbau aber auch unterschiedlicher Faserrichtungsverteilung, Faserrichte und Faserverteile. Dies hat direkten Einfluss auf die mögliche Probegröße, so dass hier ggf. unterschiedliche Messstände eingesetzt werden müssen. Grundsätzlich ist es besser, je kleiner die Probe, desto höher müssen

die Antennen an der Probe sein, um Fehler durch Beugungseffekte zu minimieren. Gleichzeitig muss sich die Probe jedoch in eng. Parallel der Antenne befinden, d.h. sie benötigt einen Mindestabstand von der Antenne, um Messfehler zu minimieren. Daher sind abhängig von Frequenz und Probengröße mehrere geeignete Messstände zu erwehlen und aufzubauen. Für sehr niedrige Frequenzen wird ein geeigneter Messverfahren entwickelt.

Das Verhalten soll mit dem Messstand auch der Einfluss der Konstellierung auf die Schirmwirkung untersucht werden, wie es beispielhaft in Abbildung 5.1 zu sehen ist.



Abbildung 5.1: Einfluss der Konstellation auf die Schirmwirkung

Darüber hinaus lassen sich aus diesen Messungen weitere relevante elektromagnetische Größen ableiten wie beispielsweise die Felderichtheitsquerschnitt (Polar Cross Section, RCS) oder die komplexe Formfaktor.

5.1 Grundlagen

Die Schirmwirkung eines Materials zur Abschirmung elektromagnetischer Wellen wird über die Schirmdämpfung α beschrieben, die das Pegelverhältnis der Wellen zwischen ungedämpfter und gedämpfter Wellen beschreibt (dB). Für die Schirmdämpfung der elektrischen Amplitude gilt:

$$\alpha_e = 20 \lg \left(\frac{E_0}{E_1} \right) \quad (5.1)$$

Hierbei bezieht sich E_0 auf die Amplitude der ungedämpften (einfallenden) Wellen, sowie E_1 auf die durch das Material gedämpfte Wellenamplitude, d.h. die transmittierte Wellen. Analog dazu lässt sich die Schirmdämpfung auch über die Pegelverhältnisse der magnetischen Amplitude bzw. der Leistungsamplitude beschreiben.

Zur Bestimmung der Schwingdämpfung existieren verschiedene Messmethoden, von denen die Messung in einer koaxialen TEM-Zelle, deren Messaufbau in [2000] beschrieben ist, hierbei und der Prüfung in einer koaxialen Leitungsumgebung angebracht, durch die eine elektromagnetische Welle propagiert, die ausschließlich transversale Feldkomponenten besitzt. Durch Vergleich zwischen einer Leermessung und der Messung mit Probe kann die Materialdämpfung ermittelt werden. Neben diesem Prinzip existieren Abwandlungen des Messaufbaus z.B. die doppelte TEM-Zelle, bei der die Probe zwischen zwei über eine Apertur gekoppelte Halbleiterkammern angebracht wird [2011]. Der Dynamikbereich dieser Messverfahren liegt im Bereich von 100 dB [2000]. Bei den aufgeführten Aufbauarten handelt es sich um nach außen abgeschlossene Systeme, bei denen die Materialprobe fest angepresst ist und die Winkel unter denen die Materialproben untersucht werden, nicht variiert werden können. In Hinblick auf die angestrebten Untersuchungen unter verschiedenen Bestrahlungswinkeln, können diese Messmethoden nicht angewandt werden.

Eine alternative Messmethode, bei der die Probe mit Hilfe einer Sendee- und einer Empfangsantenne in einer offenen Anordnung gemessen wird, ist in [2000] beschrieben. Der Aufbau entspricht der Darstellung aus Abbildung 5.2, bei der die Antennen an einem Netzwerkanalysator angeschlossen sind.

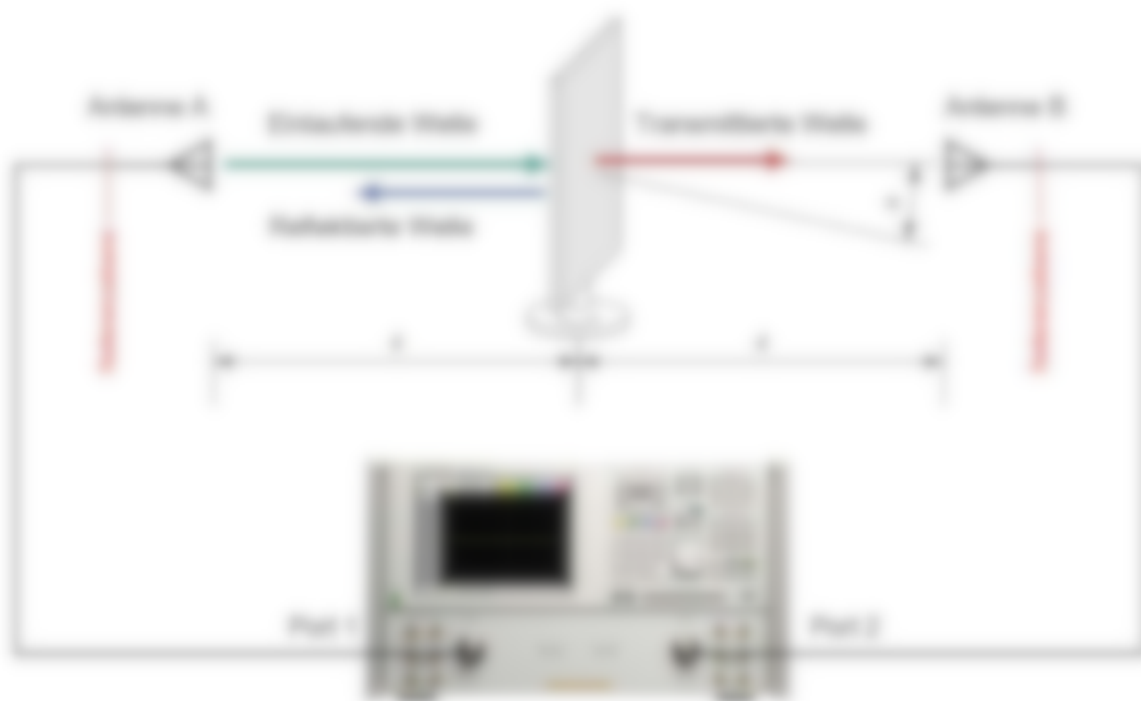


Abbildung 5.2: Schematischer Messaufbau zur Probencharakterisierung im Fernraum

Antenne A wird über Port 1 mit einem harmonischen Hochfrequenzsignal variabler Frequenz und bekannter Amplitude gespeist. Eine elektromagnetische Welle wird aus der Antenne A in Richtung der Probe ausgesendet. Beim Auftreffen auf den Prüfling durchdringt ein Teil der Welle das Material, während ein anderer Teil zurück reflektiert wird. Die transmittierten und reflektierten Wellenanteile können gemessen werden, indem Antenne A und Antenne B als Empfängerantennen fungieren und die in die Antennen angekoppelten Spannungssignale mit Hilfe des Netzwerkanalysators gemessen werden.

Zu Beginn jeder Messung wird eine Kalibration durchgeführt, wodurch die Verluste und Phasenverschiebung der Messkabel mathematisch bis zur gemeinsamen Referenzebene eliminiert werden können. Neben der Kalibrierung muss eine Lagemessung ohne die Montage einer Probe durchgeführt werden, wobei die Übergangskoeffizienten vom Anschluss der Antenne A bis zum Anschluss der Antenne B bekannt sind. Nach anschließender Messung der Probe lässt sich die Materialdämpfung durch Differenzbildung aus Probenmessung und Lagemessung ermitteln. Aufgrund des offenen Aufbaus ist eine Untersuchung des Materials unter verschiedenen Winkeln möglich. Hinsichtlich des zulässigen Probenmaterials und Antennenabstands in Messzellen sind zwei weitere Randbedingungen zu beachten. Einerseits ist der Mindestabstand zwischen Antenne und Messprobe so zu wählen, dass sich die elektromagnetische Welle von der Antenne abstrahlt und als ebene Welle im Raum ausbreitet.

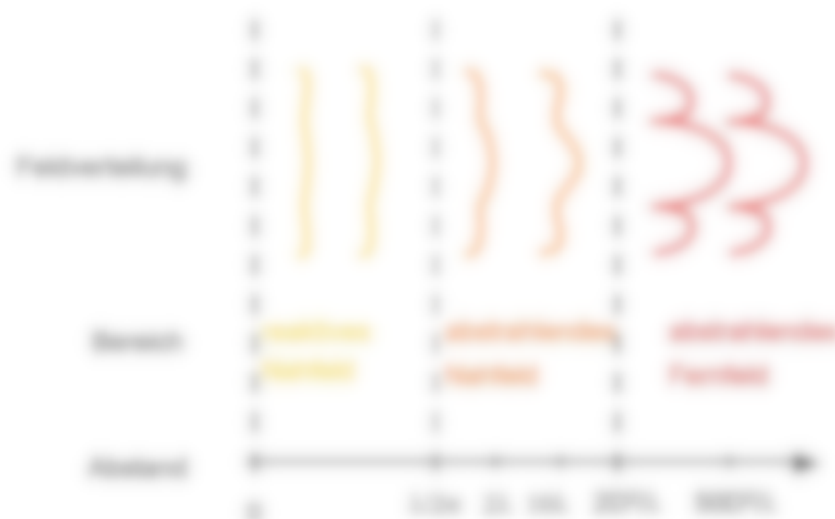


Abbildung 5.2: Feldstruktur einer Antenne

Dies wird als Fernfeldbedingung bezeichnet. Der Fernfeldabstand r berechnet sich über:

$$r = \frac{2D^2}{\lambda} \tag{5.2}$$

D bezeichnet die maximale Antennenausdehnung, wobei λ die Funkschwellenlänge. Erst ab diesem Mindestabstand kann die Richtcharakteristik der Antenne bestimmt werden.

In Abbildung 5.3 ist zu sehen, dass sich die Richtcharakteristik (rot) erst bei größerer Ausdehnung ausbildet. Die Richtcharakteristik ist exemplarisch in Abbildung 5.4 dargestellt.

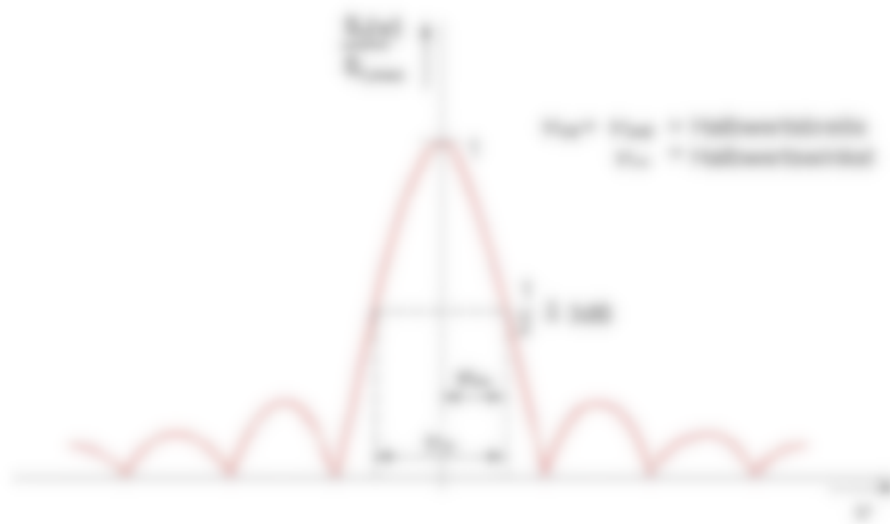


Abbildung 5.4: Richtcharakteristik einer Antenne

Eine entscheidende Größe für die Antenne ist die sogenannte Halbwertsbreite θ_{3dB} . Die Halbwertsbreite definiert den Winkelbereich innerhalb dessen die abgestrahlte Leistungsdichte größer als 50 % der maximalen Leistungsdichte ist. Um zu gewährleisten, dass möglichst wenig Leistung am Messobjekt verstreut, ist der Abstand zwischen Antenne und Messobjekt möglichst klein auszuwählen, so dass sich die Probe möglichst innerhalb der maximalen Leistungsdichte befindet. Der Winkel, unter dem die Probe gemessen werden, sollte nicht zu groß gewählt werden. Darüber hinaus sind möglichst große Probengrößen auszuwählen.

Damit ergibt sich, wie bereits in Abbildung 5.1 angedeutet, folgender Messaufbau für die Transmission, die reziproke Reflexion und die Absorption.



Abbildung 5.8: Schematische Darstellung für die Messung der Transmission S_{21} und der normierten Reflektion S_{11} .

Da die Messung mit einem Netzwerkanalysator durchgeführt wird, sind die Messgrößen die sogenannten Streuparameter (S-Parameter). Damit ergibt sich die Messgröße für die Transmission T der Streuparameter S_{21} . Das ist die Wurzel aus dem Verhältnis der empfangenen Leistung an Antenne 2 (P_{21}) zur geleisteten Leistung P_{11} an Antenne 1.

$$T = S_{21} = \sqrt{\frac{P_{21}}{P_{11}}} \tag{5.3}$$

Da die empfangene Leistung immer kleiner als die geleistete Leistung ist ergibt sich damit immer ein Wert < 1 für die Transmission. Typischerweise wird dieser Wert in dB angegeben, z.B. $20 \log_{10}(S_{21})$ dB. Damit ist die Transmission eines -10 dB Spruch mal von Dämpfung ist aber eine negative Transmission gemeint, eine Transmission von -10 dB entspricht einer Dämpfung von $+10$ dB.

Die normierte Reflektion R_{11} wird in diesem Setup ausschließlich mit der Antenne 1 bestimmt und berechnet sich mit Hilfe des Streuparameters S_{11} aus dem Verhältnis der empfangenen Leistung an Antenne 1 (P_{11}) zur geleisteten Leistung P_{11} an Antenne 1

$$R_{11} = S_{11} = \sqrt{\frac{P_{11}}{P_{11}}} \tag{5.4}$$

Auch hier gilt, dass das Verhältnis der beiden Größen stets ≤ 1 ist und damit bei Angabe der Reflexion in dB ebenfalls ausschließlich negative Werte auftreten können.

Abschließend sei erwähnt, dass die Absorption A nicht direkt gemessen werden kann. Sie wird vielmehr aus den gemessenen (Streuer-) Werten berechnet zu

$$A = 1 - |R_{11}|^2 - |R_{22}|^2 \quad (5.5)$$

Die Eigenschaften Transmission, Reflexion und Absorption sind also voneinander abhängig. Die Summe der Leistungsanteile ergibt dabei immer die Gesamtleistung, d.h. mit einer elektromagnetischen Welle auf die Materialprobe wird die Welle zu unterschiedlichen Anteilen reflektiert, transmittiert und absorbiert, allerdings ist bei einer Messung der Transmission nicht zu unterscheiden, ob die Dämpfung aufgrund der Reflexion oder der Absorption auftritt.

Entsprechend der Betrachtung des Fernfeldabstandes und der Halbwertsbreite der Antennen ergeben sich also prinzipiell verschiedene Messstände in Abhängigkeit von Frequenz und Probengröße, wie im Folgenden dargestellt.

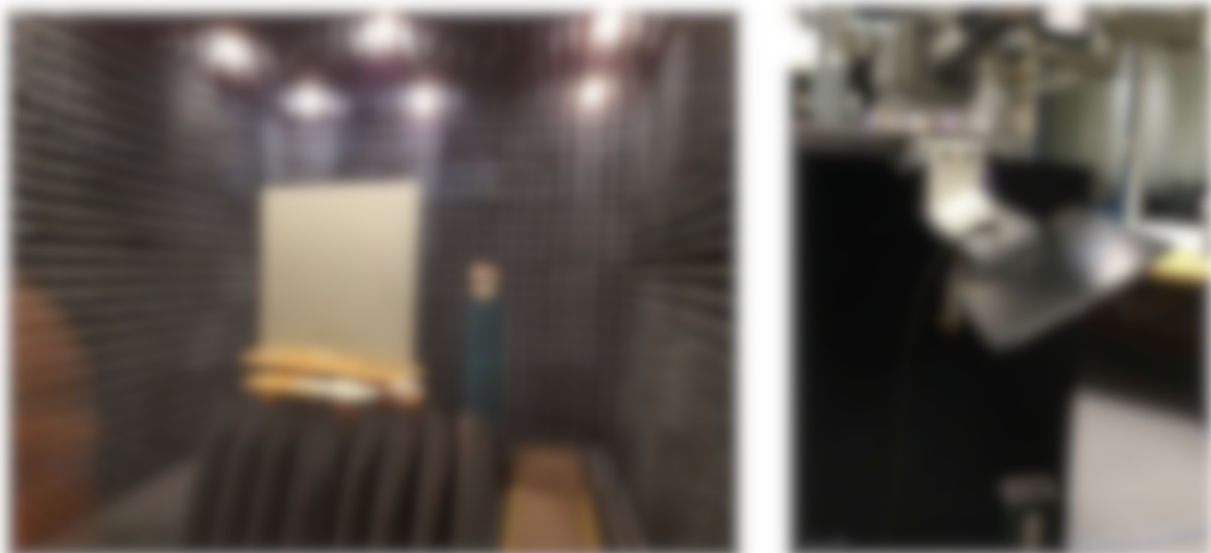


Abbildung 5.6: Exemplarische Messung einer großen Probe in der Absorberkammer (links, 10 GHz), Messung einer kleineren Probe bei 80 GHz (rechts)

Die Vollständigkeit haben wir im Folgenden nach der schematische Aufbau der totalen Reflexion gezeigt. Diese wird benötigt, um nicht-orthogonale Reflexionen zu messen sowie zur Bestimmung der diffusen Reflexionsanteile.



Abbildung 5.7: Schematische Darstellung für die Messung der totalen Reflexion R_t .

Rein mathematisch gesehen, besteht der Unterschied darin, dass hier ein Netzwerkanalyser ebenfalls der Parameter S_{21} ausgewertet wird und sich der Unterschied zur Transmissionsmessung lediglich in der Proben- und Antennenanordnung ergibt. Zur Vereinfachung in der Darstellung wird im Folgenden von der Streuparameterschreibweise abgesehen und es wird lediglich von Reflexion und Transmission gesprochen, unabhängig von jeweils ausgewerteten Streuparameter.

5.2 Messaufbauten zur Probencharakterisierung im Freiraum

Für die Untersuchung der Materialeigenschaften sind verschiedene Messaufbauten realisiert worden, bei denen die Proben mit sich im Freiraum ausbreitenden elektromagnetischen Wellen bestrahlt werden und die reflektierten und transmittierten Anteile gemessen werden.

In Anlehnung an das in Abbildung 5.2 vorgestellte Messprinzip, ist ein Messaufbau angefertigt worden, der in Abbildung 5.8 dargestellt ist. Auf einer Kupferplatte sind zwei Strahlleitern als Kunststoffhalterungen montiert, die auf der darunterliegenden Probenplatte ausgerichtet sind. Die Antennen sind ebenfalls mit Hochfrequenz-Kabeln angeschlossen, um unerwünschte Reflexionen in der Umgebung

zu vermeiden. Der nötig angebrachte Probekörper ist auf einem elektrisch steuerbaren Drehversteller montiert, durch den die Messung bei unterschiedlichen Probekörperorientierungen ermöglicht wird.

Der Frequenzbereich des abgebildeten Aufbaus ist durch die verwendeten Antennen und dem verwendeten Netzwerkanalysator auf den Bereich bis 40 GHz beschränkt.



Abbildung 5.8: Messaufbau zur Untersuchung der Transmissionsigenschaften

Um neben den Transmissionsigenschaften die Reflexionseigenschaften der Materialien näher untersuchen zu können, sind zwei weitere Messaufbauten vorbereitet worden. Bei der Betrachtung der Reflexion sind zunächst zwei Reflexionsgruppen zu untersuchen, die in Abbildung 5.9 dargestellt sind. Zum einen die spiegelnde Reflexion, bei der eine einfallende Welle an einer glatten, ebenen Fläche reflektiert wird, zum anderen die Reflexion an einer rauen Oberfläche. Hierbei werden je nach Rauigkeit der Oberfläche nochmals zwei Reflexionsmöglichkeiten physikalisch korrekter als nur der Begriff der Streuung unterschieden. Zum einen die gerichtete Reflexion an einer Oberfläche mit geringer Rauigkeit und zum anderen die diffuse Reflexion für den Fall, dass die Oberfläche eine große Rauigkeit aufweist.

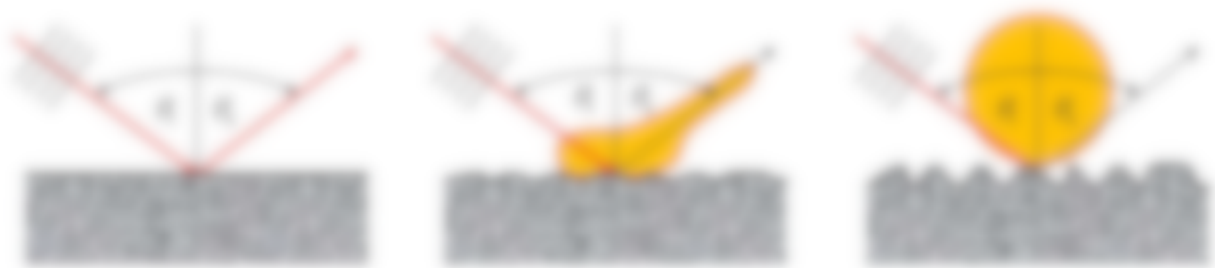


Abbildung 5.8: Prinzip der spiegelnden Reflexion (links), der gerichteten Reflexion (Mitte) und der diffusen Reflexion (rechts).

Bei der spiegelnden Reflexion an einer glatten Oberfläche gilt somit also streng, dass der Einfallswinkel dem Ausfallswinkel entspricht. Bei der gerichteten Reflexion an einer leicht uneben Oberfläche dominiert zwar ebenfalls der Lotungswinkel in Richtung des gespiegelten Einfallswinkels, jedoch verteilt sich die Lotungsdichte innerhalb eines Winkelbereiches um diese Spiegelung. Außerdem sind auch Lotungswerte in Richtung des Senders erkennbar. Dies ist gerade für Radaranwendungen entscheidend. Nur wenn Lotungswerte an den Sender zurückreflektiert werden, können diese vom Radar auch detektiert werden. Um die Sichtbarkeit zu erhöhen ist also der rückgestreute Anteil zu erhöhen. Im Falle der glatten Oberflächeneigenschaft ist keine Verengung der reflektierten Wellen mehr zu erkennen, die Reflexion ist diffus in alle Raumrichtungen. Dies ist ein entscheidender Effekt für die Radarerkennung. Hier muss verhindert werden, dass Lotungswerte zurück zur Senderebene des Radars gelangen.

Zur Vereinfachung wird innerhalb des Bereichs der spiegelnden und der gerichteten Reflexion die 'gerichtete Reflexion' zusammengefasst.

Zur Untersuchung der gerichteten Reflexion wird angenommen, dass die Ein- und Ausfallswinkel der einfallenden und an der Probe reflektierten Wellen ähnlich groß sind. Dies erfordert einen Messaufbau, bei dem die relativen Winkel der Sender- und Empfängerantenne zur Probe ähnlich groß sind. In diesem Zusammenhang ist die Abbildung 5.10 geeignete Messaufbau, erstellt worden, bei dem die Winkel der Sender- und Empfängerantenne getrennt voneinander eingestellt werden können. Die Ausrichtung der Antennen erfolgt computergesteuert, weswegen die Messanordnung fest verbaud ist. Zwischen den beiden Antennen ist ein Hochfrequenzkabelverbinder montiert, der eine direkte Schwellenleitung von Sender- und Empfängerantenne verbindet und damit ein

Überlappung zwischen den Antennen verhindert. In der Umgebung des Aufbaus sind weitere Absorber platziert, um Reflexionen zu unterdrücken.



Abbildung 5.10: Messaufbau zur Untersuchung gerichteter Reflexion

Für die Untersuchung der diffusen Reflexion wird ein weiterer Messaufbau genutzt, bei dem die test montierte Probe zylinderförmig konstruiert wird und um den Umfang der Probe rotieren kann. Auf diesem ist die Empfängerantenne montiert. Der zugehörige Aufbau ist in Abbildung 5.11 zu erkennen. Dieser erlaubt die Messung diffuser Reflexion sowie Transmission bis zu einer Frequenz von 325 GHz. Auch hier ist der erlaubte Winkel-Einstellbereich stark durch die Probengröße bestimmt, da eine ausreichend große Projektionsfläche der Probe schrägen gestellt werden muss, um Beugung an der Probekante zu minimieren und eine direkte Sichtverbindung zwischen Sender- und Empfängerantenne zu vermeiden. Darüber hinaus sollte die Empfängerantenne nicht unmittelbar über der Senderantenne geschwenkt werden, da in diesem Fall der Strahlbereich verengt wird.



Abbildung 5.11: Messaufbau zur Untersuchung diffuser Reflexion

5.3 Aufbau einer TEM-Messzelle

Zur Nachweis von Mehrstehwellen im Bereich über 30 dB, ist eine Messung im Freiraum aufgrund der geringen Messdistanz des Aufbaus außerhalb der Nachweissgrenze und erfordert einen abstrahierenden Messaufbau. Eine Möglichkeit solche Mehrstehwellen nachzuweisen ist mittels einer TEM-Messzelle gegeben.

Zur Charakterisierung der Mehrstehwellen ist die in Abbildung 5.12 dargestellte TEM-Messzelle am HZ entwickelt und aufgebaut worden. Die Messzelle besteht aus zwei Gehäuseteilen, die über einen Flansch miteinander verschraubt werden können. Außenwärts befinden sich Koaxialanschlüsse, über die die Messzelle mit dem Netzwerkanalyser verbunden wird. Zur Messung werden die Mehrstehwellen zwischen den beiden Gehäuseteilen verschraubt. Durch den festen Einbau der Probe ist keine Beweglichkeit möglich.

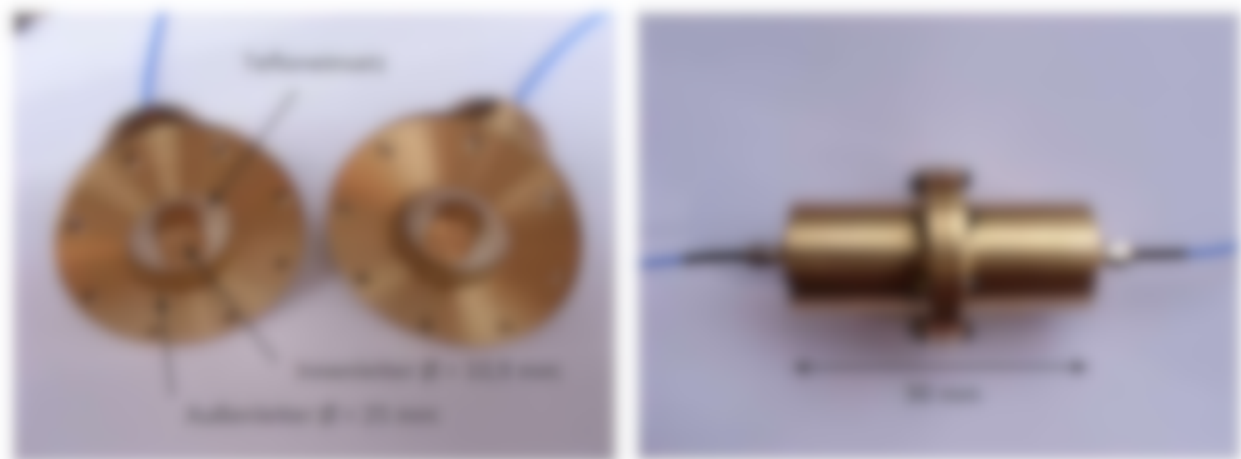


Abbildung 5.12: Aufbau einer TEM-Messzelle zur Messung der Materialproben bis 5 GHz

Die Messzelle stellt eine ausgewählte Koaxialleitung dar, die aus einem Innenleiter sowie Außenleiter besteht und zwischen den beiden Leitern mit Luft bzw. Dielektrikum gefüllt ist. In einer Koaxialleitung ist eine Transversal-Elektromagnetische Mode (TEM-Mode) ausbreitungsfähig, die ausschließlich Feldkomponenten aufweist, die orthogonal zu ihrer Ausbreitungsrichtung stehen. Darüber hinaus existieren EM-Moden, die bei höheren Frequenzen angeregt werden können und deren Grenzfrequenz durch die Leitungsgeometrie bestimmt ist (Fur11).

Die Grenzfrequenz der nächsthöheren TEM-Mode liegt mit

$$f_{\text{TEM}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{\epsilon_r}} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (5.6)$$

beschrieben ist, c die Vakuumlichtgeschwindigkeit, ϵ_r die relative Permittivität des Dielektrikums, das sich zwischen Innen- und Außenleiter befindet, r_1 und r_2 die Radien des Innenleiters bzw. Radius der Innenleiter-Wandung.

Der Betrieb der Messzelle soll ausschließlich in der Grundmode erfolgen, da andernfalls die Messergebnisse verfälscht werden und eine Interpretation der Ergebnisse erschwert wird. Für den vorliegenden Aufbau wurde die Geometrie so gewählt, dass die nächsthöhere Mode ab einer Frequenz von 5 GHz ausbreitungsfähig ist, der messbare Frequenzbereich beschränkt sich somit auf 5 GHz. Höhere Frequenzen lassen sich durch eine Verkleinerung der gesamten Leitungsgeometrie erzielen, jedoch erschwert dies

innerhalb der mechanischen Fertigung der Messzelle andererseits handelt sich die messbare Probenoberfläche.

Die Messdynamik des Aufbaus wurde durch Erhitzen und Messung einer Metallplatte ermittelt, da die Metallplatte die auftretende elektromagnetische Wellen an ihrer Oberfläche fast vollständig reflektiert. Hierbei beträgt die Transmission zwischen den beiden Anschlüssen weniger als 0,5 dB. Über die Messdynamik von 0,5 dB können typische Materialdämpfung bis zu diesem Wert nachgemessen werden.

5.4 Aufbau zur Messung des Radarrückstreuerverhaltens

Zur Untersuchung des Radarrückstreuerverhaltens der Materialien wird ein gesondertes Messverfahren betrachtet. Dabei wird die Messung nicht mehr mit dem vorher

beschriebenen Netzwerkanalysator durchgeführt, sondern es wird stattdessen ein spezieller Radarsensor benutzt, der im Frequenzbereich 70 - 81 GHz arbeitet. Mit diesem Messkopf soll bestimmt untersucht werden, ob Carbonfasern zur gewissen Sichtbarmachung eines Verkehrsteilnehmers auf dem Automobilstrasse genutzt werden kann. Hierzu können beispielsweise Carbonfasern in die Arbeitkleidung (Strahlenschutz) oder in die Schutzkleidung von Motorradsfahrern eingewirkt werden. Ebenso ist vorstellbar, welche Carbonfasern in die Radaufbauten oder Schutzbleche einzuwickeln.

Die Messung des Radarrückstreuerverhaltens (Radar Cross Section) erlaubt eine Aussage darüber, wieviel Leistung in Richtung des Radars zurückgestrahlt wird und gibt einen Wert für die elektromagnetische Größe eines Zieles. Je höher das RCS, desto höher ist die empfangene Leistung am Radar und desto sichtbar und somit erkennbar ist ein Ziel. Dessen Zusammenhang kann man direkt aus der sogenannten Radargleichung ableiten. Sie gibt an, wie groß die Empfangsleistung P_{Rz} auf dem Radar ist und berechnet sich so:

$$P_{Rz} = \frac{P_{Tz} \cdot G_{Tz} \cdot G_{Rz} \cdot \sigma \cdot F^2}{(4\pi)^3 R^4} \quad (5.7)$$

Dabei bezeichnet P_{Tz} die Sendeleistung des Radars, G_{Tz} den Gewinn der Sendebühnen, G_{Rz} den Gewinn der Empfangsbühnen, σ die Wellenlänge, R den Abstand und F den

Radarrückstreuequerschnitt (RCS). Die Empfängerleistung, ein Maß für die Sichtbarkeit, ist somit proportional zum Radarrückstreuequerschnitt. Die Größe des Radarrückstreuequerschnitts wird dabei zumeist in dBm^2 angegeben, es handelt sich also um eine Fläche. Typische RCS Werte liegen für ein Auto im Bereich von 10 – 20 dBm^2 , eintragener ein Fußgänger etwa im Bereich um -10 dBm^2 bis 0 dBm^2 liegt und wird typischerweise um den Faktor 100 – 1000 kleiner als ein Auto.

Bei einer geometrischen RCS Messung wird das Messobjekt in einer Entfernung vor dem Radar positioniert, dass die Wellenfronten der Antenne des Objektiv vollständig ausleuchtet. Anschließend wird das Objekt um 360° gedreht und man erhält damit den winkelabhängigen Radarrückstreuequerschnitt. Dabei ist wichtig, dass alle Reflexionen zurück in das Radar möglichst nur vom Messobjekt selbst und nicht von der Umgebung erzeugt werden. Typischerweise werden solche Messungen in einer Abschirmkammer durchgeführt. Abbildung 5.13 zeigt die Durchführung einer RCS Messung in der Abschirmkammer des Instituts. Dabei wurde eine Testperson um 360° gedreht und die entsprechenden Messwerte in einem geeigneten Polarplotgraphen aufgetragen.

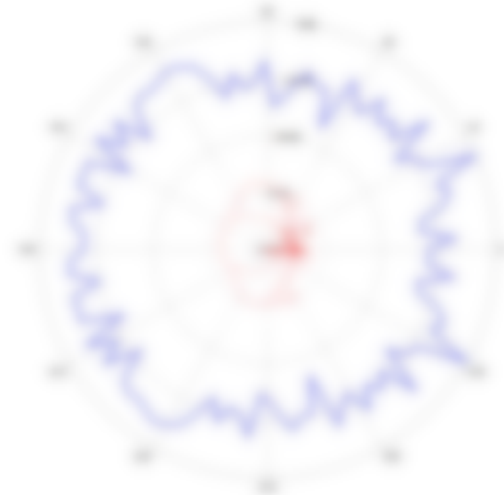


Abbildung 5.13: Testperson auf einem Drehtisch in der Abschirmkammer mit dem Radar im Vordergrund (links) und winkelabhängigen RCS (rechts)

Im Diagramm ist zu sehen, dass der Radarrückstreuequerschnitt von Betrachtungswinkel abhängig ist und sich im Bereich von etwa -10 dBm^2 bis 0 dBm^2 bewegt. Aufgrund der Tatsache, dass sich die Testperson vollständig in der Hauptkeule des Radars befindet, erhält diese Messung nur eine integrale Aussage. Es lässt sich zwar erkennen, wie groß der integrale Wert des RCS ist, es kann jedoch keine Aussage darüber getroffen werden,

an welcher Körperstelle der Testperson welche Leistungsanteile reflektiert werden. Dies ist nur mit einer feiner aufgelösten Messung möglich. Dabei ist es notwendig, den "Radarschall" auf eine bestimmte Körperregion zu fokussieren und dann die jeweilige Rückstreuung zu messen. Damit sind genaue Aussagen darüber möglich, welche Körperregionen in welchem Ausmaß zur Reflexion beitragen und es lässt sich somit auch genau beurteilen, ob beispielsweise der Einsatz von Carbonfasern im Bereich der Kniegelenke, Ellbogengelenke oder im Torsobereich messbare Vorteile bringt. Um die notwendige Fokussierung zu erreichen, wurde ein Linsensystem verwendet, welches vor dem Radar platziert wird und die elektromagnetische Welle entsprechend bündelt. Um dennoch die Fernfeldbedingung einzuhalten, ist jedoch ein größerer Abstand von der Antenne möglich, so dass die Messung nicht mehr in der Abschirmkammer des Instituts durchgeführt werden kann. Aus diesem Grund werden die Messungen in einer größeren Halle durchgeführt, in welcher der notwendige Messabstand von ca. 9 m erreicht werden kann. Die nachfolgende Abbildung zeigt den Radarsensor sowie die Messung einer Mikrowellennarbe.



Abbildung 5.14: Messanordnung mit hochauflösendem Radar (links) und Messung einer Testperson in Mikrowellenbereich (rechts)

Der Radarsensor ist hier in einem Kunststoffrohr eingehaut an dessen Ende sich eine PTFE Linse zur Bündelung des Strahls befindet. Im untersuchten Frequenzbereich von 76 - 81 GHz wird damit eine Halbwertsbreite in Azimut- und Elevationsrichtung von jeweils ca. 1,2° erreicht. Der Antennengewinn beträgt ca. 40 dB, die Sendeleistung des verwendeten Radars beträgt 4 dBm. Der Radarsensor lässt sich in zwei Achsen drehen,

welcher eine Ablesung der Topperson in Höhe und Breite durchgeführt werden kann. Abschermatten auf dem Boden zwischen Topperson und Radar verhindern unerwünschte Reflexionen.

Prinzipiell lässt sich diese Messanordnung auch verwenden, um die Wirksamkeit eines Materials zu vermessen, das Sichtbarkeit reduziert oder verhindert. Da diese Anwendung jedoch eher in den nicht-zentralen Bereich 90°, sind hierbei andere Frequenzbereiche von Interesse, die sich mit dem verwendeten Sensor nicht abdecken lassen. Daher wird zu dieser Messung der Setup für die Reflexionsmessungen wie zuvor beschrieben verwendet.

5.5 Zusammenfassung

Im Rahmen des Kapitels wurden die Grundlagen zur Durchführung der relevanten Messungen der Transmission und der Reflexion erläutert. Die verschiedenen Reflexionsarten (spiegelnd, gestreut, diffus) wurden eingeführt und deren Abhängigkeit von der Oberflächeneigenschaft beschrieben. Ebenso wurde erläutert, wie aus der Messung der Transmission und der Reflexion die Absorptionseigenschaften des Materials berechnet werden können. Die verschiedenen Messverfahren zur Bestimmung der einstrahlenden Transmission sowie der normalstreuung und totalstreuung Reflexion sind detailliert erläutert. Speziell für höhere Frequenzen wird die RCS-Messung eingeführt. Für die Messung der Reflexionseigenschaften ist ein spezielles Messverfahren notwendig, das im Rahmen dieses Kapitels ebenfalls ausführlich dargestellt wurde. Ein besonderes Merkmal dieses RCS-Messverfahrens liegt auf der starken Bündelung der elektromagnetischen Wellen, so dass damit aufgetriebene RCS-Messungen möglich sind, um die Reflexion an verschiedenen Körperstellen gezielt zu untersuchen und somit Aussagen über die Wirksamkeit von Radarreflektoren in Abhängigkeit von der Positionierung am Körper zu treffen.

Auf die Beschreibung der Auswertemethoden der Messungen wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet.

6 Charakterisierung der Materialparameter und der elektromagnetischen Eigenschaften der Benchmark-Produkte (AP 3)

Im Rahmen des Arbeitspaketes 3 werden im Hinblick auf die angestrebten Anforderungen verschiedene verfügbare Benchmark Materialproben aus Vlies ausgewählt und deren elektromagnetischen Eigenschaften charakterisiert. Auf Basis der Ergebnisse der Versuche, werden die relevanten Parameter für die Herstellung der Proben in AP 4 ausgewählt. Die Messungen dienen zum einen der Evaluierung der Messaufbauten. Zum anderen können die Ergebnisse für die Herstellung weiterer Probematerialien genutzt werden, da über diese die benötigten Flächenmengen abgefordert werden können. Eine Übersicht zu den hergestellten Benchmark Materialproben ist durch die nachfolgende Tabelle gegeben:

Tabelle 6.1: Materialzusammensetzung der Benchmark Proben

Materialnummer	Probendicke	Anzahl CF		Anzahl Kompartimente		Flächenmengen
		oben	unten	oben	unten	
1	12 mm	30	30	15	15	10000 mm ²
2	12 mm	30	30	15	15	10000 mm ²
3	12 mm	30	30	15	15	10000 mm ²
4	12 mm	30	30	15	15	10000 mm ²
5	12 mm	30	30	15	15	10000 mm ²
6	12 mm	30	30	15	15	10000 mm ²
7	12 mm	30	30	15	15	10000 mm ²
8	12 mm	30	30	15	15	10000 mm ²
9	12 mm	30	30	15	15	10000 mm ²
10	12 mm	30	30	15	15	10000 mm ²

Bei den Materialien handelt es um folgende Zusammensetzungen:

Probematerialnummer 1: 30g/m² Carbonfasern mit thermoplastischer Polymermatrix (PMMA Matrix (15 g/m²), Matrix pulverförmig aufgebracht und dann unter Hitze verpresst.

Probematerialnummer 2: 20g/m² Carbonfasern mit PMMA Matrix (20 g/m²), Matrix pulverförmig von beiden Seiten aufgetragen und dann unter Hitze verpresst.

Probematerialnummer 3: 20g/m² Carbonfasern mit PMMA Matrix (20g/m²) Matrix pulverförmig von nur einer Seite aufgebracht und dann komprimiert. Es sind also die gleichen Komponenten wie Nr. 2, wobei aber die Matrixkomponente auf einer Seite komprimiert ist und auf der anderen Seite des „lockeren“ Carbon ist.

Die nächsten drei Membranen haben alle die gleiche Zusammensetzung, die Prozesszeit wurde lediglich unterschiedlich eingestellt.

Probennummer 4: 4 Lagen mit insgesamt 1.200 g/m², davon 30 gew-% Carbon und 70 gew-% PP. Beide Membranen wurden in Fasernform gemacht, ein Vliesstoff gebläht und dann in der Heißpresse die PP-Fasern aufgeschmolzen. Da dabei kein großer Druck ausgeübt wurde, sondern ein sehr hoher Spalt eingestellt war, ergibt sich ein poröses Material.

Probennummer 5: Wie Probe 4 mit Spalt auf 7 mm eingestellt, d.h. gleiche Menge an Material, weniger verdichtet.

Probennummer 6: Wie 4 und 5 mit 9mm Spalt.

Probennummer 7: 20 gew-% Carbon und 80 gew-% PP, Gesamtflächengewicht 100 g/m². Beide Membranen wurden ebenfalls in Fasernform gemacht, ein Vliesstoff gebläht und dann in der Heißpresse die PP-Fasern aufgeschmolzen.

Probennummer 8: 40 gew-% Carbon und 60 gew-% PP, Gesamtflächengewicht 100 g/m². Verarbeitet wie 7.

Probennummer 9: 40 gew-% Carbon und 60 gew-% PP, Gesamtflächengewicht 200 g/m². Verarbeitet wie 7 und 8.

Zur Bestimmung der akustischen Membranparameter im Hochfrequenzbereich haben sich eine Reihe unterschiedlicher Verfahren etabliert, die prinzipiell in Zeitbereichs- und Frequenzbereichsverfahren unterschieden werden können. In Folgenden wird aus Gründen der erforderlichen Flexibilität die Messung mit einer offenen Kesselmembran näher erläutert, wie sie prinzipiell in Abbildung 6.7 zu sehen ist.



Abbildung 6.1: Prinzip der offenen Koaxialsonde

Die Sonde wird direkt in den Kontakt mit dem zu untersuchenden Material gebracht. Dadurch ändert sich die Feldverteilung unter der Sonde und damit der Reflexionskoeffizient S_{11} , der mit einem Netzwerkanalysator ausgewertet wird. Da bei diesem Messverfahren lediglich der komplexe Reflexionskoeffizient ausgewertet wird, eignet sich die Sondenmessung nur für nicht-magnetische Materialien.

6.1 Messung der dielektrischen Eigenschaften

Die inverse Berechnung der komplexen Permittivität aus dem gemessenen Reflexionskoeffizienten erfolgt mittels einer kommerziellen Software (Agilent 86722 Dielectric Probe Kit). Das Kit basiert auf dem Messprinzip einer „Open Ended“ Koaxialsonde, siehe Abbildung 6.2. Die offene Koaxialsondenmethode wird seit Jahren als verdrüfungsfreie Prüfmethode eingesetzt. Bei diesem Verfahren wird die Sonde gegen eine Probe getippt oder in Flüssigkeiten eingetaucht. Die Messung von anisotropen Materialien ist bedingt durch die Richtungsasymmetrie des elektrischen Feldes nicht möglich, sondern können keine Permittivitätsmessungen getroffen werden. Aufgrund der schrägen Feldverteilung der getippten Proben stellt dies jedoch keine Einschränkung dar. Einschränkungen bestehen jedoch hinsichtlich der Verluste der zu messenden Materialien, da einer Verlustfaktor von 0,05 nicht unterschritten werden soll. Außerdem muss die Materialprobe hinreichend dick sein, damit das elektrische Feld nicht durch die Probe hindurchgeht und die Messung verfälscht. Kritisch sind außerdem etwaige Luftspalte

zwischen der Sonde und der Materialoberfläche, d.h. die Oberfläche muss hinreichend eben sein.



Abbildung 6.2: Aufbau einer "Open-Ended" resonanten Sonde

Der Netzwerkanalysator mit dem Sondensystem wird zuerst so kalibriert, dass sich die Messungen der Reflexionsparameter auf die Aperturbene der Sonde beziehen. Dies kann auf zwei Arten geschehen. Bei der ersten Methode werden Referenzflangesstellen für die direkte Kalibrierung an offener Ende der Sonde verwendet. Die Unsicherheiten bei der Messung sind jedoch auf die Unsicherheiten bei der Charakterisierung der Referenzflangesstellen und die Auswahl der Referenzflangesstellen als Kalibrierstandard zurückzuführen. Bei der zweiten Methode werden alle Messungen durchgeführt, indem die Standards zum Kurzschluss, eine offene Leitung und eine Flangesstelle als Referenz an Ende der Sonde getrennt werden. Die angegebene Flangesstelle wird als Kalibrierungsstandard verwendet und muss eine Flangesstelle mit bekannten dielektrischen Eigenschaften sein. Als Referenzflangesstellen wird üblicherweise destilliertes Wasser genutzt. Die auf dem Probematerial (MUT, Material Under Test) gemessenen S-Parameter werden über die Herstellersoftware in die Materialparameter umgerechnet.

Als sechs Materialproben mit unterschiedlichen Stärken wurden mit dem M1712 kalibriert gemessen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.3 und Abbildung 6.4 dargestellt. Abbildung 6.3 zeigt zudem die dielektrischen Verlustfaktoren. Die dünnen Proben 4, 5 und 6 weisen höhere Werte der Permittivität auf. In dem Frequenzbereich zwischen 0 und 15 GHz liegen die Werte für diese Proben zwischen 7 und 22. In dem Bereich gehen die Werte jedoch stark auseinander und es kann keine konkrete Tendenz beobachtet werden. Ab 15 bis 40 GHz sinken die Werte mit steigender Frequenz und

erreichen einen Wert von etwa 10 für die Probe 8 und einen Wert von 11 für die Probe 9. Der Grund für die Ungenauigkeiten ist die Stärke der Proben, die bei der gewählten Messmethode nicht ausreichend ist. Aufgrund der geringen Dicke der Proben verlaufen die elektrischen und magnetischen Felder nicht nur durch das Material, sondern auch durch die Luft. Dementsprechend stellen die gemessenen Werte die effektive Permittivität aus Material und umgebender Luft dar. Aus diesem Grund wurden die Proben erneut gemessen, siehe Abbildung 6.4. Gemessener Realteil der Permittivität, Messung 2. Bei der zweiten Messung wurden alle Proben auf die Probe 8 gelegt und gemessen. Es ist zu erkennen, dass im unteren Frequenzbereich der Verlauf der Permittivitätswerte konstant wurde.

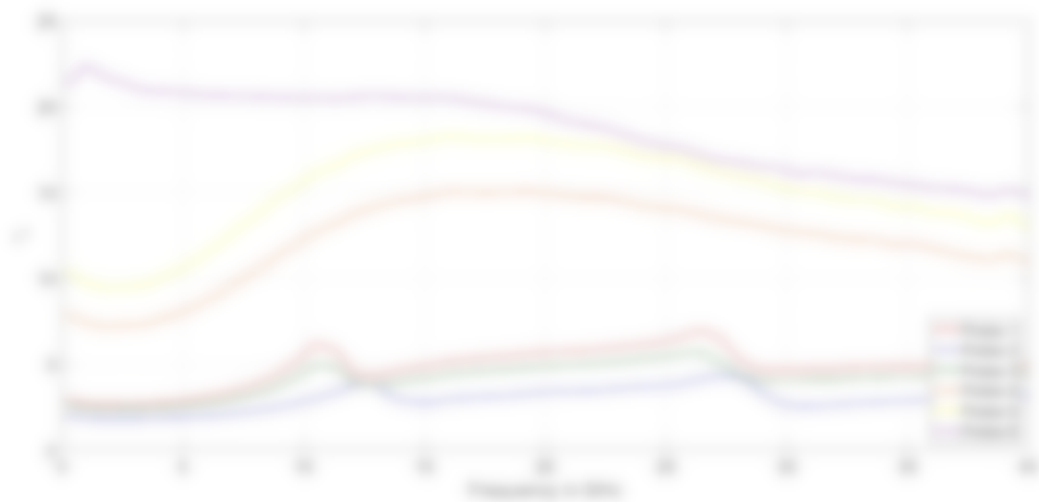


Abbildung 6.4: Gemessener Realteil der Permittivität

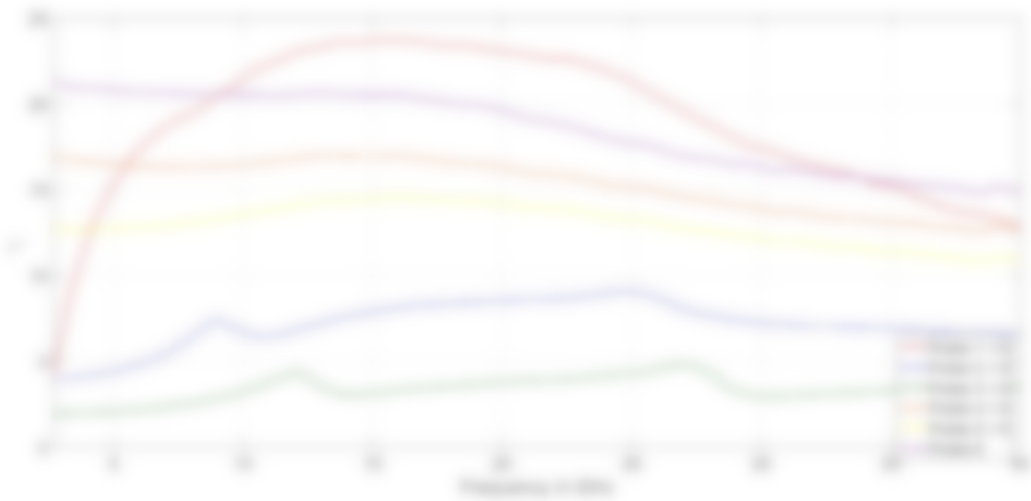


Abbildung 6.4: Gemessener Realteil der Permittivität, Messung 2

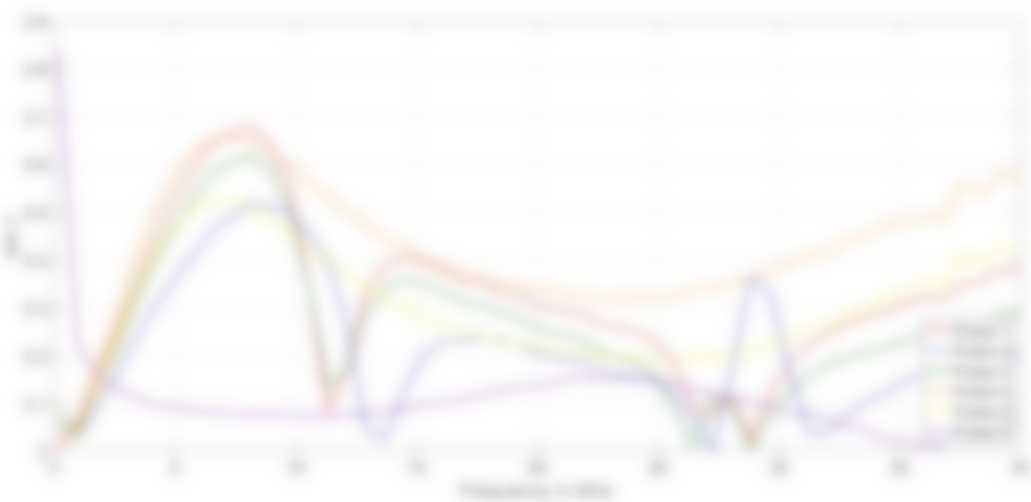


Abbildung 6.5: Gemessener Verlustfaktor

Es ist zu erkennen, dass sowohl mit zunehmender Plattenstärke als auch mit zunehmender Masse an Carbonfasern im Material, der Realteil der Permittivität sinkt.

6.2 Messung der Transmissions- und Reflexionseigenschaften

Die Transmissionseigenschaften der Benchmark Proben sind mithilfe des Messaufbaus aus Abbildung 5.8 untersucht worden. Zu Beginn der Messungen sind Reflexionsmessungen ohne Probematerial durchgeführt worden, um die Plattenstärke durch den Messaufbau in den Messungen berücksichtigen zu können. Neben der

Leitmessung ist auch die Messung einer Metallplatte durchgeführt worden, da diese aufgrund der hohen Leitfähigkeit und Dicke einen Reflektor darstellt, durch den die Transmission einer elektromagnetischen Welle kaum möglich ist. Auf diese Weise ist ein Vergleich der Materialeigenschaften der CF-Materialien möglich.

Im Rahmen der Benchmark Messungen sind korrigierte Proben mit Flächenengewichten bis 1200 g/m² untersucht worden. In Abbildung 6.8 sind Transmissionmessungen von zwei CF-Materialproben zusammen mit den Referenzmessungen dargestellt.

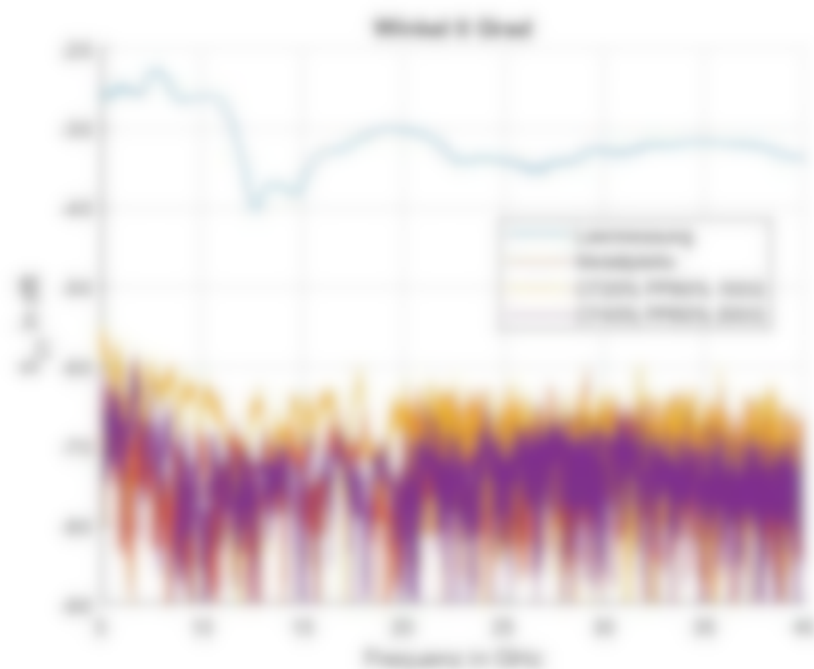


Abbildung 6.8: Gemessene Transmission der Benchmark Proben

Die Messungen erfolgen unter senkrechter Bestrahlung der Proben. Es sind die Messungen einer Probe mit 20 Gew.-% CF-Fasern, 80 Gew.-% PP und einem Flächengewicht von 100 g/m² sowie einer Probe mit 40 Gew.-% CF-Fasern, 60 Gew.-% PP und einem Flächengewicht von 200 g/m² abgebildet. Diese Materialien weisen von den Benchmark Proben die geringsten CF-Flächengewichte auf.

Der gemessene Frequenzbereich liegt zwischen 5 GHz und 40 GHz, welches die Messbandbreite der verwendeten UHFV Antennen darstellt. Die Flächenverluste liegen im Bereich zwischen 20 dB und 40 dB. Diese sind auch in den unkorrigierten Messungen der Proben enthalten und müssen für eine Berechnung der Materialdämpfung berücksichtigt werden. Die gemessene Transmission der CF-Materialien sowie die

Metallplatte liegt im Bereich zwischen 40 dB und 45 dB und wird stark von Rauschen behaftet. Die Proben lassen sich in der Messung kaum voneinander differenzieren. Bei der gegebenen Messanordnung errechnet sich die nachweisbare Mindestablenkung aus der Differenz von Lärmmessung (Plattentaste) und der Messung der Metallplatte (größtmögliche Schwingung), die hier bei ca. 40 dB liegt. Da die Metallplatten nicht von der Metallplatte unterschieden werden können und im Rauschen untergehen, stellt die Messdynamik der Fernmessung nicht aus, um die hohen Mindestablenkungen nachweisen zu können.

Das Ziel zu der Forderung, Metallplatten mit geringeren CF-Fächergewichten herzustellen und diese in einer Messanordnung mit höherer Messdynamik zu untersuchen, z. B. durch Messung in einer TDR-Messzelle.

Nachfolgend sind Messungen der Reflexionskoeffizienten einer CF-Platte mit 20 Gew.-CF-Fasern und 70 Gew.-% PWB bei einem Fächergewicht von 1,200 g/m² erfolgt.

Die Messung der gerichteten Reflexion liegt mit dem Aufbau aus Abbildung 5.10, in denen sind die meisten Winkel der Sender- und Empfängerantenne zu Probe gleich groß gewählt worden. Die Winkelvarianz erstreckt sich über den Bereich von 20 Grad bis 70 Grad, wobei der Winkel einer orthogonalen Bestrahlung der Probe entspricht. Mit Abbildung 5.7 folgen die Messergebnisse im Frequenzbereich zwischen 5 GHz bis 40 GHz. Alle Messungen sind auf die Messung einer Metallplatte normiert, sodass die Messkurve der Metallplatte auf der 0-dB-Linie liegt. Die Messkurven der CF-Metallplatte liegen nahezu symmetrisch auf der 0-dB-Linie mit periodischen auftretenden Auslenkungen. Da die Kurven für alle Winkel und über den gesamten Frequenzbereich in Mittel auf der 0-dB-Linie liegen, kann gefolgert werden, dass die gerichtete Reflexion der CF-Platte sich ähnlich zu einer Metallplatte verhält. Periodisch auftretende Auslenkungen über der Frequenz deuten auf Mehrfachreflexionen innerhalb des Messaufbaus hin und stehen nicht in direktem Zusammenhang zu den Probeneigenschaften.

Über den Aufbau aus Abbildung 5.11 ist die diffuse Reflexion untersucht worden, bei der in dem höheren Frequenzband von 75 GHz bis 110 GHz gemessen werden ist. Auch hier sind die Messergebnisse, siehe Abbildung 5.8, auf eine Metallplatte normiert. Analog zu

Bei einer beschriebenen Messung, stellt das Reflexionsverhalten der CP-Probe den Reflexionsverhalten einer Metallplatte.

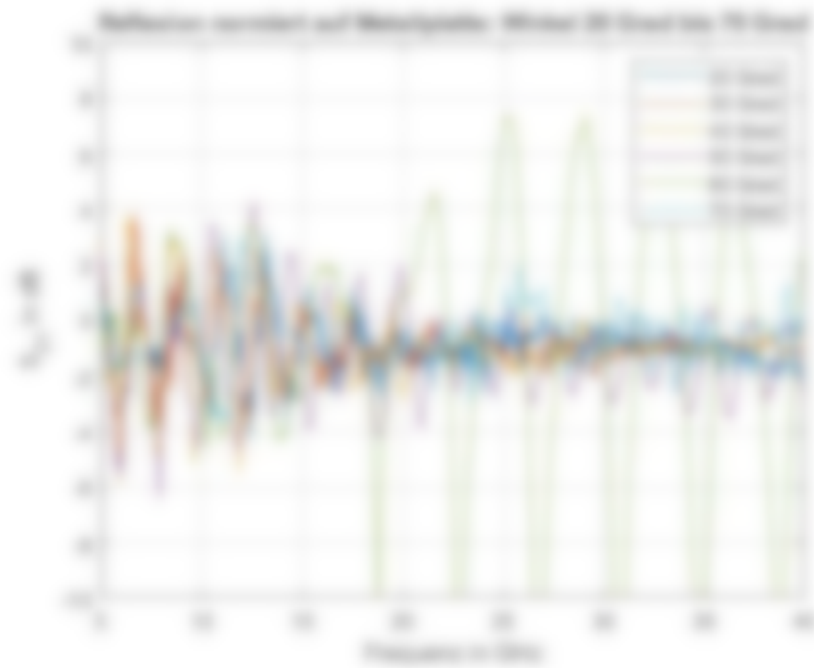


Abbildung 6.7: Messung der gemittelten Reflexion



Abbildung 6.8: Messung der offenen Reflexion

6.3 Messung des elektrischen Widerstandes

Aufgrund ähnlich hoher Reflexion elektromagnetischer Wellen an der Oberfläche von CF-Materialproben im Vergleich zu den Reflexionen einer Metallplatte, ist eine hohe Leitfähigkeit des CF-Materials zu vermuten. Eine hohe Leitfähigkeit der

Probematerialien scheint trotz der Bemerkung schlecht leitender Füllstoffartige Polymern und Glasfasern vorzuliegen, durch die eine Isolation der einzelnen Carbonfasern beobachtet wurde. Durch die Messung des Gleichstrom-Widerstandes (DC-Widerstand) soll die Leitfähigkeit von Probematerialien mit verschiedenen Füllstoffanteilen abgeklärt werden. Gemäß des in Abbildung 6.3 Aufbau, werden drei verschiedene Probematerialien über Messspitzen kontaktiert und der Widerstand über eine Distanz von 20 cm gemessen. Zur Messung wurden großflächige Proben verwendet, die jeweils an fünf unterschiedlichen Stellen kontaktiert und gemessen wurden. Die gemessenen Widerstandswerte der drei Probematerialien sind in Tabelle 6.2 aufgeführt.

Die gemessenen Widerstände liegen bei 20 Ohm für das Material mit hohem Carbonfasernanteil von 40% sowie bei 100 Ohm für das Material mit geringeren Carbonfasernanteil von 20% und hohem Füllstoffanteil von 80%. Aus den niedrigsten gemessenen Widerstandswerten ist zu folgern, dass die Carbonfasern durch die Bemerkung der elektrisch voneinander leitenden Füllstoffanteile nicht hinreichend voneinander isoliert werden und die Carbonfasern durch eine Vielzahl gegenüberliegender Kontaktierungspunkte ein elektrisch leitfähiges Netz darstellen.



Abbildung 6.3: Widerstandsmessung an Probematerialien

Tabelle 6.2: Ergebnisse der DC-Widerstandsmessung

Probematerialienmessung	Füllstoffgewicht	Gemessener DC-Widerstand	Leitwert
40% CF, 60% PF	100 g/gf	20 Ohm	0,05 S
20% CF, 80% PF	100 g/gf	100 Ohm	0,01 S

6.4 Untersuchung der mechanischen Eigenschaften

Zusätzlich zu den elektromagnetischen Eigenschaften wurden die mechanischen Eigenschaften der Benchmark Materialien untersucht. Durchgeführt wurden dabei die folgenden Prüfungen:

- Bestimmung der Nischenbezugsmasse nach DIN EN 28773 Teil 1
- Höchstzugkraft & Höchstzugkraftdehnung in Anlehnung an DIN EN 28773 Teil 2
- Bestimmung der Biegeelastizität nach DIN EN ISO 9073-1

Zur Bestimmung der Nischenbezugsmasse nach DIN EN 28773 Teil 1 werden aus jeder Probe jeweils mindestens drei gleich große Stücke entnommen und nach einer Mineralisierung gewogen. Die Stücke haben optimalerweise eine Fläche von mindestens 50 mm². Die Probenentnahme ist beispielhaft in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.



Abbildung 6.10: Probenentnahme nach DIN EN 28773 Teil 1

Die Messung der Masse erfolgt mit einer Genauigkeit $\pm 0,1\%$ je Flächeneinheit der Proben, anschließend werden die Messwerte gemittelt.

Die Ergebnisse der Prüfung sind in nachfolgenden Diagrammen dargestellt.

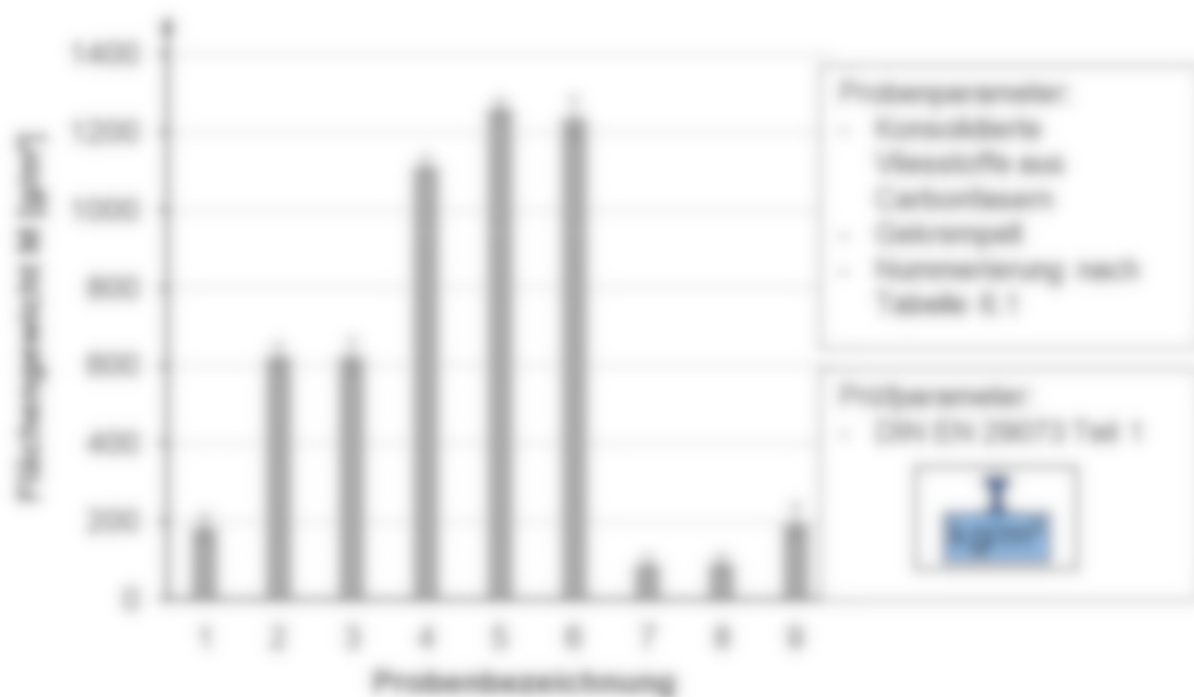


Abbildung 6.11: Flächengewicht der Versuchsmaterialien

Es ist zu erkennen, dass die gemessenen Werte nicht komplett mit den angegebenen Werten für die Materialien übereinstimmen. Geringe Schwankungen sind bei Kunststoffen allerdings üblich.

Für die Messung der Höchstzugkraft und Höchstzugkraftdehnung des Vlieses nach DIN EN 26 073 Teil 3 sind die Anforderungen an das Prüfgerät nach DIN EN 26 073:

- Zugmaschine mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit und selbstregulierender Aufzeichnungsvorrichtung zur Registrierung von Kraft-Längenänderungskurven
- Einspannvorrichtung zum sicheren und beschädigungsfreien Halten der Messproben auf der gesamten Breite

Die Daten der Messprobenentnahme sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt:

Tabelle 6.2: Parameter der Probenentnahme

Profil	Abmessungen (mm)	Länge
Wool	100 mm, 100 mm, 100 mm, 100 mm	100 mm

Das Prüfgerät ist in Abbildung 6.12 dargestellt.

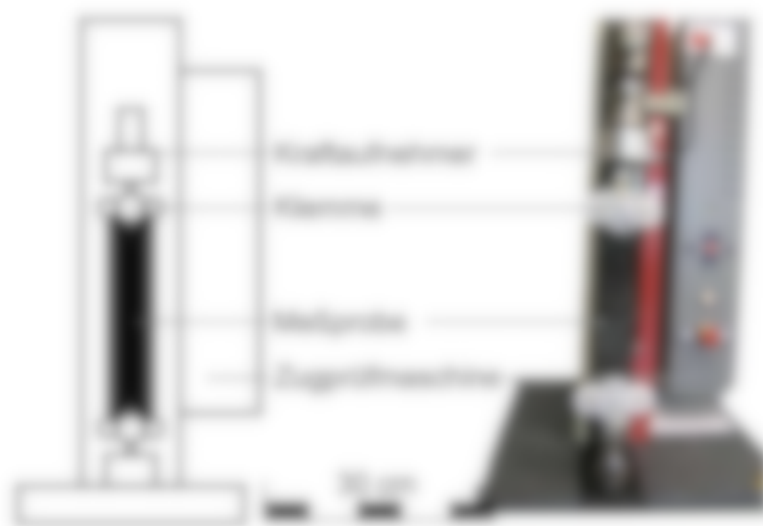


Abbildung 6.12: Prüfgerät zur Zugkraftermittlung

Zur Durchführung werden die Klammern der Zugprüfmaschine zunächst auf einen Abstand von 200 mm mit 1 mm Toleranz eingestellt. Anschließend werden die Messproben in die Klammern eingepasst. Auf den Messproben darf im Ruhezustand noch keine Kraft wirken. Die Messprobe wird mit 100 mm/min beschleunigt und die Kraft-Dehnungs-Kurve vom Prüfgerät aufgezeichnet.

Aus der aufgezeichneten Kraft-Dehnungs-Kurve kann die maximale Zugkraft als Höchstzugkraft in Newton ermittelt werden. Treten mehrere maximal Kraft-Spitzenwerte auf, wird der höchste Wert als Höchstzugkraft im Prüfbericht angegeben. Die Höchstzugkraftdehnung wird anhand des Höchstzugkraftwerts bestimmt. Die Dehnung zum Zeitpunkt der Höchstzugkraft, wird im Verhältnis zum Ausgangsabstand der Klammern, in Prozent als Höchstzugkraftdehnung angegeben. Zusätzlich werden die mittlere Höchstzugkraft in Newton (auf 0,1 N genau) und die mittlere Höchstzugkraftdehnung in Prozent (auf 0,05 % genau) bestimmt.

Die Ergebnisse der Prüfungen sind in den nachfolgenden Diagrammen dargestellt.

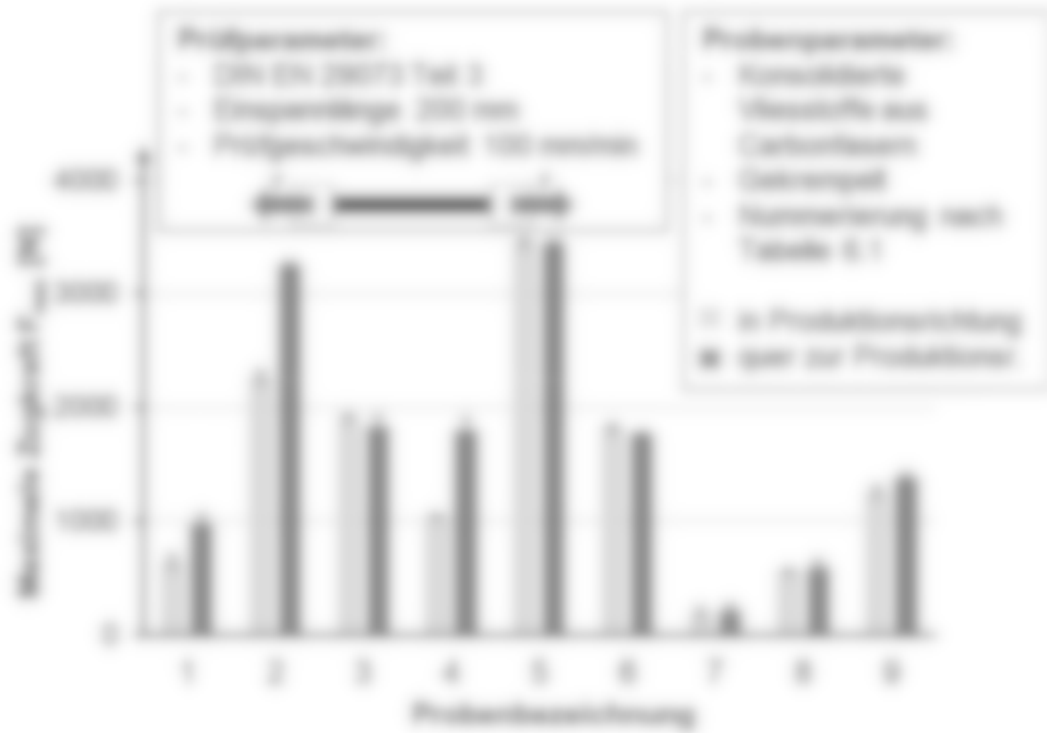


Abbildung 6.13: Maximale Kraft im Zugversuch, Bereichsmittelwert

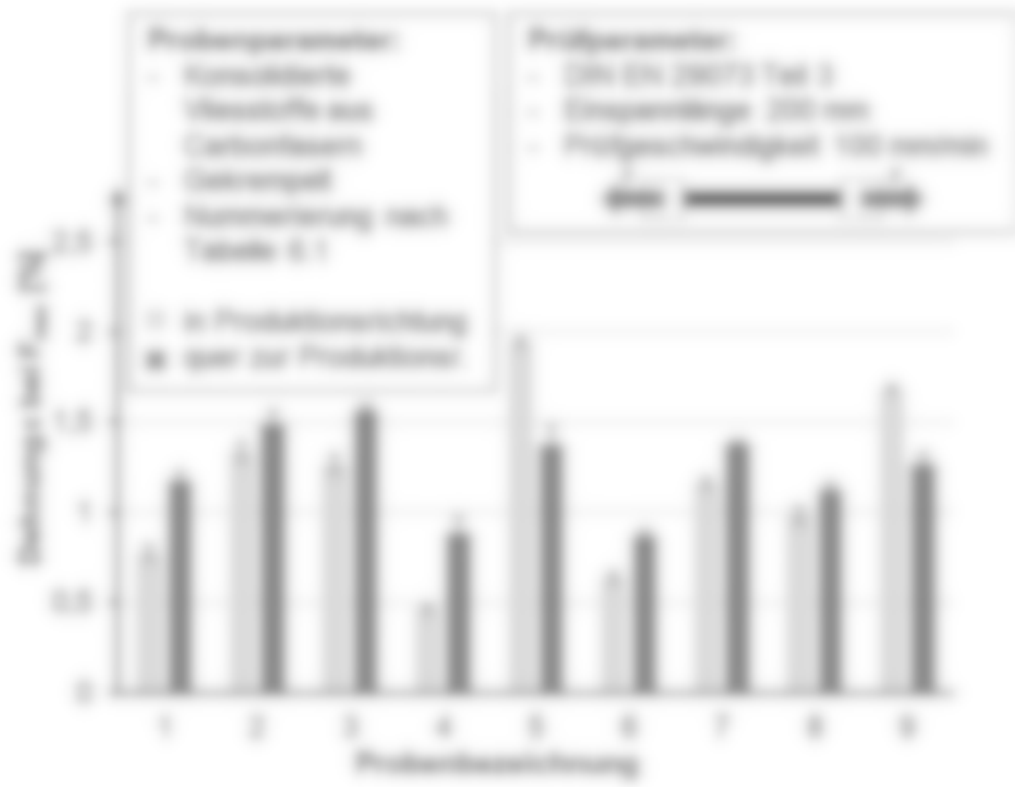


Abbildung 6.14: Maximale Dehnung im Zugversuch, Bereichsmittelwert

Die Werte der Messungen in verschiedenen Richtungen unterscheiden sich abhängig von der Produktionsrichtung. Da eine gewisse Voreingrichtung der Fasern im Kompaktprozess zu erwarten ist, ist dies nicht ungewöhnlich. Da die Messung zur Ermittlung des Flächengewichtes quer zur Produktionsrichtung durchgeführt werden, sind die Festigkeiten in diese Richtung höher.

Die Biegelänge nach DIN EN 8073-1 wird für Messzelle mit Hilfe eines Messbleches bestimmt. Die Proben haben dabei eine Größe von 25 mm x 250 mm. Die Proben werden anschließend über die Kante des Auflegestisches geschoben bis sie die schräge Ebene berühren. Die gemessene Überhanglänge entspricht der doppelten Biegelänge. Nachfolgend ist ein schematisches Messbild abgebildet.



Abbildung 6.16: Prinzip der Biegemessung nach DIN EN 8073-1

Die Biegesteifigkeit G berechnet sich dann nach der folgenden Formel:

$$G = m + C^2 \times 10^3 \quad (6.1)$$

mit

m = Scheitelmesswert Masse in g/m²

C = Gesamtmaßwert der Biegelänge in cm

Aufgrund der hohen Biegesteifigkeit der Proben konnten mit diesem Messverfahren für die Benchmarkmaterialien keine Werte ermittelt werden.

6.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die Benchmarkmaterialien sowohl auf ihre elektromagnetischen als auch ihre mechanischen Eigenschaften hin untersucht.

Aufgrund der hohen CF-Fächergewichte und der hohen elektrischen Leitfähigkeit der Benchmark Proben, ist bei diesen ein Transmissions- und Reflexionsverhalten beobachtet worden, das dem Materialverhalten einer Metallplatte ähnelt. Der hohe reflektierte Anteil an den Probenoberflächen und die damit verbundenen hohen Materialdämpfungen können aufgrund der geringen Messdynamik einer Fernmessung mit dieser kaum nachgemessen werden. Eine differenziertere Untersuchung des Transmissions- und Reflexionsverhalten erfolgt durch CF-Materialproben mit geringeren CF-Fächergewichten bei besserer Abschulung. Durch die Verwendung einer TDR-Messzelle, lassen sich höhere Messdynamiken erreichen und damit höhere Materialdämpfungen nachweisen.

7 Probenherstellung und -prüfung (AP 4)

Im Folgenden sind die Herstellung und Untersuchungen von CF-Materialproben beschrieben, die gegenüber den Materialien aus Abschnitt 5 reduzierte CF-Flächengewichte aufweisen.

Die Materialien lassen sich in zwei Kategorien unterteilen. Einerseits in konventionelle Materialien, die aus CF-Fasern, einer PP-Matrix und teilweise aus beigemengtem Glasfasern als Füllmaterial bestehen, andererseits in CF-Papieren, bei denen CF-Fasern in einem Papier eingestreut sind. Eine Übersicht der hergestellten Probematerialien liegt mit Tabelle 7.1 bei.

Tabelle 7.2 listet die einzelnen Materialproben auf. Dabei wurde das theoretische Flächengewicht aufgrund der Materialmenge während der Produktion eingestellt. Im Rahmen des Kick-Off Meetings am 07.05.2019 wurde von P&A beschlossen, nur spezielle Probefasern zu verwenden. Die Fasertänge wurde zu 60 mm und 80 mm beschlossen, allerdings wurde aufgrund der Verfügbarkeit nur eine Fasertänge verwendet. Zudem stellte sich die Fasertänge als Faktor mit nur geringem Einfluss heraus. Die Schichtaufbau wurde mit Hilfe von zusätzlichen Glasfasern beim 100% und beim Carbonpapier in Form einer Wellplatte zusätzlich mit Carbonpapier beschichtet untersucht. Die Herstellung wurde auf das Kompresverfahren beschränkt, da die Anlay-Anlage des P&A-Aufbaus zum Zeitpunkt der Herstellung nicht verfügbar war. Diese im Weiteren Verfahren wurden durch Carbonpapiere substituiert.

Tabelle 7.1: Konventionelle Materialproben aus CF und Kunststoffmatrix

Probematerial	Ansatz CF	Ansatz Kunststoffmatrix	Flächengewicht
1	100%	100%	1,50
2	100%	100%	1,50
3	100%	100%	1,50
4	100%	100%	1,50
5	100%	100%	1,50
6	100%	100%	1,50

Tabelle 7.2: Konventionelle Materialproben aus CF, GF und Kunststoffmatrix

Probematerial	Ansatz CF	Ansatz GF	Ansatz Kunststoffmatrix	Flächengewicht
7	100%	0%	100%	1,50
8	100%	0%	100%	1,50
9	100%	0%	100%	1,50
10	100%	0%	100%	1,50

Tabelle 7.2: CF-Papiere

Bezeichnung	Faserbreite	Arzt CF	Arzt Zellulose	Flächengewicht
12	1,15 mm	1,2 Gew.-%	88,8 Gew.-%	80 g/m ²
13	1,15 mm	1,2 Gew.-%	87,8 Gew.-%	80 g/m ²
13	1,15 mm	1,2 Gew.-%	87,8 Gew.-%	80 g/m ²
14	1,15 mm	1,2 Gew.-%	88,8 Gew.-%	80 g/m ²
14	1,15 mm	1,2 Gew.-%	87,8 Gew.-%	80 g/m ²
15	4 mm	unbekannt	unbekannt	unbekannt

7.1 Herstellung der CF-Vliese

Zur Herstellung der Vliesstoffe aus Carbonfasern und thermoplastischen Fasern wurde die DILO Kompakt Vliesstofflinie, welche am ITA Augsburg in Betrieb ist, verwendet.

Grundlegend ist in Abbildung 7.1 die Vliesstofflinie dargestellt.



Abbildung 7.1: DILO Kompakt Vliesstofflinie

Die dargestellte Kreuzleger hat eine Arbeitsbreite von 1000 mm, der Quertleger hat eine Legetbreite von 1200 – 2200 mm. Das herstellbare Flächengewicht bewegt sich zwischen 80 und 2000 g/m². Der Nadelstuhl hat eine Einwirkbreite von 40 – 200 Stichen/cm.

Zur Herstellung des Vlieses wurden Carbonfasern der Firma carbonKIT GmbH, Wickeln mit 60 mm Länge und Polymerspinnfasern verwendet.

Die Linie verfügt über einen Seitenöffner, dem ganze Faservollen zur Öffnung vorgelegt werden können, es ist aber auch möglich geringere Mengen auf dem Förderband aufzuliegen.

Mittels des Kropfgeschäfts werden die zugeführten Fasermengen zum ersten Mal geöffnet und anschließend über Rohrleitungen dem Dosenöffner zugeführt. Dessen Aufgabe ist die weitere Öffnung und homogenere Mischung der Fasern in Wickelkammern mit Hilfe von aerodynamischer Verwirbelung. Die zugeführte Fasermischung wird homogen durchmischt und anschließend dem Kropfgeschwinn zugeführt, welcher ein Spinnvlies bildet.

In Abbildung 7.2 ist exemplarisch der Aufbau eines hergestellten Spinnvlieses dargestellt.



Abbildung 7.2: Spinnvlies

Das Spinnvlies wird anschließend der eigentlichen Kropfel zugeführt. Die Aufgabe der Kropfel ist das Verweben und die Orientierung der zugeführten Faserfasern des Spinnvlieses. Nachfolgend ist Kropfel in der Seitenansicht zu sehen.



Abbildung 7.3: Kringel

Das hergestellte Glas muss, aufgrund des geringen Flächengewichtes des Einzelstücks von nur 50 g/m², duktilisiert werden. Dafür wird das Glas vielfach quergelegt, um das Flächengewicht zu erhöhen. In Abbildung 7.4 ist das quergelegte Glas, beim Verlassen des Quertages zu sehen.



Abbildung 7.4: Gezogenes Glas

Für die Weiterverarbeitung muss das gezogene Glas verfestigt werden, damit die strukturellen Überlagerungen nicht mehr voneinander getrennt werden können. Dazu kommt ein Nachschnitt zum Einsatz. In Abbildung 7.5 ist dieser Nachschnitt sichtbar zu sehen.



Abbildung 7.5: Nachschnitt

Auf den beiden Nachschnittern sind die Nachen angeordnet. Die Nachen sind mit Widerhaken versehen, so dass strukturelle Fasern unerschüttert werden, und das Glas mit sich selbst vermischt und so die Festigkeit des Materials erhöht wird.

Anschließend wird das verfertigte Glas mittels eines Wärmers aufgewärmt, siehe Abbildung 7.6.



Abbildung 7.6: Wämer

Die hergestellten Glasproben wurden anschließend bei der Firma SGL Technologies GmbH, Mellingen mittels einer Schmelzpresse verpresst. Dabei kam es zunächst zu Problemen mit starker Schrumplung des Materials wie in Abbildung 7.7 zu sehen:



Abbildung 7.7: Glasstoff nach Pressvorgang geschrumpt

Zu erkennen sind die „Frisen“ der PP-Matrix an den Rändern. Durch die Schrumplung waren die Proben nicht für weitere Messungen geeignet.

Die Prozessparameter wurden daraufhin angepasst, wobei die ausschlaggebendste Änderung der Einlagen des Vliesstoffes in die kalte, statt in die warme Presse war. Die zur Herstellung genutzten Prozessparameter sind folgende:

- Einlagen
- Schmelzen + Aufheizen: 80° - 200°C, 30 bar, 10 min
- Halten: 200°C, 30 bar, 5 min
- Abkühlen: 200 °C - 80 °C, 30bar, 10 min
- Entnahme

Mit den angepassten Parametern konnten erfolgreich CF-Platten hergestellt werden wie in Abbildung 7.8 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Platte nach dem Abkühlen formstabil ist und weitere Kräfte ohne Ausritt des Matrixmaterials aufweist.



Abbildung 7.8: CF-Platte nach erfolgreichem Pressvorgang

Die hergestellten Platten wurden anschließend elektromagnetisch und mechanisch charakterisiert.

Die Carbonpapiere wurden von der RECO Oberflächentechnik GmbH, Merzig zur Verfügung gestellt und wurden teilweise einzeln im Handstrichverfahren hergestellt. Ein solches Carbonpapier ist in der nachfolgenden Abbildung zu sehen. Das Material wurde auf die gleiche Größe wie die Proben aus Vlies zugeschnitten und ist genau wie das Material aus Abbildung 7.8 sehr gleichmäßig und formstabil.



Abbildung 7.8: Carbonpapier

7.2 Elektromagnetische Charakterisierung der konsolidierten Probenmaterialien und CF-Papiere

Zur Messung der Materialien wird die in Abschnitt 5.3 beschriebene TEM-Messzelle verwendet. Analog zu der Vorgehensweise der Freiraummessungen, werden auch bei den Messungen in der TEM-Messzelle Referenzmessungen durchgeführt. Für die Referenzmessungen werden Probenmaterialien in der TEM-Zelle verlegt, die in luftgefülltem Bereich zwischen Innen- und Außenleiter der TEM-Messzelle angeordnet sind, siehe Abbildung 7.10 links. Durch die Anwesenheit kann die TEM-Welle innerhalb der Messzelle nahezu ungehindert propagieren. Mögliche Verluste durch eine schwächere DC-Kontaktierung der beiden Leitungsdrähte, sowie die zusätzliche Materialdicke werden demnach berücksichtigt. Die Probenmessung folgt schließlich durch Einbau einer vollständigen Probe, siehe Abbildung 7.10 rechts. Durch Verwendung eines Schwachspalters für den Probeneinschub, sind die Materialproben maßhaltig.

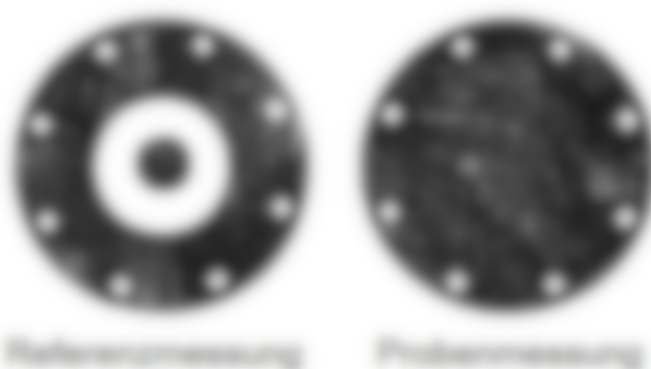


Abbildung 7.10: Probeneinschub zur Messung in der TEM-Messzelle

Es sind Reflexions- und Transmissionsmessungen der beschriebenen Materialproben für verschiedene Flächengeometrie und Materialzusammensetzungen durchgeführt worden.

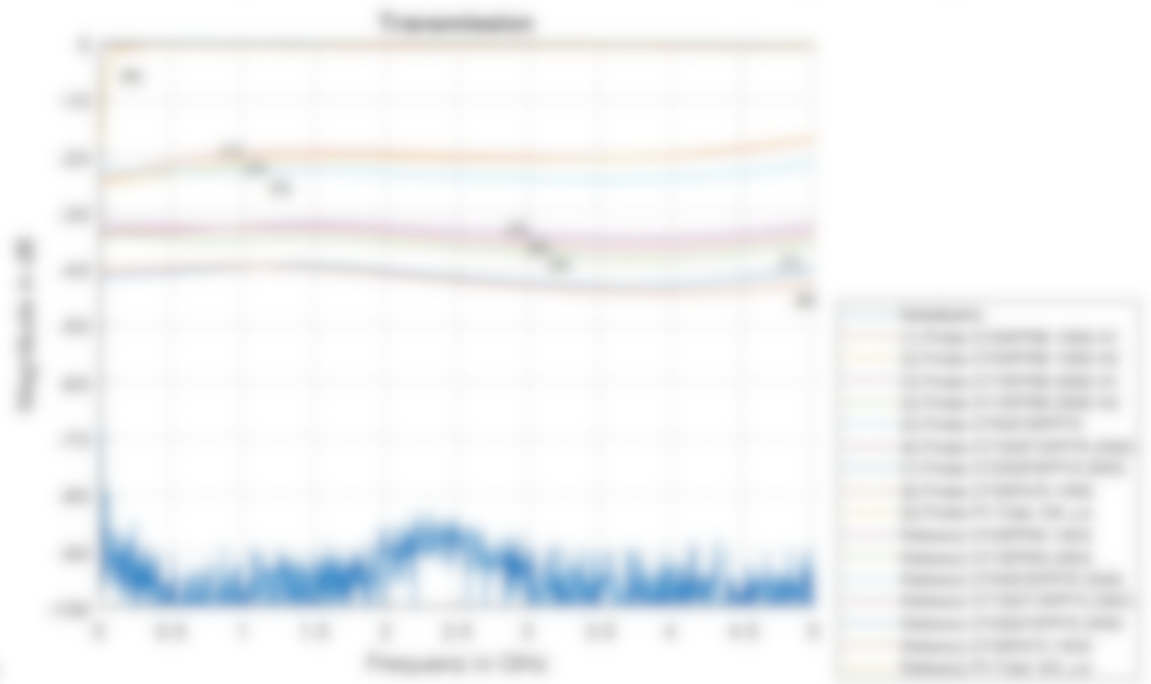


Abbildung 7.11

Abbildung 7.11 für die Transmission und die

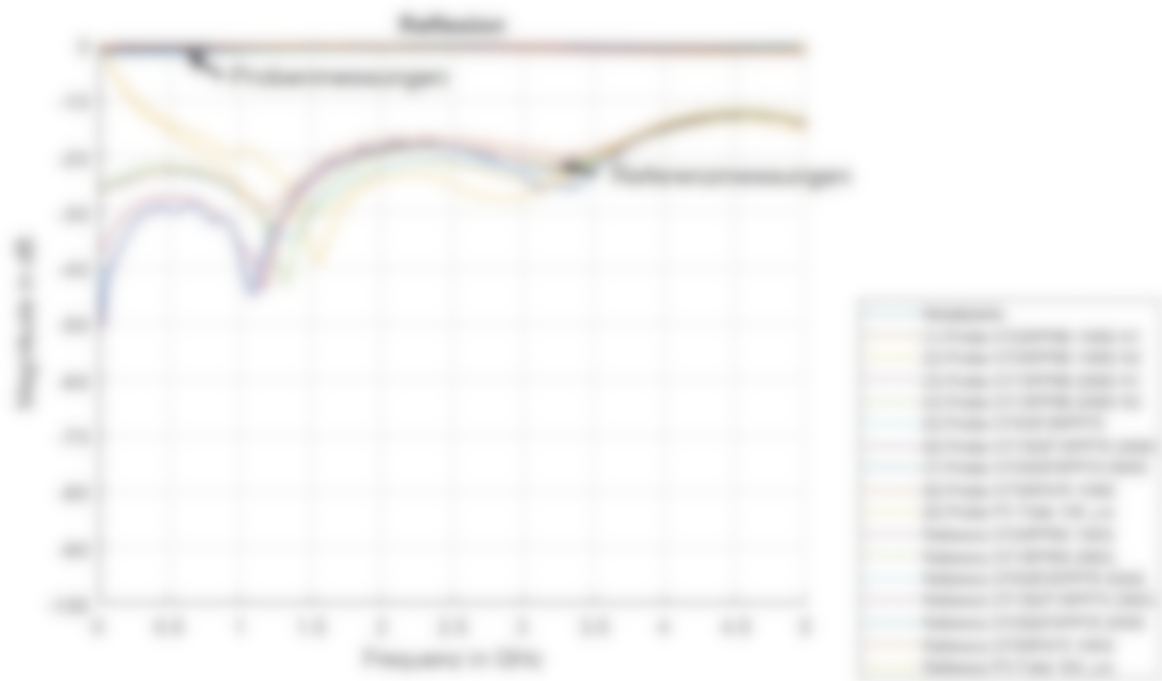


Abbildung 7.12 für die Reflexion dargestellt sind.

Transmissionsverluste dieser Kunststoffschichten bei. Unterhalb der 500 MHz ist die Transmission durch die PV Folie stärker gedämpft, was auf eine DC-Isolation zwischen den beiden Gehäusehälften der Messzelle hindeutet. Neben den Reflexionsmessungen in Form von Leitmessungen, ist eine Reflexionsmessung mit einer vollständigen Messplatte durchgeführt worden, mit der die Messdynamik ermittelt werden kann und hier über den gesamten Frequenzbereich bei mehr als 50 dB liegt.

Die verbleibenden Kurven im Bereich von -10 dB bis -40 dB stellen die Messkurven der CF-Messplatten dar. Im Diagramm entspricht die Meterablenkung näherungsweise dem Betrag der Transmission, aufgrund der vernachlässigbaren Verluste der Reflexionsmessungen. Es ist zu erkennen, dass die Meterablenkung mit zunehmender CF-Fächergewicht zunimmt und innerhalb des gemessenen Frequenzbereiches nur um wenige dB variiert.

Die Messkurven der Reflexionsmessungen, die in

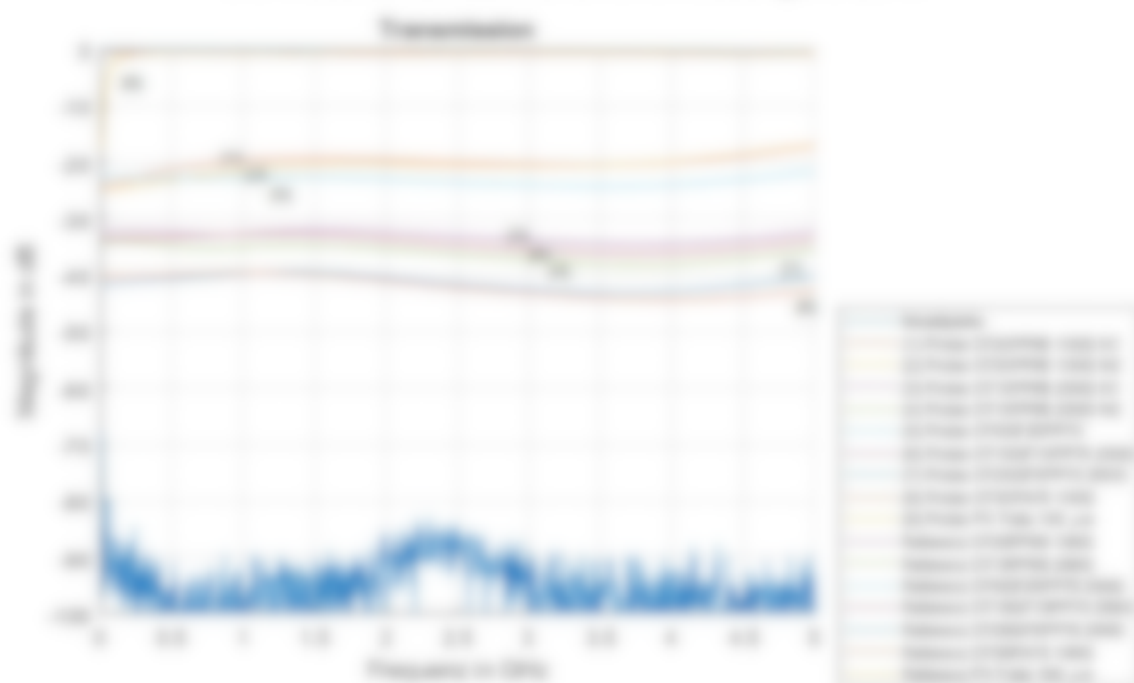


Abbildung 7.11 dargestellt sind, liegen für die Probenmessungen nahe der 0-dB-Linie. Dies deutet auf hohe Reflexionen an der Metalleberfläche hin und zeigt, dass die Meterablenkung der Proben maßgeblich durch Reflexionen bestimmt ist, die in Zusammenhang mit ihrer hohen elektrischen Leitfähigkeit stehen.

Die Transmissionsparameter der CP-Papiere sind in

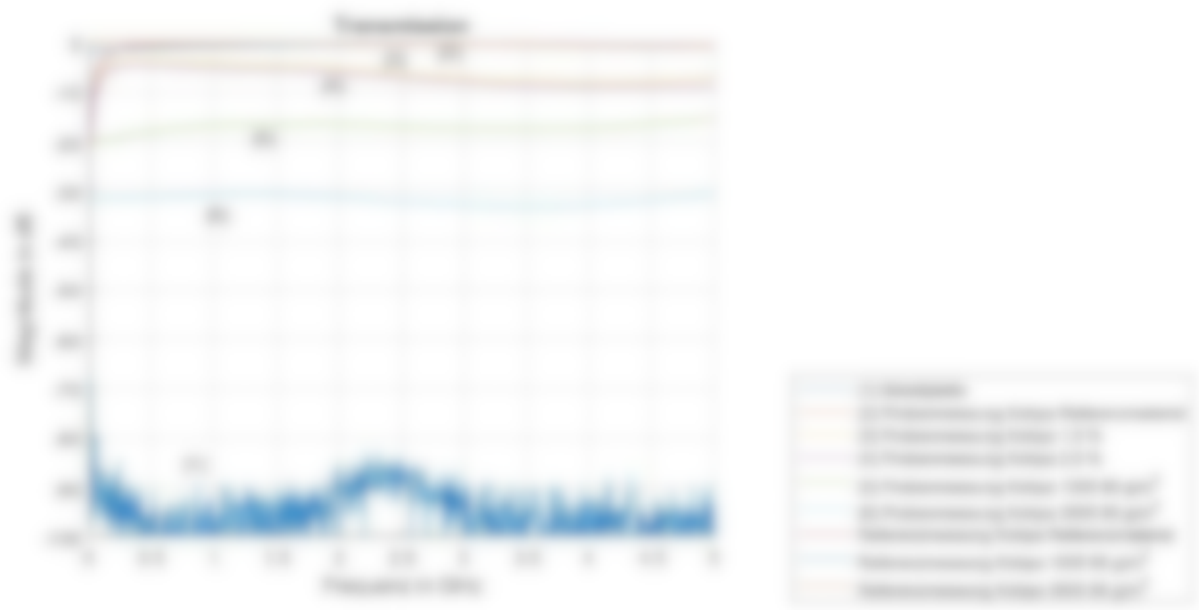


Abbildung 7.13 aufgeführt und weisen einen ähnlichen Kurvenverlauf, wie die beschriebenen Proben auf. Aufgrund der geringen CP-Fächergewichte erreichen die Materialien in der Transmission eine geringere Dämpfung. Da im Vergleich zu den beschriebenen Proben ein höherer Anteil transmittiert, verringert sich zugleich die

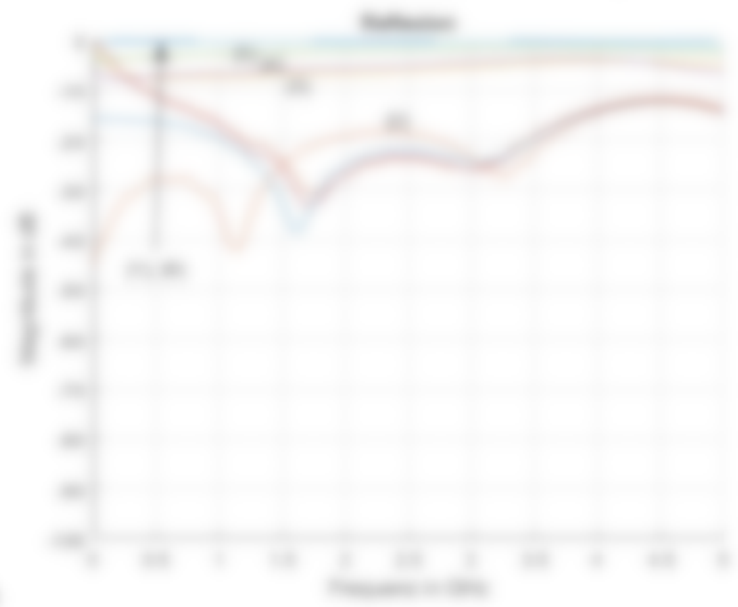


Abbildung 7.14 aufgeführt und weisen einen ähnlichen Kurvenverlauf, wie die beschriebenen Proben auf. Aufgrund der geringen CP-Fächergewichte erreichen die Materialien in der Transmission eine geringere Dämpfung. Da im Vergleich zu den beschriebenen Proben ein höherer Anteil transmittiert, verringert sich zugleich die

Abbildung 7.13 anhand der Reflexionsparameter zu erkennen, bei denen die Messkurven für die Materialien mit abnehmendem CF-Anteil deutlich unter der 0-dB-Linie liegen.



Abbildung 7.13: Transmissionsparameter der CF-Papiere

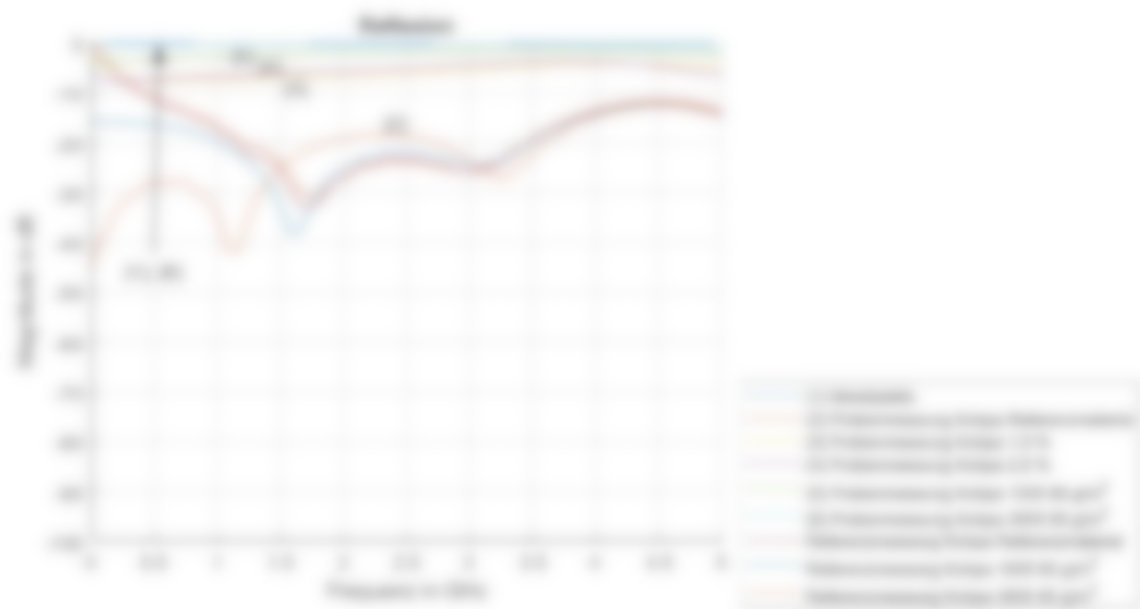


Abbildung 7.14: Reflexionsparameter der CF-Papiere

Neben den Messungen in der TEM-Messzelle sind weitere Freiraummessungen an verschiedenen Materialproben, sowie der teilweise mit CF-Papier beschichteten Halbleitern, bis zu einer Frequenz von 40 GHz durchgeführt worden. Für die

Abgebildeten Proben sind die ermittelten Transmissionsparameter in



Abbildung 7.15 dargestellt. Alle Materialien, die ein CF-Fächergewicht von mehr als 20 g/m² besitzen, weisen eine damit hohe Dämpfung in der Transmission auf, dass die Messungen in Resonanz untergehen. Für das Material mit 20 Gew.-% CF, 20 Gew.-% PP und einem Fächergewicht von 100 g/m² liegt die Materialdämpfung unter Berücksichtigung der Leermessung und Mithitung zu 25,8 dB. Für dieses Material ist über die TEM-Messung ein Wert von ca. 20 dB ermittelt worden, somit ist die in der Fernsummessung ermittelte Materialdämpfung um 5,8 dB höher. Für das Material mit 5 Gew.-% CF, 20 Gew.-% PP, 20 Gew.-% GF und einem Fächergewicht von 200 g/m² beträgt die Materialdämpfung im Mittel 20 dB. Die über die TEM-Messung ermittelte Dämpfung dieses Materials beträgt etwa 25 dB, und weicht damit um 5 dB von der Fernsummessung ab. Höhere Dämpfungswerte der Transmission sind mit zunehmender Frequenz zu erwarten, da die Reflexion an den Oberflächen leitfähiger Materialien zunimmt (Hörig).



Abbildung 7.15: Frequenzmessung korrodierter Proben

In einer weiteren Transmissionmessung ist die teilweise mit CF-Papier beschichtete Wellplatte untersucht worden. Die Messergebnisse sind zusammen mit den Referenzmessungen in Abbildung 7.16 dargestellt. Im unteren Frequenzbereich liegt die Materialdämpfung im Bereich von 20 dB. Mit steigender Frequenz steigt die Dämpfung auf Werte von bis zu 30 dB an. Höhere Dämpfungswerte können nicht nachgemessen werden, da die Nachswinggrenze des offenen Messaufbaus ab etwa 30 GHz erreicht ist. Eine Untersuchung der Wellplatte in der TEM-Messzelle ist nicht möglich, da diese beim Einbau zu stark deformiert wird.

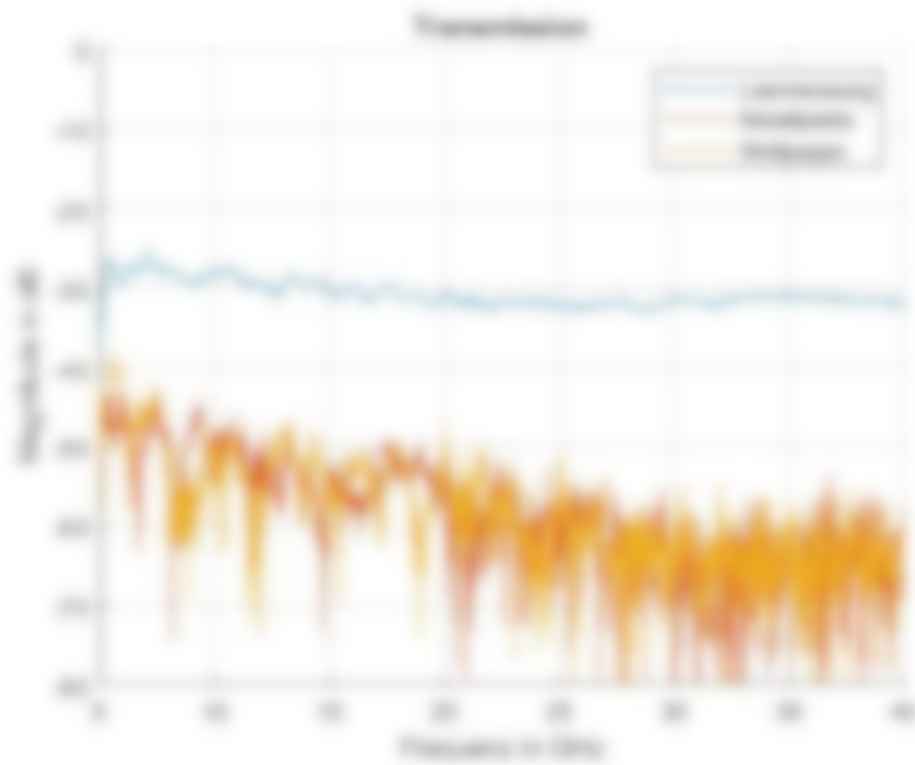


Abbildung 7.16: Fliehkraftmessung der Verschleißigkeit mit CF-Papier beschichteteren Metallproben

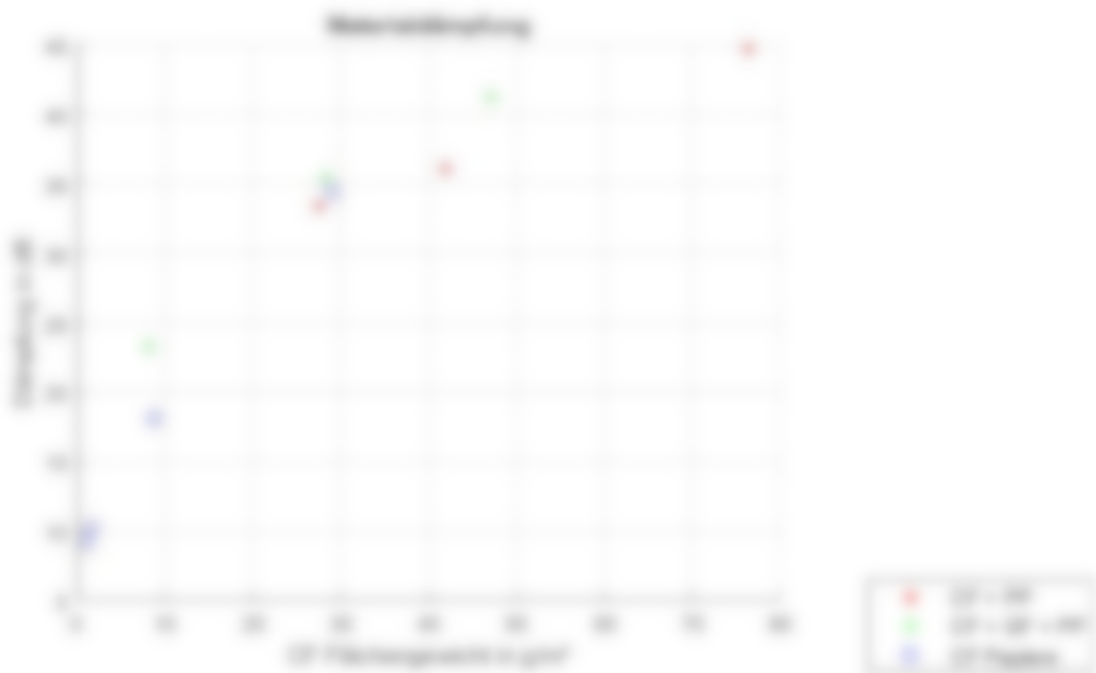


Abbildung 7.17 sind die Messergebnisse der berücksichtigten Proben und der CF-Papiere zusammengefasst und die Materialdichtungen über die CF-Flächengewichte aufgetragen. Die dargestellten Materialdichtungen der Proben folgen jeweils durch

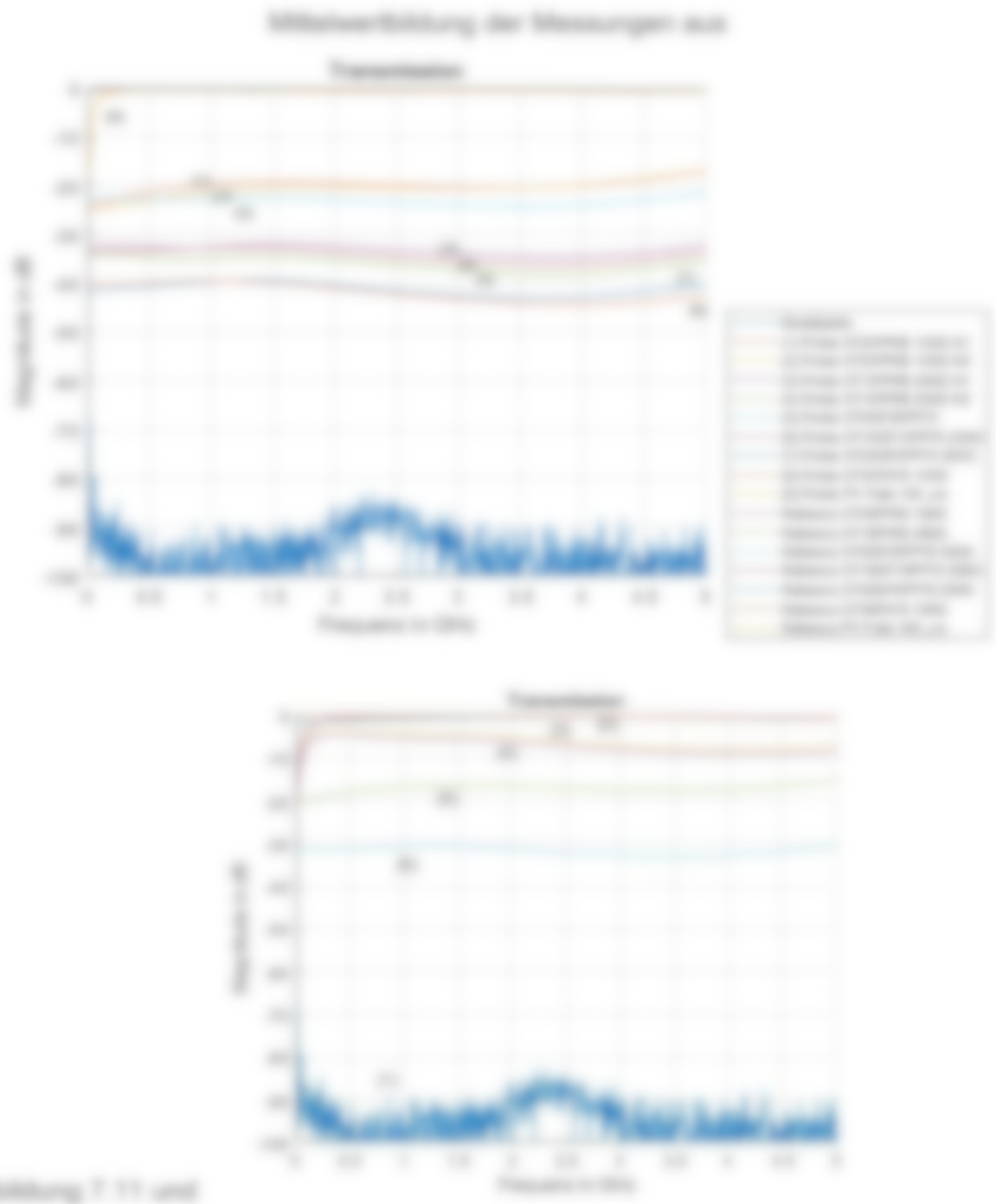


Abbildung 7.11 und

—	—
—	—
—	—
—	—
—	—
—	—
—	—
—	—
—	—
—	—

Abbildung 7.12 über den Frequenzbereich von 100 kHz bis 5 GHz.

Die CF-Fächergewichte erstrecken sich bis zu einer Höhe von ca. 30 GHz, mit der eine maximale Filterdämpfung von 45 dB resultiert. Innerhalb des untersuchten Bereiches

ist die Materialdämpfung dämpfungsgradweise proportional zum CF-Flächengewicht. Trotz der verschiedenen verwendeten Füllmaterialien PP, GF und Zellulose ist eine eindeutige Unterscheidung der Proben nicht möglich. Es resultiert, dass das Dämpfungsverhalten maßgeblich durch den CF-Anteil bestimmt ist.

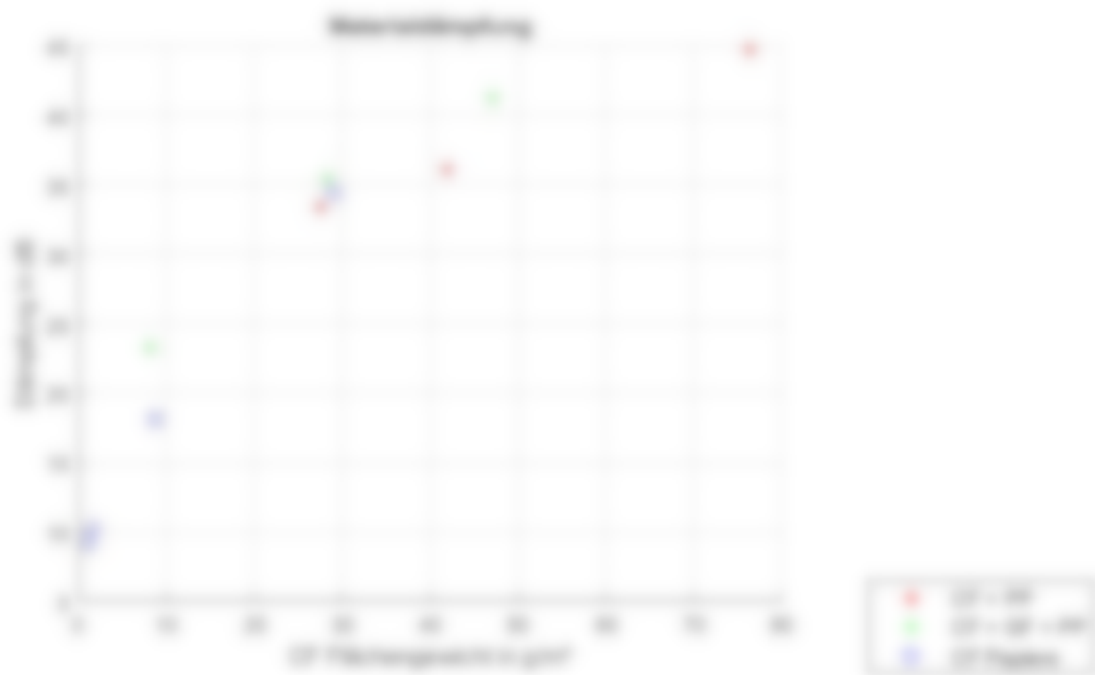


Abbildung 7-17: Materialdämpfung in Abhängigkeit des CF-Flächengewichtes

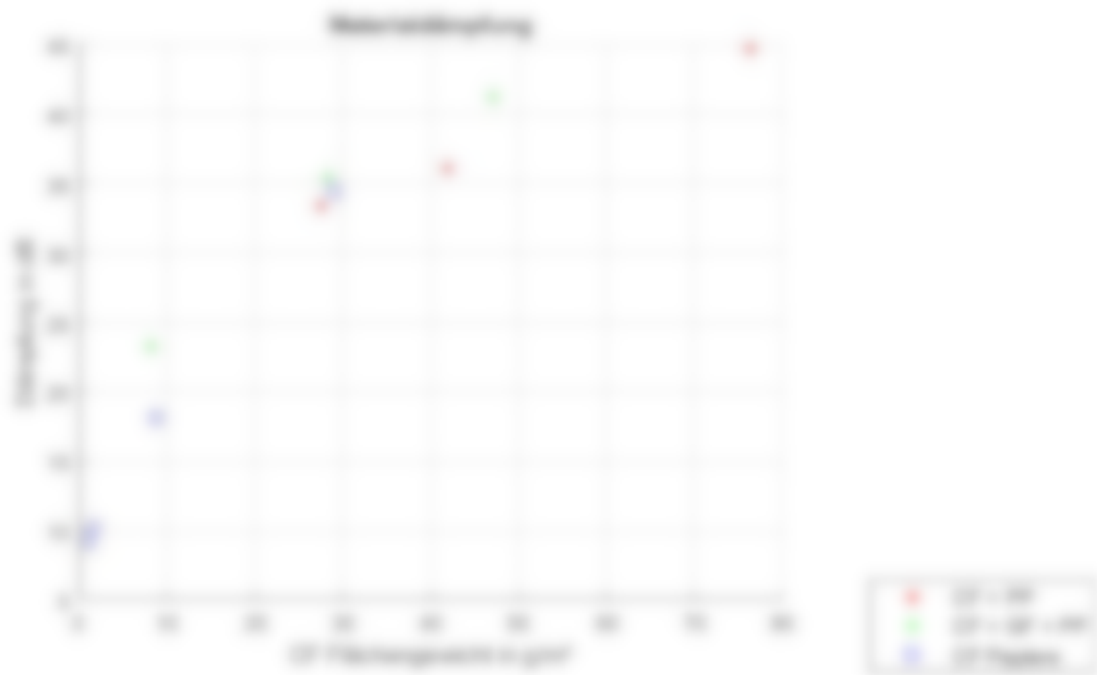


Abbildung 7.17 sind die Messergebnisse der beschriebenen Proben und der CF-Papier zusammengefasst und die Materialdichtungen über die CF-Fächergewichte aufgetragen. Hierbei sind die CF-Fächergewichte aus den gemessenen Fächergewichten der jeweiligen Materialien abgezogen. Die dargestellten Materialdichtungen der Proben folgen jeweils durch Mittelwertbildung der Messungen aus Abbildung 7.11 und Abbildung 7.12 über den Frequenzbereich von 100 MHz bis 2 GHz.

7.3 Prüfung des Absorptionsverhaltens zur Erwärmung

Neben den Schirmungs- und Reflexionseigenschaften ist die Absorption von Mikrowellenenergie ein Effekt, der bei den Carbonfasern ausgenutzt werden kann. Durch

die Absorption der elektromagnetischen Wellen wird durch HF-Leistung in Wärme umgewandelt. Verantwortlich dafür sind die Verluste des Materials, d.h. der Carbonfaser bzw. des Matrix, in die die Carbonfasern eingebettet sind. Im Fall der untersuchten Proben besteht die Matrix aus Polypropylen (PP), dessen Verluste im Vergleich zu denen der Carbonfaser zu vernachlässigen sind. Das bedeutet die Erwärmung wird fast ausschließlich durch die Carbonfasern verursacht. Die Gesamtverluste eines Materials setzen sich primär aus den dielektrischen Verlusten ϵ'' (siehe hierzu auch Kapitel 6.1) und den Verlusten aufgrund der Leitfähigkeit σ des Materials (siehe Kapitel 6.2) zusammen.

Üblich werden beide Verlustmechanismen durch die sog. effektiven Verluste ϵ_{eff}'' ausgedrückt, wobei gilt

$$\epsilon_{eff}'' = \epsilon'' + \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \quad (7.1)$$

Dabei bezeichnet ϵ_0 die Dielektrizitätskonstante des Vakuums und $\omega = 2\pi f$ die Kreisfrequenz. Die Frequenz f beträgt in den durchgeführten Erwärmungsexperimenten 2,45 GHz.

Wird das elektrische Feld E innerhalb des Probenvolumens V als konstant angenommen, so kann damit die in Wärme umgewandelte Leistung zu

$$P_{th} = 2 \times N_s \cdot \epsilon_{eff}'' E^2 V \quad (7.2)$$

berechnet werden. Die umgesetzte Leistung ist damit proportional zu den Verlusten und proportional zur Frequenz.

Zur Untersuchung der Hochfrequenz-Absorptionseigenschaften von CF-Materialien bei Bestrahlung mit höheren Mikrowellenleistungen ist ein Messaufbau mit einem Mikrowellenofen konzipiert worden, der in Abbildung 7.16 zu erkennen ist. Um Temperaturmessungen an innenliegenden Materialproben anbringen zu können, ist eine Gehäuseöffnung zur Kabeldurchführung erforderlich. Ohne weitere Vorkehrungen ist eine Gehäuseöffnung gefährlich, da dies im Betrieb zu einer Auskopplung der Mikrowellenstrahlung führen kann, die aufgrund der hohen Leistungen zu thermischer Schädigung menschlichen Gewebes führen kann, oder bei benachbarten elektronischen Geräten zu Beeinträchtigungen führen kann.



Abbildung 7.16: Mikrowellenofen mit Hochleiterdurchführung, Rückwärtssicht links und Innenraum rechts

Im Versuchsaufbau wird die Durchführung des Sersuchkabels mittels eines röhrenförmig belagerten Rundhohlleiters realisiert, der einen Hochpassfilter darstellt. Die TE_{10} -Grundmode eines Rundhohlleiters ist erst ab einer Frequenz von

$$f_c = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_r} \cdot 2\pi r} \quad (7.2)$$

ausbreitungsfähig (PurT1). Hierbei resultiert μ_{TM} für die TE_{10} -Grundmode aus der ersten Nullstelle der ersten Ableitung der Besselfunktion und beträgt 1,641. Die übrigen Variablen ϵ_r , r beziehen sich auf den Radius des Hohlleiters und die Permittivität bzw. Permittivität des Hohlleiter-Innenraums. Anhand der Formel ist zu erkennen, dass die

Radius des Hohlleiters mit steigender Frequenz verringert werden muss, um die Ausbreitung der Grundmode zu verhindern. Der Durchmesser für den verwendeten Hohlleiter ist entsprechend der Betriebsfrequenz des Mikrowellenofens in Höhe von 2,45 GHz angepasst. Die Verwendung eines metallischen Gewirchleiters birgt eine weitere Gefahr, da bei einer korrekten Leitergeometrie entsteht, dass ein TEM-Grundmode bereits ab 1 Hz durch den Randstrom propagiert. Dies erfordert den Einsatz eines flächigen Temperatursensors, der aus einem Galliumarsenidkristall besteht und über ein Dielektrikum an die aufliegende Mikrowellenstrahlung angeschlossen ist.

In Mikrowellenöfen der älteren Generation sind Hochfrequenz-Generatoren verbaut, die die effektive Heizleistung durch periodisches Ein- und Ausschalten der Quelle bei voller Leistung steuern. Ein Bestrahlen der Probe mit einer Leistung im Bereich von 1000 W würde zu einer zu schnellen Erwärmung des Probenmaterials führen, welches eine Temperaturmessung erschwert. Aus diesem Grund wird für diesen Einsatz ein Mikrowellenofen mit moderner Technologie eingesetzt, bei dem die Mikrowellen-Leistung kontinuierlich zugeführt werden kann.

Zur Durchführung der Messung sind mehrere mit einer PP-Matrix korrespondierende CF-Proben auf eine Körperlänge von ca. 1 cm und 2 cm zurechtgeschritten worden, an denen die Temperaturmessung mittels Ta-Feinwand befähigt wurde, siehe Abbildung 7.18 links. Die Proben wurden mit einer Mikrowellen-Leistung von 100 W bestrahlt und der Temperaturverlauf gemessen. Zusätzlich wurde eine Probe schrittweise mit Mikrowellen bestrahlt, um die Materialveränderung optisch untersuchen zu können. In der Abbildung und weiter rechts aus Abbildung 7.18 ist zu erkennen, dass die PP-Matrix verdrängt, die Carbonfasern kollabieren und sich das eingewonnenen Volumen vergrößert. Der Temperaturverlauf einer kontinuierlichen Bestrahlung ist in Abbildung 7.20 zu erkennen. Für die CF-Materialien musste der Versuch nach ca. 10 Sekunden unterbrochen werden, da die PP-Matrix nach diesem Zeitraum verdrängt ist und die freiliegenden Fasern in Zusammenhang mit der hohen Feldstärke zu Lichtbogenbildung mit schneller Temperaturerhöhung geführt haben.



Abbildung 7.19: Präparierte CF-Materialproben, schrittweise erstellt

Neben den CF-Materialien ist eine Referenzprobe aus reinem Teflon erwidert worden. Teflon ist für seine geringen Verlustfaktoren bekannt, sodass bei dem Material nur geringer Temperaturanstieg zu erwarten ist. Dies ist auch in der Messung zu erkennen.

Der Versuch zeigt, dass es bei CF-Materialien zu einer starken Erwärmung des Materials kommt, die Mikroverformung somit teilweise abstrahlt und in thermische Leistung umgewandelt wird.

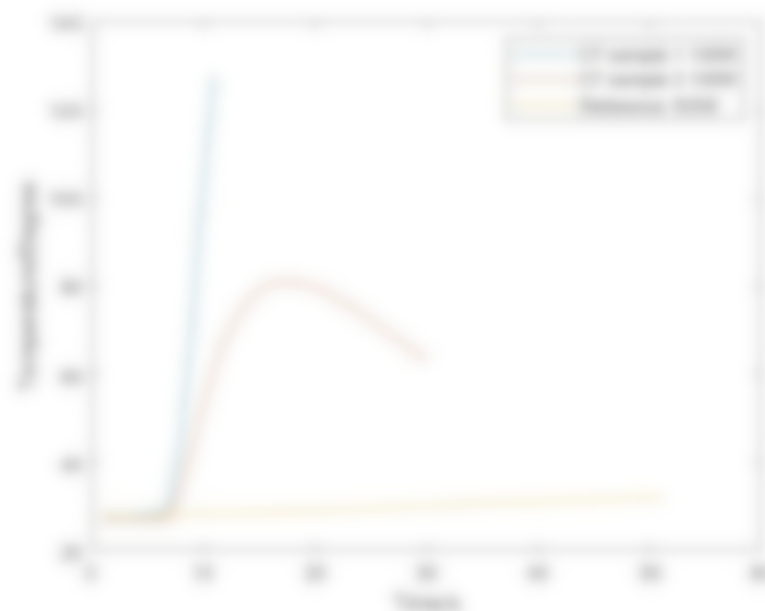


Abbildung 7.20: Temperaturverlauf der erwiderten Materialproben

7.4 Untersuchungen zur Reduzierung der Reflexion

Während im Straßenverkehr andere Verkehrsteilnehmer sowohl optisch als auch auf dem Radar möglichst gut sichtbar sein wollen, besteht gerade in manchen nicht-zivilen Anwendung der Bedarf nach einer möglichst schlechten Sichtbarkeit, d.h. einer möglichst

geringer Dielektrizitätsverlust (Low-Loss-Technologie). Das dient einerseits dem, schwere erreicht zu werden insbesondere aber auch dem, die Wirksamkeit von Gegenmaßnahmen im Falle einer Störung transparent durch Flugkörper zu erfüllen. Es ist insbesondere aber notwendig, den eigenen Radarüberwachungsprozess zu reduzieren. Das kann transparent durch eine besondere Formgebung der eigenen Plattform (z.B. Schiff oder Flugzeug) erreicht werden aber auch durch die Verwendung von reflektierenden Materialien. Das Ziel ist in beiden Fällen, möglichst wenig Leistung zurück zum Radar zu reflektieren – entweder durch Reflexion in andere Richtungen oder durch Absorption der empfangenen Leistung. Während die Absorption oftmals sehr schmalbandig ist, erreicht sich die diffuse Reflexion in der Regel als breitbandige und ist damit über einen großen Frequenzbereich hinweg wirksam. Allerdings ist die Freiheit der Formgebung oftmals durch andere Randbedingungen eingeschränkt, transparent durch notwendige Öffnungen in der Höhe oder durch Decke auf dem Deck eines Schiffes. Hier sind z.B. eine Deckenbohrung denkbar, die so erstellt über bestehende Öffnungen oder Deckaufbauten gelegt werden kann und die erfindeter elektromagnetischer Wellen effizient in verschiedene Richtungen reflektiert.

Eine Möglichkeit verlustarmen mit großer Decke und möglichst geringer Reflexion in der Materialoberfläche herzustellen, ist durch den Aufbau eines Jansen-Antennensystems gegeben. Dieses besteht aus mehreren dünnen metallischen Plattenmaterialien, die mittels elektromagnetisch relevant transparenter Platten in einem Abstand von 1/4 Wellenlänge angeordnet sind (2018). In Abbildung 7.21 ist der Schichtenbau eines Jansen-Antennensystems dargestellt, der für die nachfolgenden Messungen aus Folie 100 CF Papier aufgebaut wurde. In diesem von allen Plattenmaterialien die höchste Transparenz aufweist, in abgestimmtem Aufbau wird eine erfindende Höhe erreicht in der Oberfläche reflektiert, während diese in der Schichtenbau ist und wird dem reflektiert reflektiert. Aufgrund des Abstandes der Platten von einer Viertel Wellenlänge kommt es zu einer destruktiven Überlagerung, durch die eine Rückstreuung in die Ursprungsrichtung vermieden wird. Durch die geometrische Abhängigkeit von der Wellenlänge ist der Aufbau schmalbandig. Breitbandigere Aufbauten können durch Variation der Plattenabstände erreicht werden.



Abbildung 7.21: Aufbau des Jurnam-Absorbers aus Kupfer 1000

Es ist ein Jurnam-Absorber mit einer Kupfer 1000 Lage sowie zwei Kupfer 1000 Lagen aufgebaut und gemessen worden. Die Platten sind in einem Abstand von 5 mm zueinander angeordnet, sodass die Plattenabstände 20 mm betragen. Dies entspricht einer Frequenz von 15 GHz. In einem Messaufbau gemäß Abbildung 7.22 ist das Reflexionsverhalten der Jurnam-Absorber gemessen worden.



Abbildung 7.22: Messaufbau zur Untersuchung der Reflexion

Die Messung erfolgt hier mit Hilfe eines Netzwerkanalysators. Zusätzlich, d.h. Send- und Empfangsantenne sind identisch. Neben den Jurnam-Absorbern sind eine Metallplatte sowie ein Hochfrequenz-Pyramidenabsorber gemessen worden, um die Messergebnisse vergleichen zu können. Die Messergebnisse folgen mit Abbildung 7.23, in der die Reflexion in dem Frequenzbereich zwischen 5 GHz und 20 GHz dargestellt ist. Sowohl Metallplatte als auch die Jurnam-Absorber weisen ein ähnliches Reflexionsverhalten auf. Es sind periodische Eintrübe zu erkennen, die auf

Mehrfachreflexionen des Messaufbaus zurückzuführen sind. Bei 15 GHz ist kein ausgeprägter Frequenzgang zu erkennen, der auf eine Funktion des Jurnam-Messaufbaus hinweist. Aufgrund der Ähnlichkeit zur Messprobe, kann gefolgert werden, dass ein hoher Anteil der einfallenden Welle unmittelbar an der Oberfläche der kalten 1000 Schicht reflektiert wird. Der verbleibende Pyramidenmessaufbau führt hingegen zu einer Unterdrückung der Mehrfachreflexionen im Messaufbau. Die hohen Reflexionen an der Materialoberfläche führen dazu, dass die Materialien für den Aufbau eines Jurnam-Messaufbaus ungeeignet sind.

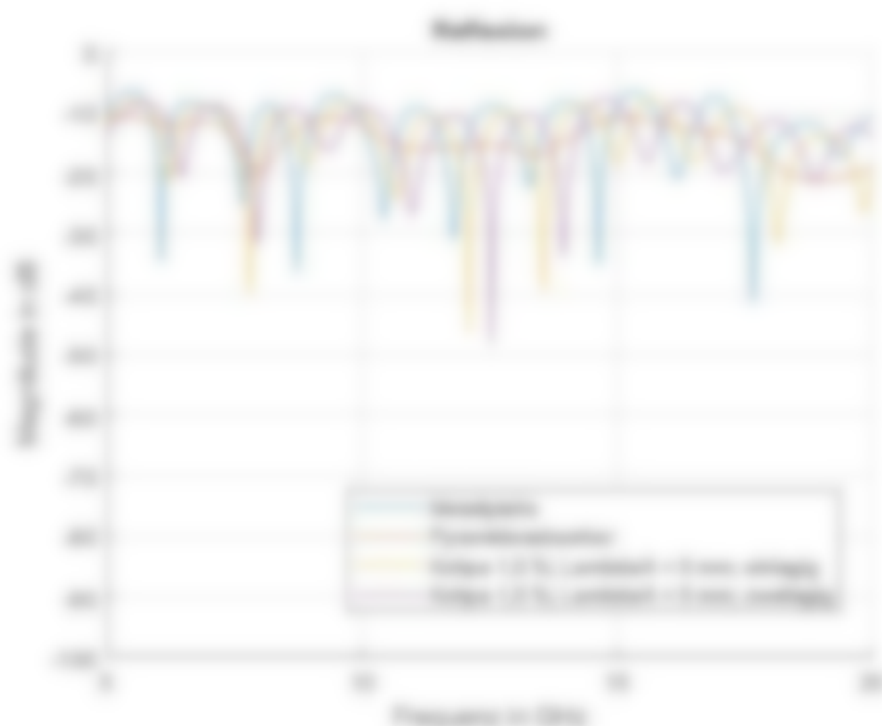


Abbildung 7.25 Messergebnisse des Jurnam-Messaufbaus und Pyramidenmessaufbaus

Ein weiterer Ansatz die gestrichelte Reflexion zu minimieren lag bei Probeoberflächen, die Unterstrukturen aufweisen, um eine diffuse Reflexion herbeizuführen. Zu diesem Zweck ist eine Materialprobe des beschriebenen CF-Materials mit 20 Gew.-% CF, 80 Gew.-% PP und einem Flächengewicht von 100 g/m² unregelmäßig gefaltet worden, siehe Abbildung 7.24. Eine glatte Materialprobe des gleichen Materials sowie die gefaltete, unebene Materialprobe ist nach dem oben beschriebenen Messprinzip untersucht worden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7.26 für den Frequenzbereich 5 bis 40 GHz dargestellt.

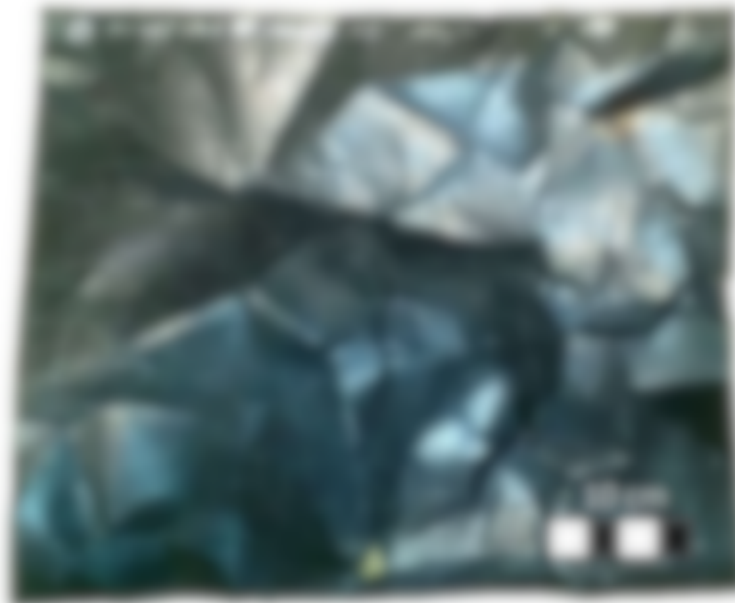


Abbildung 7.26: Messergebnisse mit Flächenunregelmäßigkeiten

Nachdem die Messergebnisse ist zu erkennen, dass die unebene Probe über weite Teile des Messbereichs eine um ca. 3 dB geringere Reflexion gegenüber der glatten Probe aufweist. Das bedeutet eine Minderung der rückgestrahlten Leistung. Eine Faltung bzw. Fröpfung der CF-Membran stellt somit eine Möglichkeit dar, eine antenneartige Welle gezielt in eine zur Einfallrichtung verschiedene Ausfallrichtung zu reflektieren und dadurch den Rückstreuquerschnitt zu steuern. Besonders deutlich wird die Reduzierung im Bereich um 30 GHz, was einer Wellenlänge von 10 mm entspricht. Aus der Theorie ist zu erwarten, dass sich die Diffusivität mit der Erhöhung der Frequenz ebenfalls erhöht, da die Rauigkeit bezogen auf die Wellenlänge zunimmt. Das Wellen kann bei einer Rauigkeit von etwa 1/10 Wellenlänge gezielt die destruktive Interferenz ausgenutzt werden kann. Im Falle der Messung entspricht dies hier etwa einer Rauigkeit von 2,5 mm, was in erster Näherung der Höhe der Unregelmäßigkeiten der gemessenen Probe entspricht. Dies erklärt auch, weshalb der reduzierende Bereich relativ schmal um 30 GHz ausgeprägt ist. Bei einer geringeren Rauigkeit, kann also eine gezielte Beeinflussung über die Frequenz erreicht werden.

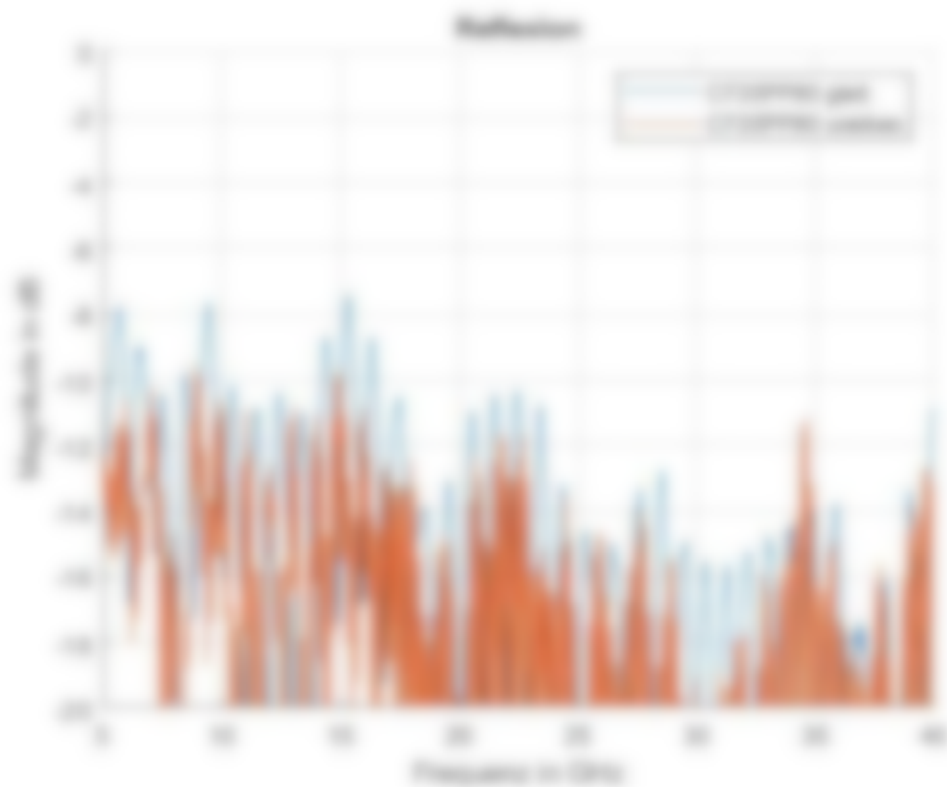


Abbildung 7.25: Vergleichsmessung einer ebenen und unebenen Materialprobe

Weitere Untersuchungen zur Minimierung der Reflexion sind über eine Materialprobe aus GF-Papier durchgeführt worden. Die Probe, die in Abbildung 7.26 dargestellt ist, weist ein Prägemuster auf. Durch Streckung und Stauchung der Probe, lassen sich die Steigung und die Höhe der Rippen verändern. Eine Übersicht der untersuchten Streckungen und Stauchungen folgt mit Tabelle 7.4.



Abbildung 7.26: Materialprobe eines GF-Papiers mit Prägemuster

Tabelle 7.6: Probiergröße für verschiedene Streckungen bzw. Stauchungen

Probiergröße	Strecke in %	Strecke in %	Strecke in %
1	22	22	12
2	27	26	15
3	31	26	16

Die Materialgröße ist für die verschiedenen Größen im Messaufbau nach Abbildung 5.10 gemessen worden, um das gemessene Reflexionsverhalten zu untersuchen. Der Frequenzbereich der Messungen liegt zwischen 5 GHz bis 40 GHz. Die Winkel der Sendee- und Empfängersysteme sind jeweils im Bereich von 15 Grad bis 45 Grad in 5 Grad Schritten variiert worden. Der Winkel von 0 Grad entspricht einer orthogonalen Ausrichtung der Antennen zur Probe und kann aufgrund der nötig eingesetzten Abschirmung nicht angenommen werden.

Die Auswertung der Messungen erfolgt aus Gründen der Darstellbarkeit bei einer fixierten Frequenz von 20 GHz. In Abbildung 7.27 bis Abbildung 7.29 sind die von Sendee- und Empfängersystem abhängigen Reflexionsparameter für die Probiergrößen dargestellt. Die Messungen sind mittels einer Referenzmessung kalibriert, bei der eine Metallplatte als Referenz verwendet werden ist. Diese stellt einen nahezu idealen Reflektor für die gemessene Reflexion dar. In Abbildung 7.28 und Abbildung 7.29 sind die Streuparameter zu erkennen, bei der die Probe geteilt ist und die Flächen der Prüfung in einem flachen Winkel verlaufen. In diesen Messungen liegt die Reflexion für die eingestellten Winkelbereiche um ca. 5 dB unterhalb der einer Metallplatte. Eine winkelabhängige Änderung ist hier kaum zu erkennen. Für die getestete Probe ist die gemessene Reflexion um bis zu 20 dB gegenüber der Metallplatte ab, sobald der Winkel der Sendee- und Empfängersysteme ähnliche Werte annehmen. Dies zeigt, dass eine Reduzierung der gemessenen Reflexion bei 27 Materialen erzielt werden kann, indem in die Materialen ein Prägemuster eingebracht wird.

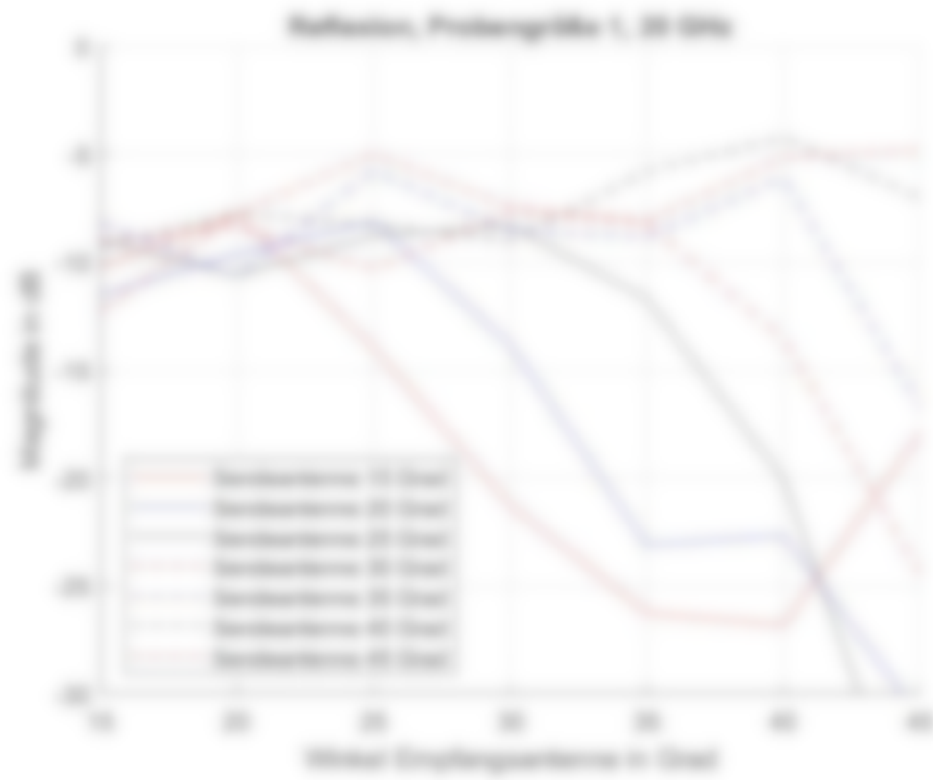


Abbildung 7.27: Messung der gemittelten Reflexion für die Probiergröße 1

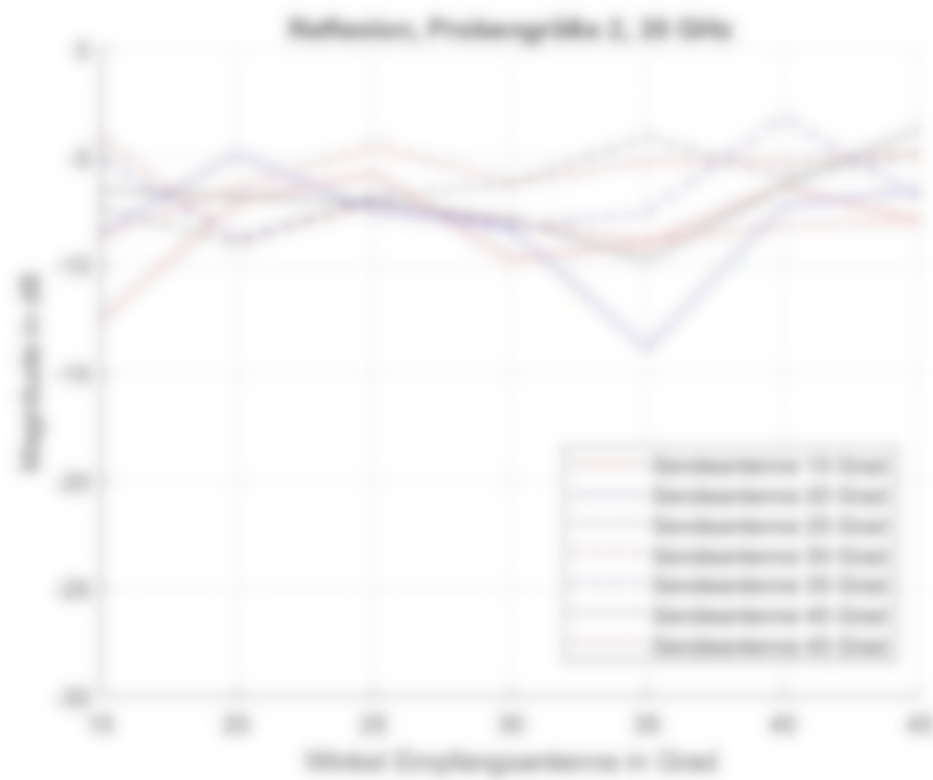


Abbildung 7.28: Messung der gemittelten Reflexion für die Probiergröße 2

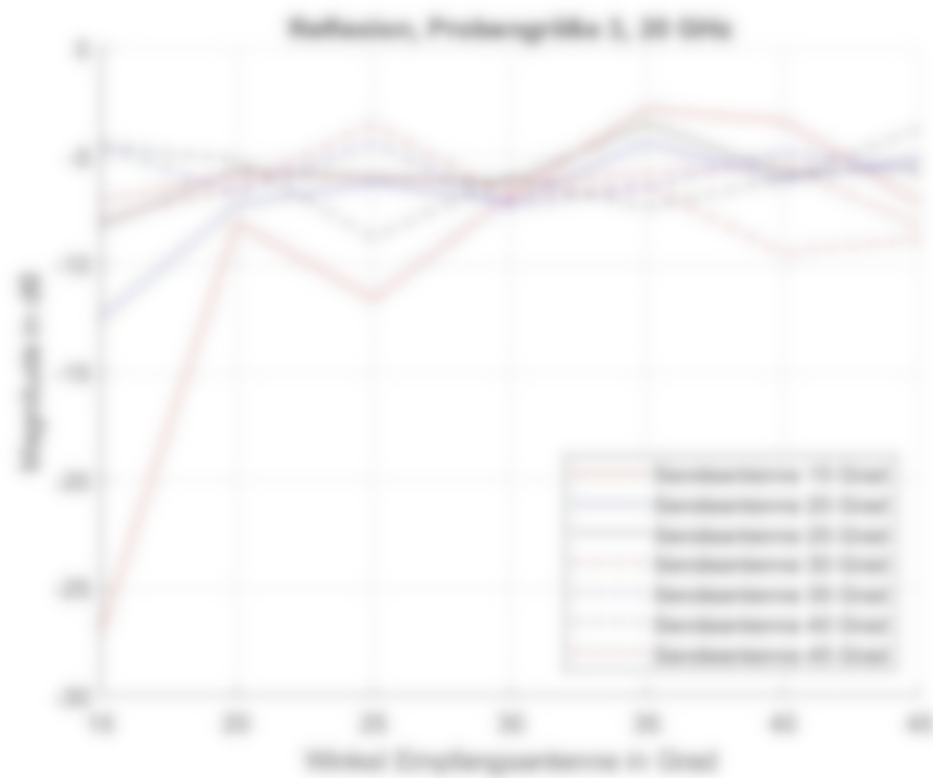


Abbildung 7.20 Messung der gemittelten Reflexion für die Probiergröße 1

7.5 Untersuchungen zur Erhöhung der Reflexion

Mit den zwei beschriebenen Messung zur Bestimmung der Reflexionskoeffizienten werden im Frequenzbereich der heute verwendeten Automobilstrahler 70 - 81 GHz hochauflösende Messungen an Teststrukturen durchgeführt. Diese wurden sowohl mit einer geometrischen Simulation gemessen als auch mit einer Schichtmessung für Mikrowellen, die zusätzlich an den Stellen der Ellipsen- und Kreisstrukturen mit Carbonfasern ausgestattet war. Die Anordnung der Testmessungen ist in Abbildung 7.20 zu sehen.



Abbildung 7.20: Testkumery mit normaler Bekleidung, Motorrad-Schutzbekleidung und Schutzbekleidung mit Carbonfasern an Ellenbogen und Knie

Die untersuchten Reflexionspunkte am Körper sind in den nachfolgenden Bildern dargestellt. Die Messung erfolgte dabei frontal auf den Testkumery in gewöhnlicher Bewegung. Die Werte des Rückstrahlequivalenzmaßes sind farblich kodiert.

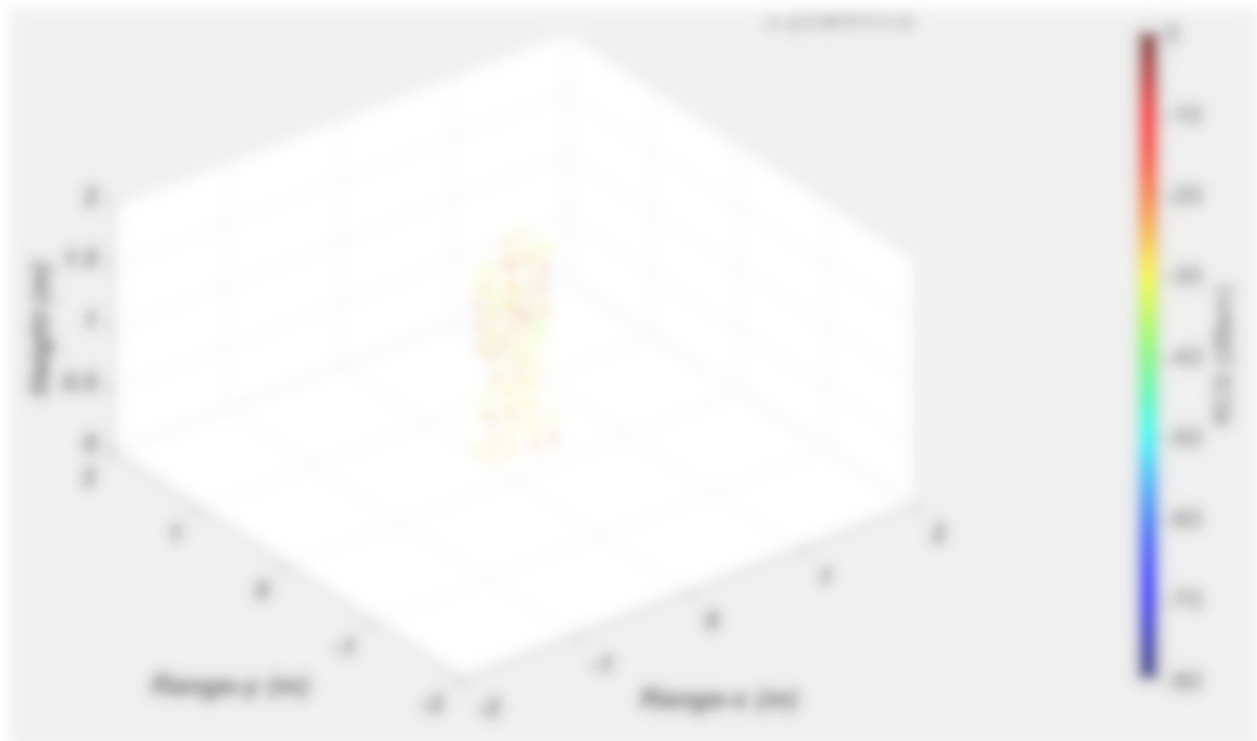


Abbildung 7.21: Untersuchte Reflexionspunkte in 3-D-Darstellung

Es ist zu erkennen, dass die RCS-Werte der einzelnen Reflexionspunkte höher sind als das Polarogramm in Abbildung 5.15. Der Grund hierfür liegt darin, dass in Abbildung

5.13 eine integrale Messung über alle strukturellen Reflexionspunkte durchgeführt wird. In der 3D-Darstellung lässt sich die genaue Lage der Reflexionsstellen nur schwer ablesen, daher sind in Abbildung 7.32 zwei perspektivische Ansichten (Frontansicht, Seitenansicht) gezeigt.

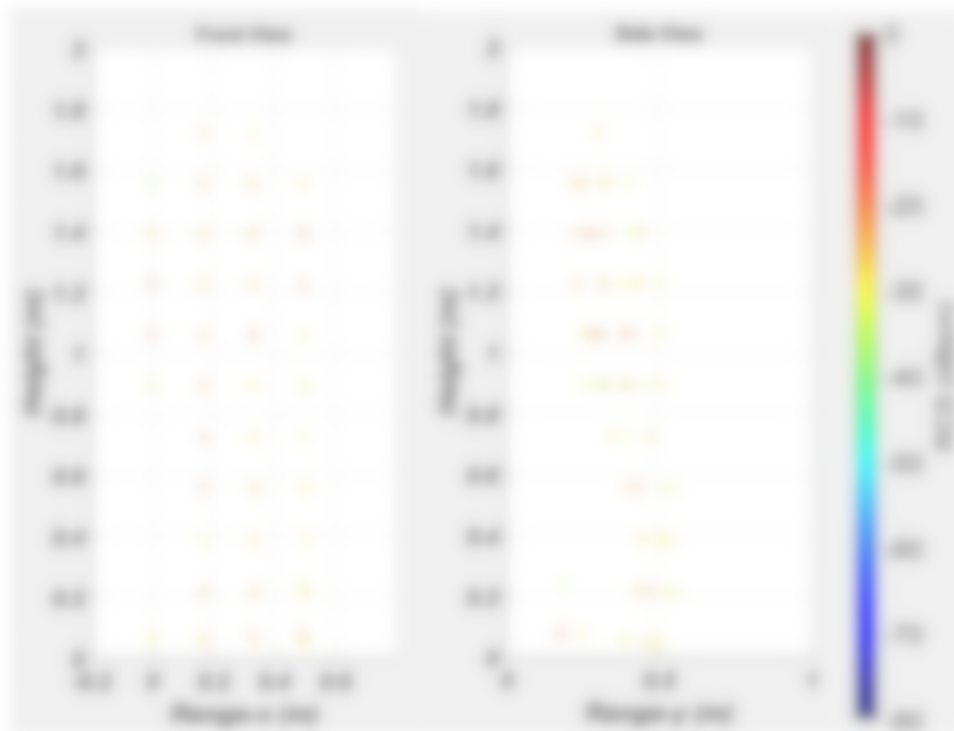


Abbildung 7.32: Front- und Seitenansicht der Messung aus Abbildung 7.21.

Die genaue Messung wurde in den folgenden Konfigurationen durchgeführt:

- Messung in normaler Kleidung
- Messung in Mikrowellbekleidung
- Messung in Mikrowellbekleidung und Carbonfasersprossen mit 10%, 20% und 40% Carbonfasergehalt, wobei die Fasern in unterschiedlichen Mäßen vorliegen

Die so gemessenen RCS-Werte sind in Tabelle 7.5 zusammengestellt. Bei den angegebenen RCS-Werten handelt es sich um gemittelte Werte in den Bereichen Kreis bzw. auf Höhe des Ellipsens. In der letzten Zeile der Tabelle ist die maximal erreichte Verbesserung durch die Carbonfasern im Vergleich zur Mikrowellbekleidung ohne Carbonfaser eingetragen. Bei einer Messung auf dem Rücken ist keine Verbesserung zu erkennen, allerdings sind die gemessenen Werte nur mit Mikrowellbekleidung schon etwa 5 dB höher als bei der Messung aus Front- oder Seitenansicht, was vermutlich durch den eingestrichelten Rückenprotektor der Jacke verursacht wird. Bei der Messung in

Kristallbereich kann eine Verbesserung um etwa 2 dB erreicht werden. Es zeigt sich, dass gerade in der Seitenansicht (90° bzw. 270°) eine deutliche Verbesserung der Sichtbarkeit um etwa 8 - 10 dB erreicht werden kann. Dies entspricht einer Vergrößerung der hochgestrahlten Leistung um den Faktor 6,3 - 10. Der Einfluss des Carbonfasernanteils ist hierbei von untergeordneter Bedeutung.

Tabelle 7.5: Ergebnisse der uniaxialen RCS-Messung

Messung	RCS Kristallbereich Messung 7°	RCS Kristallbereich Messung 90°	RCS Kristallbereich Messung 90° - 270°
normal	-20,2 dBm ²	-19,8 dBm ²	-19,8 dBm ² - 19,8 dBm ²
Winkel	-20,3 dBm ²	-19,1 dBm ²	-20,3 dBm ² - 19,8 dBm ²
Winkel + 10% CF + Carbonfasern	-21,0 dBm ²	-19,7 dBm ²	-21,1 dBm ² - 19,8 dBm ²
Winkel + 20% CF + Carbonfasern	-20,8 dBm ²	-19,8 dBm ²	-20,8 dBm ² - 19,1 dBm ²
Winkel + 40% CF + CF-Matrix	-19,1 dBm ²	-17,1 dBm ²	-19,8 dBm ² - 19,1 dBm ²
Verbesserung ggü. Winkel	1,2 dB	keine Verbesserung	0,9 dB - 1,9 dB

Abschließend sei erwähnt, dass eine weitere Erhöhung des RCS durch eine gezielte Formgebung des eingesetzten Carbonfasermaterials erreicht werden könnte. Dabei bieten sich insbesondere regelmäßige Oberflächenstrukturen, die als Retroreflektoren wirken und die Wellen gezielt in Richtung des Senders zurückstrahlen. Beispiele hierfür sind sog. Dihedral- oder Trihedralstrukturen, die im sichtbaren Bereich mit einem Rückstrahler („Katharauge“) vergleichbar sind. Dies ist exemplarisch in Abbildung 7.20 dargestellt. Wichtig ist hierbei ein rechter Winkel zwischen den beteiligten Flächenelementen.



Abbildung 7.20: Retroreflektoren am Beispiel eines Dihedrals (links) und eines Trihedrals (rechts)

Es ist zu erkennen, dass sowohl bei der Zielloch- als auch bei der Dreifachreflexion der reflektierte Strahl in Richtung des entfallenden Strahls, d.h. in Richtung des Senders zurück reflektiert wird. Dieses Prinzip stellt über einen weiten Winkelbereich erhalten. Auch bei einer Veränderung dessen Ausrichtung zum Ziel wird über einen weiten Winkelbereich die Leistung nahezu vollständig zum Sender reflektiert, was bei bewegten Objekten wie Verkehrsteilnehmer einen entscheidenden Vorteil darstellt.

7.6 Mechanische Charakterisierung der untersuchten Materialien

Die genannten Materialproben wurden nach der elektromagnetischen Prüfung auch auf ihre mechanischen Eigenschaften hin untersucht. Da die Proben dabei teilweise zerstört werden, konnte die mechanische Charakterisierung erst nach der elektromagnetischen erfolgen.

Die Proben wurden, wie bereits die Benchmarkmaterialien aus AP 3, nach den folgenden Prüfnormen untersucht:

- Bestimmung der Nennoberflächen Masse nach DIN EN ISO 20713 Teil 1
- Härteprüfung & Härteprüfungskennlinie in Anlehnung an DIN EN ISO 20713 Teil 2
- Bestimmung der Dichte nach DIN EN ISO 20713-7

Da die Prüfungen nach dem gleichen Vorgehen durchgeführt wurden, wird das Vorgehen an dieser Stelle nicht nochmal erläutert. Beispielsweise sind in Abbildung 7.24 Proben eines Materials vor den Prüfungen zu sehen.

Die vorgeschriebenen μ CT Scans wurden ebenfalls durchgeführt, die Aufnahmen sind aufgrund der inhaltlichen Relevanz in Kapitel 8 verschoben worden.

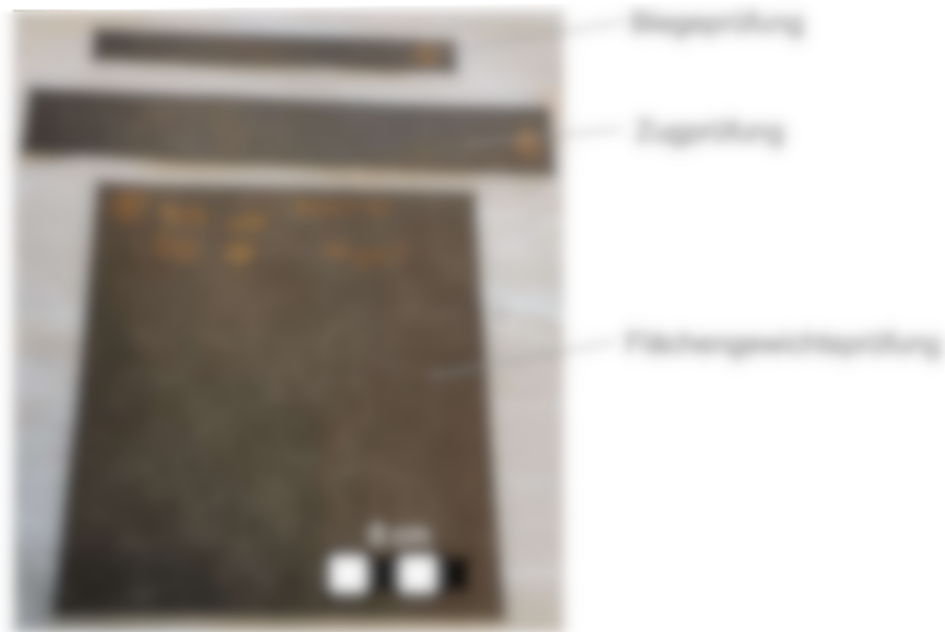


Abbildung 7.24: Prüflinge für die verschiedenen Prüfungen

Die Ergebnisse der Prüfungen sind in der nachfolgenden Diagramm dargestellt.

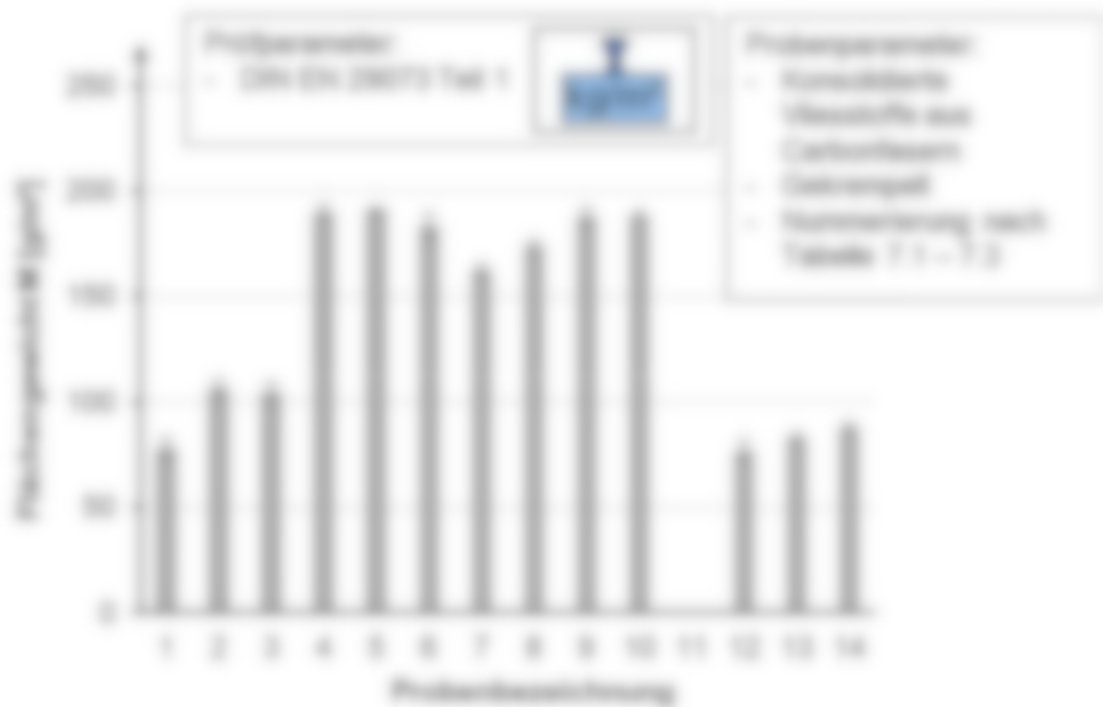


Abbildung 7.25: Flächengewicht für verschnittenes Carbonfaser und Carbonpapier

Es ist zu erkennen, dass die gemessenen Werte des Flächengewichtes von den theoretisch während der Produktion angestrebten Werten abweichen. Für eine spätere industrielle Produktion sollte auf ein einheitliches Flächengewicht geachtet werden. Die

Probe 11 konnte aufgrund nur geringer verfügbarer Materialmengen nicht erneut gemessen werden.

Die Ergebnisse der Prüfungen der maximalen Zugkraft und Dehnungen sind in Abbildung 7.26 und Abbildung 7.27 zu sehen. Die Produktionsrichtung hat einen entscheidenden Einfluss auf die Festigkeit des Materials. Die Dehnung hingegen unterscheidet sich nur geringfügig. Die Proben der Carbonfasern 11 und 12 konnten nicht erneut gemessen werden, da es zu Fehlvorgängen ausstrichen aus der Klemme kam. Die Ergebnisse sind daher hier nicht aufgeführt. Bei Probe 8 war nicht genügend Material für eine Messung vorhanden.

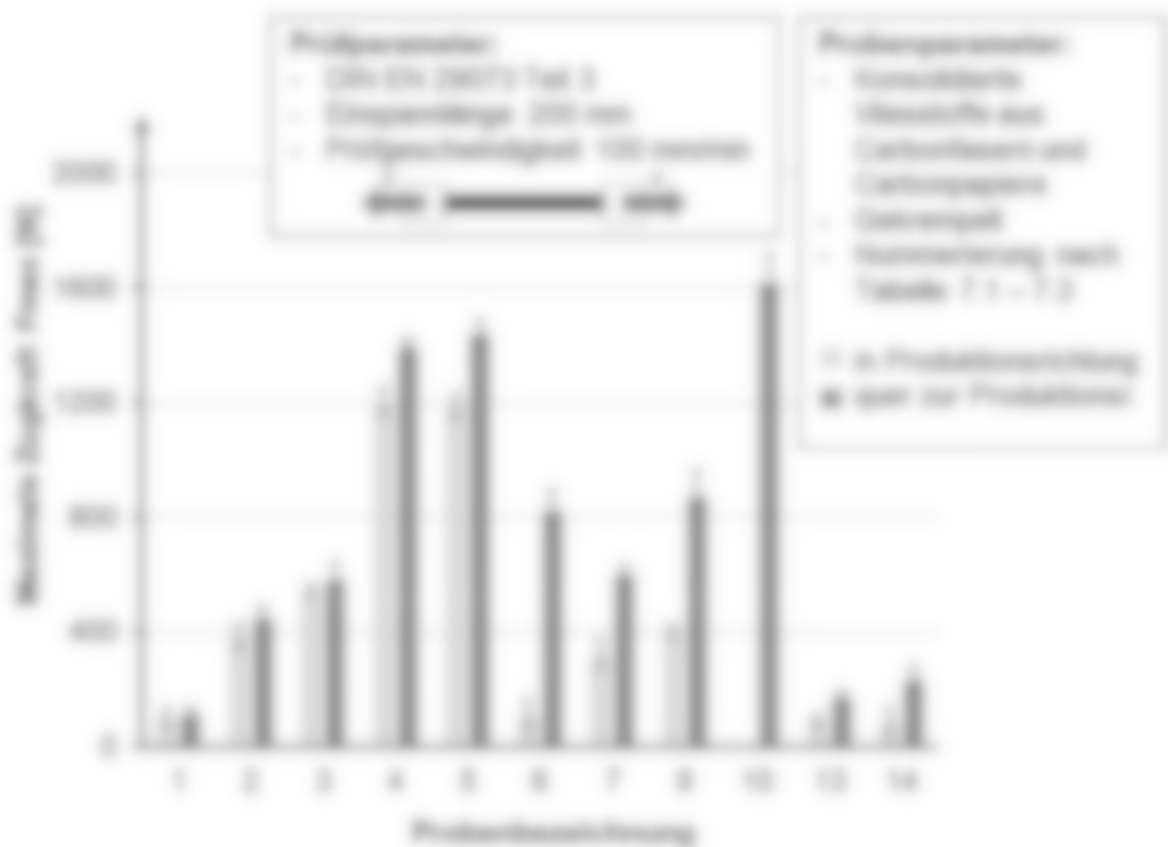


Abbildung 7.26: Maximale Zugkraft für verschiedene Carbonfasern-Teste und Papiere

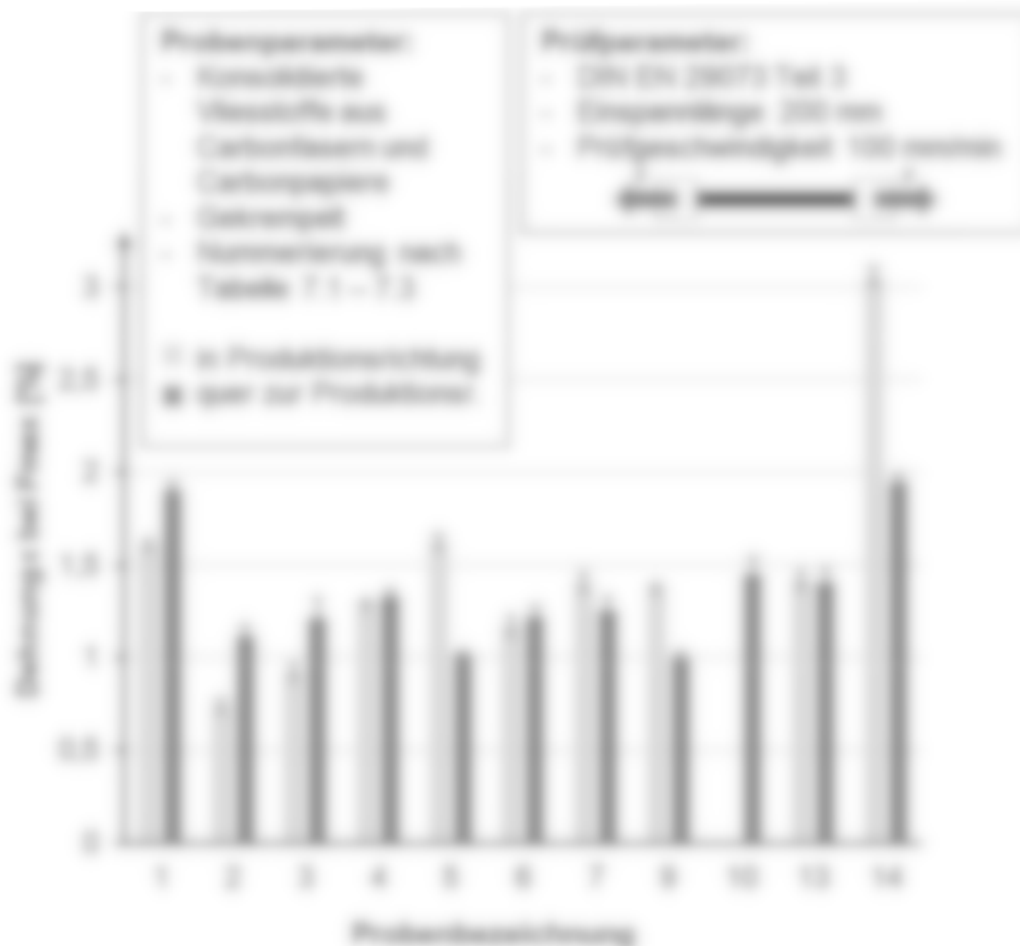


Abbildung 7.27: Maximale Dehnung für verschiedene Carbonfaserverlebe und Papiere

Es ist zu erkennen, dass wie bereits bei den Beschichtungsmaterialien die Werte der Festigkeit in Produktionsrichtung und quer dazu unterschiedlich sind. Auch unterscheiden sich die Werte zwischen den Proben etwas, was auf die unterschiedliche Zusammensetzung der Materialien zurückzuführen ist, darunter wie die unterschiedlichen Fächergewichte und damit auch Dicken und Carbonfasergehalte.

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Messung der Biegefestigkeit und Biegesteife aufgeführt. Messungen bei denen nach DIN EN ISO 17817 keine einzelne Biegesteife ermittelt werden konnte sind nicht aufgeführt. Gemessen wurden dabei jeweils Vorder- und Rückseite.

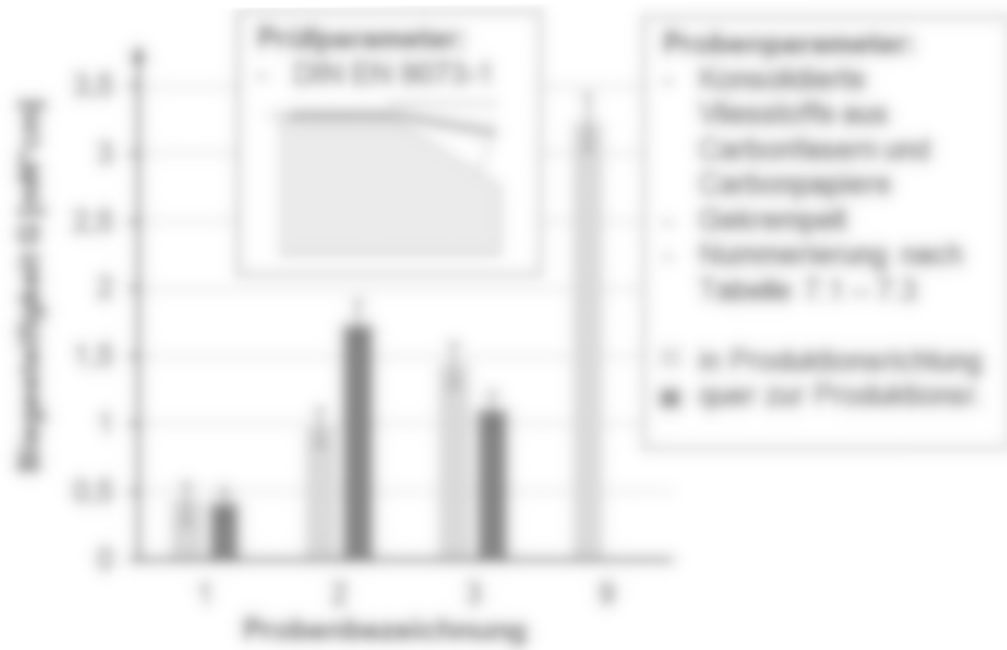


Abbildung 7.26: Regelgröße G für konventionelle Carbonfaser-Holz

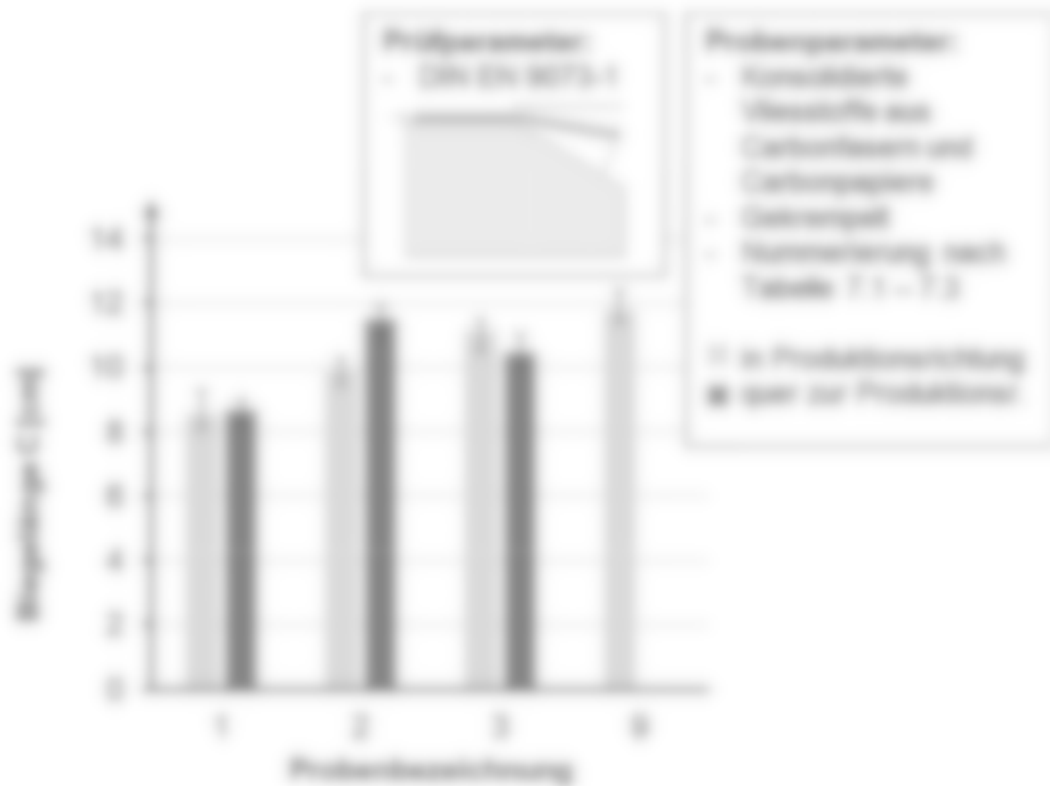


Abbildung 7.27: Regelgröße C für konventionelle Carbonfaser-Holz

Materialien mit geringen Fächergewichten weisen eine niedrigere Dämpfung auf und sind damit innerhalb eines gewissen Wertebereichs drapierbar. Als unkonventionelle Werte sind hingegen die Materialien gut drapierbar.

7.7 Zusammenfassung

Wie den im vorangehenden Kapitel gezeigten Messaufbauten sind zahlreiche Messungen durchgeführt worden, die sich über einen weiten Frequenzbereich erstrecken. Damit sind sowohl die typischen Nachmanwendungen abgedeckt als auch die speziellen Anwendungen in der Robotertechnik.

Grundsätzlich zeigt sich, dass die Carbonfasermaterialien auch bei geringen Carbonfasergehalten zur Nachformung eignen. Die gemessenen Dämpfungswerte liegen im Bereich von 10 bis zu 40 dB, was einer Reduzierung der Leistung etwa um den Faktor 10000 entspricht. Abhängig von der verwendeten Welle lassen sich auch die entsprechenden mechanischen Eigenschaften erreichen, ohne dass dabei die Dämpfung signifikant beeinträchtigt wird. Erwartungsgemäß lässt sich der Dämpfungswert durch die Konzentration der Carbonfasermaterialien in der Welle erreichen. Eine Abhängigkeit von der Faserlänge und der Frequenz kann in den Messungen nicht festgestellt werden. Das lässt sich zum einen durch die teilweise Ausrichtung der Fasern erklären zum anderen durch, dass keine bestimmte Faserringe in den Proben bestimmt ist. Vielmehr ist die Faserringe sehr gemischt, was durch den Herstellungsprozess der Proben verursacht wird, in dem die Carbonfasern auf unterschiedliche Längen abbrechen. Eine gezielte Ausrichtung der Faserringe zur Resonanzfrequenz u.ä. kann dies mit speziellen Fasern nur sehr schwer erreicht werden.

Der Haupteffekt der Transmissionsdämpfung beruht auf einem hohen Anteil der Reflexion sowie einem etwas geringeren Anteil der Absorption. Je nach Oberflächeneigenschaften kann die Reflexion in bestimmten Frequenzbereichen gezielt reduziert werden, was eine prinzipielle Eignung als „Tarnkappe“ nicht ausschließen lässt. Für den umgekehrten Fall einer gezielten Sichtbarmachung scheint der Einsatz der Carbonfasern ebenfalls möglich. Die Wirkungsweise ist allerdings hier weniger von Carbonfasergehalt abhängig als vielmehr von der Geometrie der Oberfläche, d.h. der Oberflächenrauigkeit bzw. der Größe und Formgebung der Unebenheiten. Dies müsste für die gezielte Anwendung entsprechend berücksichtigt werden. Im Falle der

gestalten Reflexen sind regelmäßige Oberflächenstrukturen, z.B. eingetragte
gleichzeitige Pyramidenstrukturen wahrscheinlich entgegen für eine diffuse Reflexion
eine ungerichtete Strukturen liegt Größe und Ausrichtung von Vorteil sind.

8 Entwicklung eines vereinfachten physikalischen Modells für die Vorhersage der elektromagnetischen Eigenschaften (AP 5)

Die in den vorangegangenen Messungen identifizierten Permittivitätswerte können bei der Erarbeitung eines physikalischen Modells einbezogen werden. Die Leitfähigkeit der Fasern ist aus der Literatur bekannt und beträgt 10^7 S/m [HLS05]. Bevor das Modell in der Simulationsumgebung erstellt wird, wird die Materialstruktur unter dem Mikroskop untersucht, die Fotoaufnahme einer Materialprobe ist in Abbildung 8.1 zu sehen. Auf dem Bild ist es zu erkennen, dass außer einzelnen Fasern auch Faserbündel in dem Material vorhanden sind. Die Faserbündel variieren in der Breite zwischen 100 und 500 μm , wobei die einzelnen Fasern einen Durchmesser von 8 μm aufweisen. Die Fasertlänge beträgt etwa 20 mm. Aufgrund der Mikroskopaufnahmen ist keine eindeutige Vorzugsrichtung der Fasern zu erkennen.

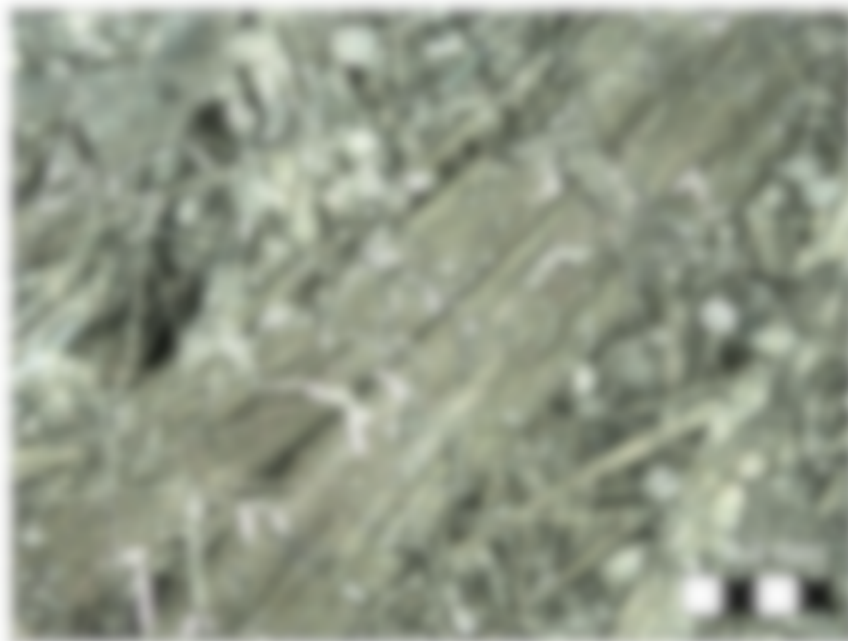


Abbildung 8.1: Mikroskopaufnahme des Probenmaterials

Zudem wurden Computertomografie Aufnahmen verschiedener konzentrierter Gewebe erstellt. Dabei werden zunächst verschiedene Schichten der Ebenen des Materials aufgenommen. Nachfolgend ist in Abbildung 8.2 eine CT-Aufnahme für ein Carbonfasergewebe zu sehen.

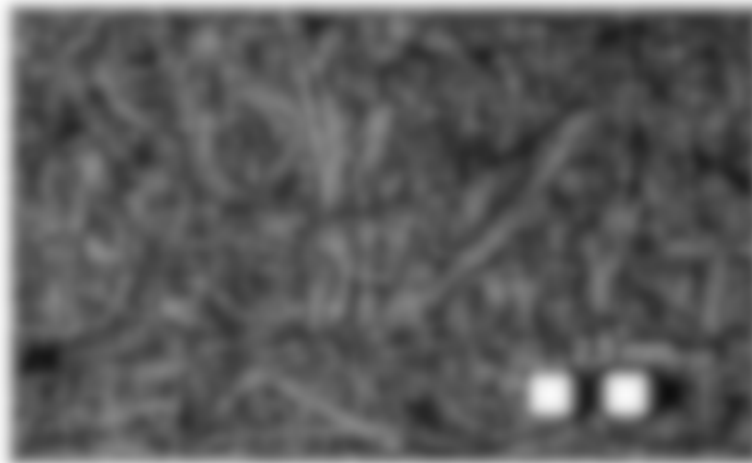


Abbildung 8.2: CT Aufnahme einer Ebene eines beschichteten Vlieses

Aus den Aufnahmen der einzelnen Ebenen wird wiederum eine 3D-Darstellung wie in der nachfolgenden Abbildung zu sehen, erstellt.

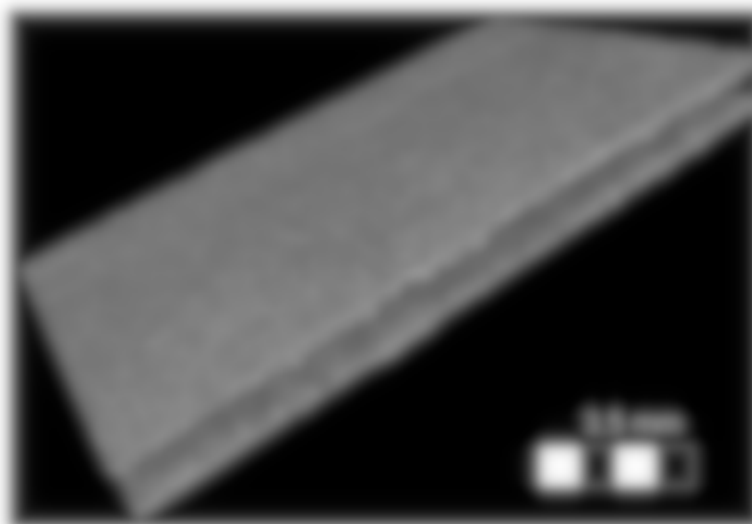


Abbildung 8.3: 3D Visualisierung der CT Aufnahmen eines Carbonvlieses

Aufgrund der CT-Aufnahmen lässt sich ebenfalls keine eindeutige Vorzugsrichtung der Fasern erkennen. Die Faserflocke wurden im Krampfverfahren hergestellt und anschließend zu Vliesstoffen quergelegt. Aufgrund des geringen Verhältnisses der Fasern in Maschinenrichtung zu denen quer zur Maschinenrichtung und dem zudem sehr geringen Flächengewicht der strukturierten Faserflocke, wäre die zumindest geringe Sichtbarkeit einer Vorzugsrichtung zu erwarten gewesen. Möglicherweise wurde die Faserorientierung durch den Pressvorgang verringert. Zudem sind die vermessenen Probestücke sehr klein im Vergleich zur Größe des gesamten Vlieses, daher ist es möglich, dass die Vorzugsrichtung auf diesem kleinen Raum nicht zur Geltung kommt.

Auch in den CT-Aufnahmen des Carbonpapiers ist keine Vorzugsrichtung zu erkennen:



Abbildung 8.4: CT-Aufnahme einer Ebene eines Carbonpapiers



Abbildung 8.5: 3D-Visualisierung der CT-Aufnahmen eines Carbonpapiers

Für die Modellierung des Pflanzenaufbaus in der Simulationsumgebung werden die Fasergeometrien berücksichtigt. Mittels eines Makro-Volumen-Einheitenzellen generiert werden, die aus einer höheren Menge an Carbonfasern bestehen und eine Faserebene bilden, siehe Abbildung 8.6. Die Fasern sind in dieser Einheitszelle gleichmäßig verteilt und innerhalb der Ebene in beliebige Richtungen ausgerichtet. Der Aufbau einer größeren Probekörper mit anderer Dicke erfolgt im Modell durch Schichtung und Anordnung mehrerer Einheitszellen, siehe Abbildung 8.7.



Abbildung 8.6: Einzelne modellierte Korrosions-Ereignis in Strahlungsumgebung

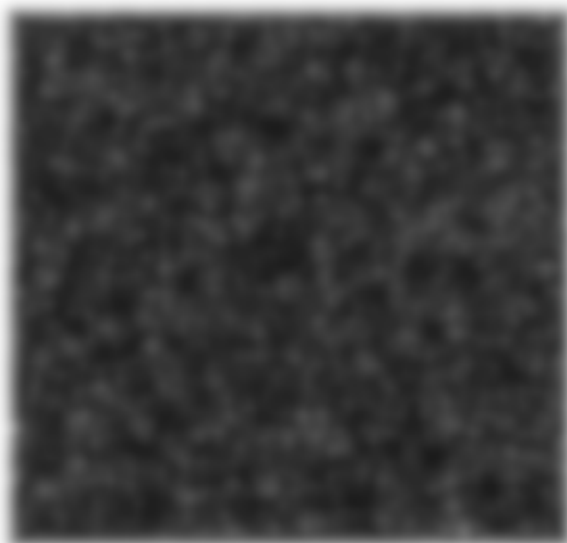


Abbildung 8.7: Schattierung der Einzelereignis zur gesamten Platte

Werte der Einzelereignis aus Abbildung 8.6 wird der Radar-Rückstreuquerschnitt (RCS, engl. Radar-Cross-Section) simulativ berechnet. Der Radar-Rückstreuquerschnitt σ ist über die Beziehung

$$\sigma = 4\pi R^2 \frac{P_r}{P_i} \quad (8.1)$$

definiert und beschreibt das elektromagnetische Rückstreuverhalten über das Verhältnis der eingestrahnten Leistungsdichte P_i und der gestreuten Leistungsdichte P_r . R stellt hierbei den Abstand zwischen Strahlungsquelle und Prüfling dar. Das Rückstreuverhalten

ist abhängig vom Winkel, unter dem die Probe beleuchtet wird, sowie von der der Frequenz. Daher ist eine räumliche Darstellung des Rückstreuschnittes möglich, die das winkelabhängige Verhalten des Prüflings wiedergibt.

In Abbildung 8.8 ist der dreidimensionale Rückstreuschnitt der Einzelhaare bei einer Frequenz von 30 GHz dargestellt. Die Probe befindet sich hier im Ursprung des dargestellten Koordinatensystems und liegt in der XY-Ebene. Die dargestellte sternförmige Kugelform deutet auf eine stark gerichtete Reflexion an der Probenoberfläche hin. Stark gerichtete Reflexion ist beispielsweise an einer glatten und elektrisch leitenden Metalloberfläche auf. Im Falle einer diffus reflektierenden würde der dreidimensionale Rückstreuschnitt einer Kugelform entsprechen, da die Leistung gleichmäßig in alle Raumrichtungen gestreut wird.

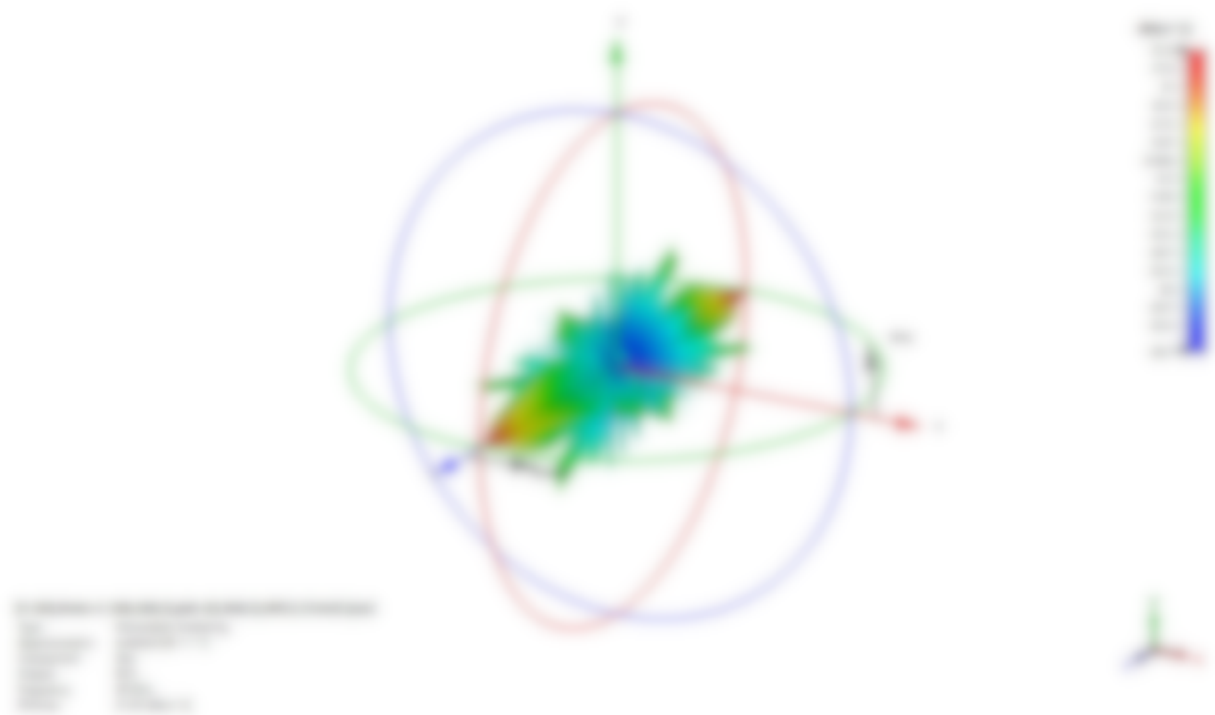


Abbildung 8.8: Simulation des Radar-Rückstreuschnittes bei 30 GHz

Für das gestrichelte Modell aus Abbildung 8.7 sind weitere Simulationen ausgeführt worden, die aufgrund der Simulationszeit einiger Tage abgebrochen werden sind. Die hohen erforderlichen Simulationszeiten stehen in Zusammenhang mit der großen Anzahl der Fasern, die diese zur numerischen Feldberechnung determiniert werden. Je größer die Faseranzahl, desto größer ist die Anzahl benötigter Zellen, um die Proben hinreichend genau in der Simulation abzubilden. Dies ist mit einer Steigerung des Rechenaufwandes gleichbedeutend.

Aufgrund der hohen Rechenkosten ist eine simulierte Untersuchung der Materialparameter zur Modellbildung innerhalb der Projektdauer nicht realisierbar. Stattdessen erfolgt die Modellbildung mittels empirischer Untersuchungen. Eine 3D-Visualisierung mit der Geodetic Software wurde in Röntgenstrahlung mit dem PhX an TUM am 10.12.2020 nicht durchgeführt.

8.1 Zusammenfassung

Im Anhangkapitel 5 sind die Faserverordnungen und Faserverteilungen mittels eines Mikroskops und eines Computertomographen untersucht worden. Mit dieser Kenntnis ist eine aus den Fasern bestehende Einzelstruktur in einer EM-Simulationsumgebung nachgebildet worden, aus der durch Schichtung und Anisotropisierung größere Modelle konstruiert werden können. Das Rückstreuverhalten von CW-Proben ist simuliert worden und deutet auf ein stark gestreutes Reflexionsverhalten an der Materialoberfläche hin. Die hohe Faserdichte großer Durchmesser ist mit Simulationskosten mehrere Tage verbunden, durch die eine simulierte Untersuchung der elektromagnetischen Eigenschaften für verschiedene Materialzusammensetzungen kaum möglich ist.

9 Entwicklung einer Methodik für die geschlossene elektrische Kontaktierung von rCF-Verbundbauteilen (AP 6)

Die Herstellunggröße der CF-Massstäbe ist durch die Größe der Produktionsanlagen bedingt. Für Anwendungsbereiche bei denen große Flächen durch die CF-Massstäbe ausgefüllt werden müssen, z. B. Schirmkäbinnen, ist ein Verbund aus mehr CF-Platten erforderlich. Es ist abzuheben, dass die Schirmungswirkung des Gesamtschirms nicht durch die mechanischen Unterbrechungen beeinträchtigt wird. In nachfolgenden sind Messungen einer Kabelverbindung beschrieben, die in der TEM-Messzelle untersucht werden und weitere Kontaktierungsverfahren sind mittels von Feldmessungen untersucht worden.

Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene Kontaktierungsmöglichkeiten betrachtet und untersucht. In der PM-Tagung am 18.08.2020 und 10.12.2020 wurde beschlossen, einen Stumpfstift und eine Überlappung (beide 180°) anhand von Carbonpapier zu betrachten. Ein 90° Eckstift wurde aufgrund des Aufbaus der Messsysteme keine gut verwertbaren Ergebnisse liefern.

Nach einer Vorauswahl wurden folgende Verbindungen anhand von Carbonpapier untersucht:

- Verfahren einer überlappenden Verbindung mit Klammer
- Verfahren mit Halbleiter, sowohl Stumpfstift als auch überlappend
- Verfahren mit stehendem Garn, sowohl Stumpfstift als auch überlappend
- Verfahren mit verbleibendem Garn, sowohl Stumpfstift als auch überlappend

Exemplarisch ist nachfolgend der Vorgang für eine mit Klammer realisierte Verbindung abgebildet.

In Abbildung 9.1 ist der Aufbau der Proben zu erkennen, über die eine Untersuchung der Kabelverbindung erfolgt. Die Wahl Probengeometrie ermöglicht den Einbau in die TEM-Messzelle. Zwei Probekörper sind halbkreisförmig zugeschnitten, diese liegen mit unterschiedlicher Länge über die Halbkreise des Kreises hinaus. Nach dem Aufkleben der beiden Hälften auf ein kreisförmiges Trägerpapier ergeben sich dadurch verschiedene Überlappungen. Es sind die Massstäbe Kupfer 100 und Kupfer 200 für

die Versuche verwendet werden. Für jedes Material ist eine Probe mit einer Schweißverbindung vorbereitet worden, die einem Überlapp von 2 mm entspricht. Darüber hinaus sind weitere Proben mit 1 mm Überlappung sowie mit 2 mm Überlappung vorbereitet worden. Die Transmissions- und Reflexionsparameter sind in der TEM-Messzelle mithilfe eines Netzwerkanalysators gemessen worden. Neben den Proben mit Kabeilverbindung sind vollständige Proben aus einem Stück gemessen worden, die als Referenz dienen, um die Funktion der Kabeilverbindung beurteilen zu können.

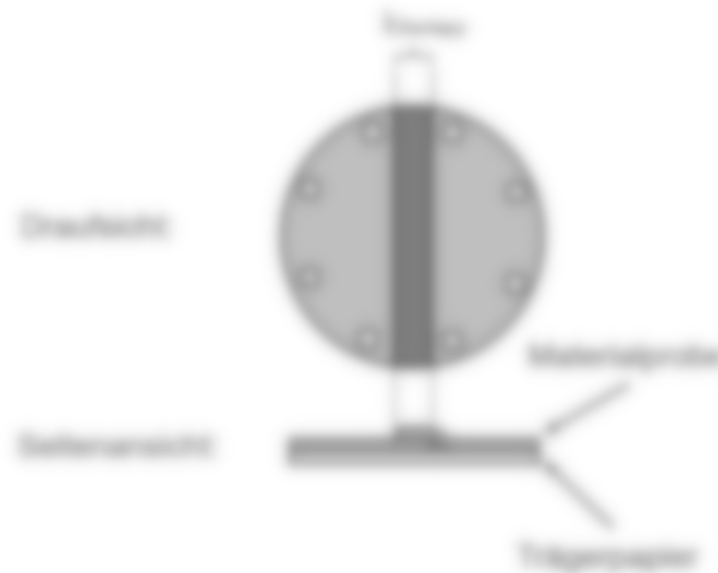


Abbildung 8.1: Kabelexkapsulation mit Metallüberlappung auf Trägerpapier

Abbildung 8.2 und Abbildung 8.3 zeigen die Messergebnisse der Transmissions- bzw. Reflexionsmessung von 100 MHz bis 5 GHz. Die vollständigen Proben weisen im Vergleich zu den Proben mit Kabeilverbindung in dem Frequenzbereich von 100 MHz bis ca. 1,5 GHz ein stark abweichendes Transmissions- und Reflexionsverhalten auf. Dies kann auf eine schlechte Dielektrikum-Konkolation zurückgeführt werden, da durch das Trägerpapier der getesteten Proben die beiden Gehäuseshälften der TEM-Messzelle elektrisch voneinander isoliert werden. In dem darüber liegenden Frequenzbereich erfolgt die Kopplung überwiegend kapazitiv. In diesem Frequenzbereich weisen die Proben mit Schweißverbindung eine um etwa 2,5 dB geringere Dämpfung gegenüber den vollständigen Proben auf. Mit zunehmender Überlappung nähert sich die Dämpfung der getesteten Proben der Dämpfung der vollständigen Proben an. Für die Proben mit 2 mm Überlappung unterscheiden sich die Dämpfungswerte zur vollständigen Proben um weniger als 1 dB.

Durch den Einfluss in der TDR-Messung ist eine beschleunigte Anpassung der Probenkammer gewährleistet, sodass die nötige Kontaktierung bereits bei kleiner Überlappung zu Dämpfungswerten führt, die nahe an den Dämpfungswerten der vollständigen Probe liegen. In Abhängigkeit außerhalb der Messzelle ist eine zusätzliche Fixierung durch Nadeln oder Halterung entlang der Kontaktierungsstellen denkbar.

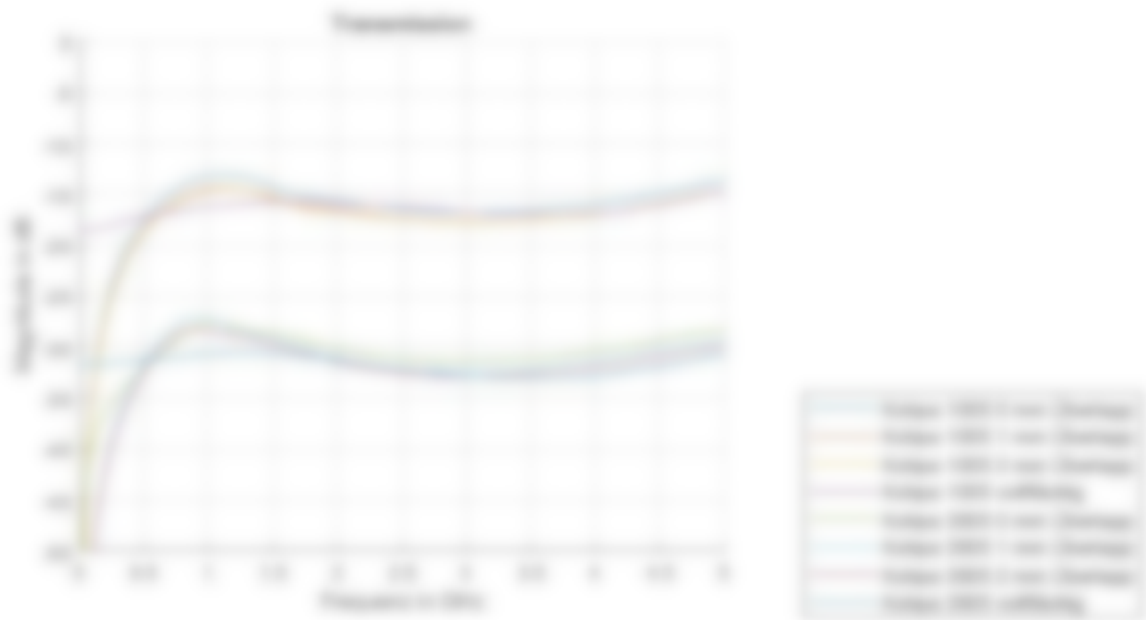


Abbildung 8.2 Messung der Transmissionsparameter für verschiedene Überlappungen

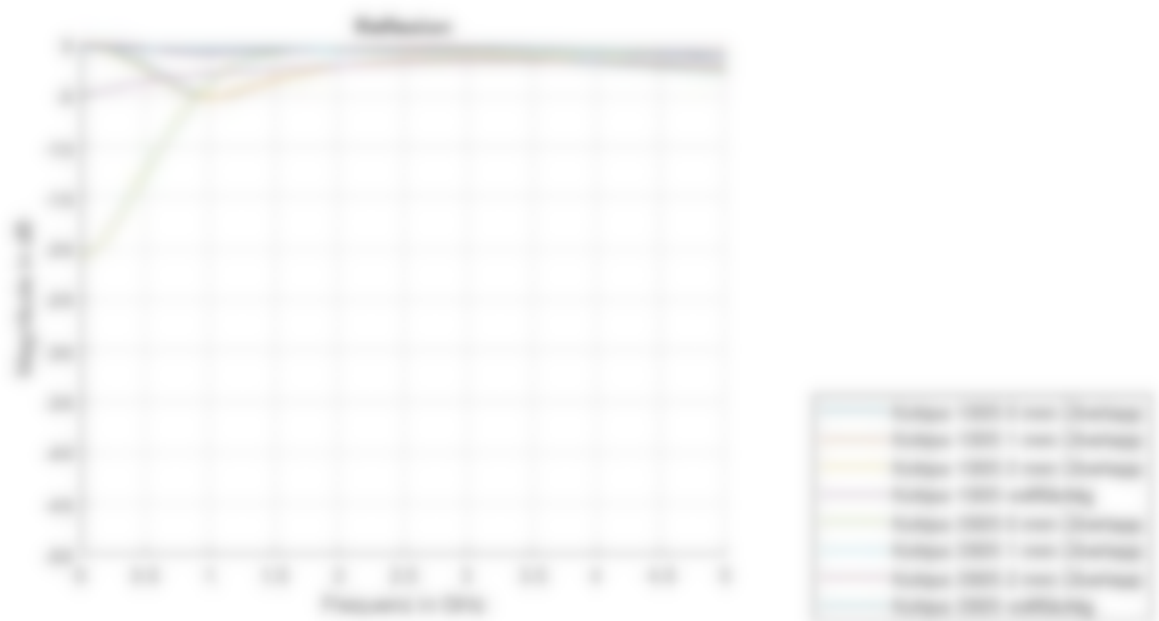


Abbildung 8.3 Messung der Reflexionsparameter für verschiedene Überlappungen

Weitere Kontaktierungsverfahren sind in Freiraummessungen untersucht worden, indem Probenschnitte des Materials Kufiya 1000 der Größe 10cm x 10 cm mittig verteilt und auf verschiedene Weisen wieder zusammengefügt werden sind. Eine Übersicht der Kontaktierungsverfahren ergibt sich über die nachfolgende Tabelle:

Tabelle 6.1: Übersicht der verschiedenen Kontaktierungsverfahren

Probe	Kontaktierungsverfahren
1	Stumpfließ mit herkömmlichem Klebstoff verbunden
2	verschränkter Stumpfließ mit herkömmlichem Klebstoff verbunden
3	Stumpfließ mit nichtlebendem Gern versetzt
4	verschränkter Stumpfließ mit nichtlebendem Gern versetzt
5	Stumpfließ mit lebendem Gern versetzt
6	verschränkter Stumpfließ mit lebendem Gern versetzt

Das Prinzip eines verschränkten Stumpfließes ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt. Vorteil gegenüber einer einfachen Überlappung ist der Wechsel der oben und unten liegenden Schichten. Allerdings ist der Mehrwert relativ gering, so dass auch eine einfache Überlappung verwendet werden kann.



Abbildung 6.4: Verschränkter Stumpfließ

Der Aufbau eines versetzten, geradlinigen Stumpfließes ist in Abbildung 6.5 dargestellt. In Abbildung 6.6 ist der Aufbau eines verschränkten Stumpfließes zu erkennen, der zusätzlich mittig durch ein Gern versetzt ist.



Abbildung 5.5: Aufbau eines verschliffen, geraden Stumpfes



Abbildung 5.6: Aufbau eines verschliffenen und gerillten Stumpfes

Über den Messaufbau aus Abbildung 5.2 sind die Proben in ihrer Transmission im Frequenzbereich 5 GHz bis 40 GHz vermessen worden. Aufgrund der vorhandenen Probegröße war es möglich, diese Proben im Fernraum mit höheren Frequenzen zu vermessen. Die Proben sind unter verschiedenen Winkeln untersucht worden. Die Variation des Winkels α liegt im Bereich 0 Grad bis 30 Grad mit Schrittwerten von 5 Grad. In Abbildung 5.7 und Abbildung 5.8 sind die Transmissionsparameter für die Frequenz 10 GHz und 20 GHz über den gemessenen Winkelbereich dargestellt. Die Messungen sind mithilfe von Leermessungen kalibriert, sodass die abgebildeten Transmissionsparameter die Dämpfung der Proben wiedergeben. Bei der Frequenz von 10 GHz liegt die Dämpfung für die verschiedenen Winkel im Bereich von 20 dB bis 30 dB. Die Proben unterscheiden sich in ihrer Dämpfung um bis zu 7 dB. Der Stumpfkeil, der mit unterschiedlichem Grad

ermittelt ist, weist von allen Proben die höchste Transparenz auf. Die übrigen Proben weisen eine höhere Dämpfung auf, lassen sich jedoch aufgrund der aufeinander entgegengesetzten Schwankungen schwer voneinander unterscheiden.

Für die Frequenz 20 GHz sind die Unterschiede in der Dämpfung besser zu erkennen. Mit steigender Frequenz nimmt die Frequenzwellenlänge ab. Die Schichtdicken in den Probenoberflächen liegen damit zunehmend in der Größenordnung der Wellenlänge, sodass die Transparenz zunimmt (2002).

Der Dämpfungswert mit nichtleitendem Kern weist, wie auch bei 10 GHz, die geringste Dämpfung auf, die hier im Bereich von 20 dB liegt. Bei dem mit Halbleiter freier Dämpfung ist die Dämpfung um etwa 2 dB höher. Durch den verschickten Dämpfungswert, der mit Halbleiter freier ist, ist die höchste Dämpfung erreicht worden, die im Bereich von 27 dB liegt. Die verschickten und gestrichelten Verbindungen weisen eine geringfügig höhere Transparenz auf. Ein Zusammenhang wird hinsichtlich der nicht positionierten Seite vermutet, da durch diese kein formstabile Übergang des Halbleiteroberflächens erreicht wird, siehe Abbildung 6.6. Mehrfach verschickte, verschickte Verbindungen sind im Rahmen des Projektes nicht untersucht worden, stellen jedoch eine Möglichkeit der möglichen Lachagen weiter zu reduzieren.

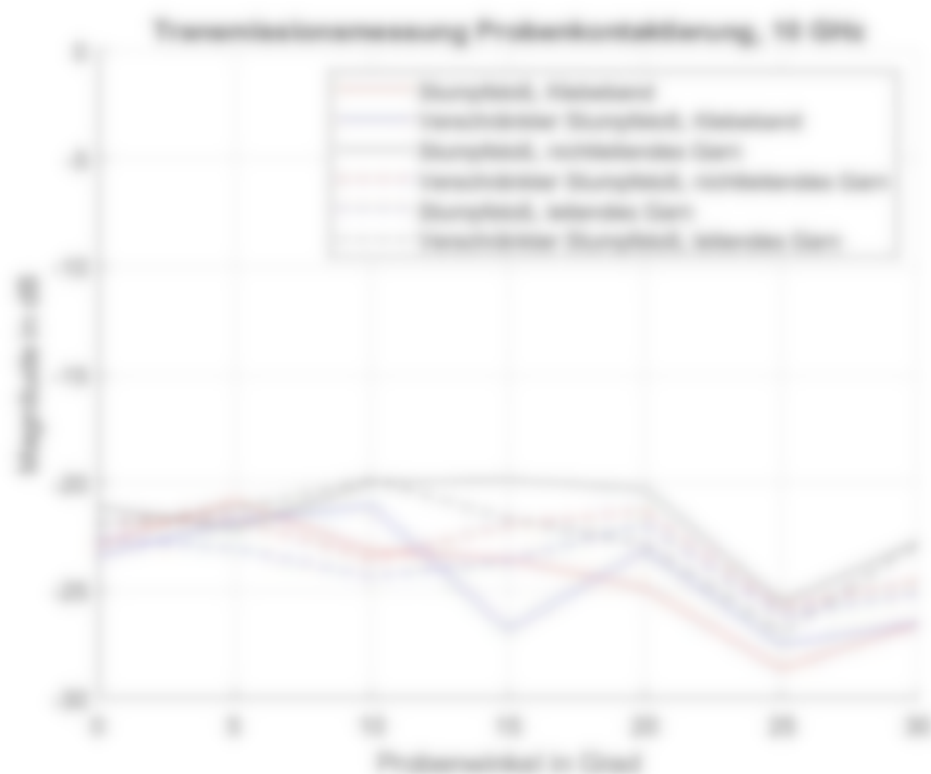


Abbildung 8.7: Transmissionsparameter der Kontaktierungsverfahren bei 10 GHz

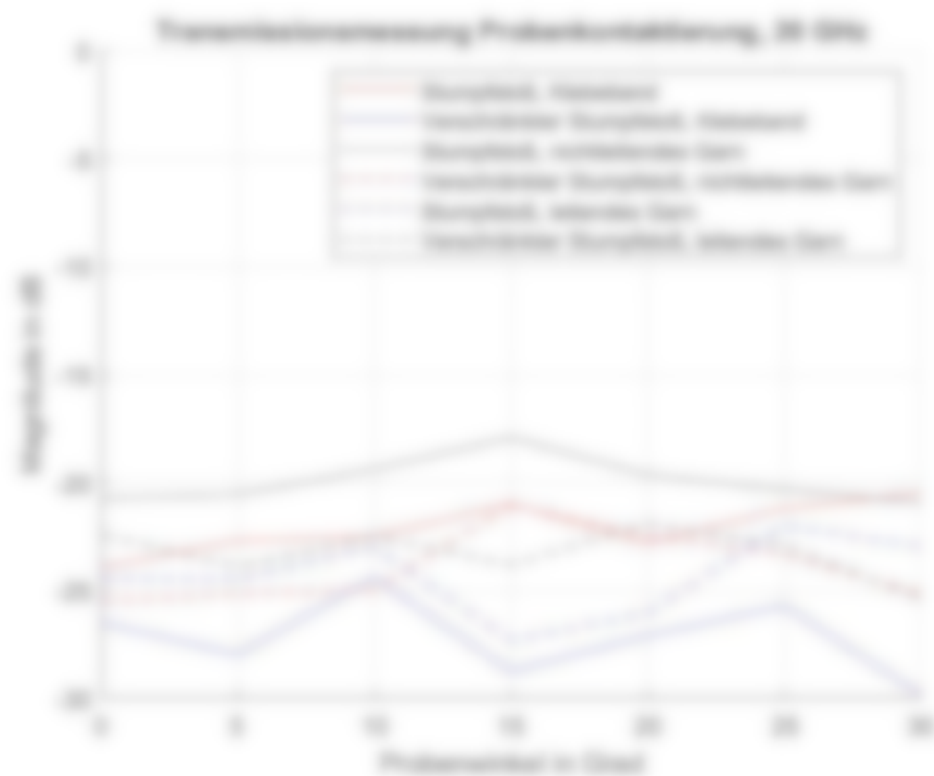


Abbildung 8.8: Transmissionsparameter der Kontaktierungsverfahren bei 20 GHz

Die verschiedenen Verbindungen sind in einem House of Quality gegenübergestellt. Dabei werden die einzelnen Anforderungen nach ihrer Relevanz gewichtet und dann für die jeweilige Variante mit Werten von 1 – 5 bewertet, wobei 1 sehr schlecht und 5 sehr gut ist. Das zugehörige House of Quality ist nachfolgend dargestellt.



Anforderungen	Anforderungswerte	Anforderungswerte						
		Handhabung	Übertragung	Lebensdauer	Lebensdauer	Lebensdauer (bis)	Lebensdauer (bis)	Lebensdauer
Anforderungen	16							
Möglichst wenig Materialverbrauch	3	5	4	3	4	3	3	3
Einfache Handhabung	3	3	4	4	5	2	2	2
Kein Zusatzequipment erforderlich	3	5	4	4	4	1	1	1
Schnellmontage	5	2	5	4	5	2	2	2
Staubfreiheit	4	3	4	3	2	4	4	3
Kostenpreis	3	5	4	4	4	2	3	2
Bewertung		23	25	22	24	14	15	13
Gewichtete Bewertung		88	88	87	88	88	82	85

Abbildung 8.8: House of Quality für EM-Konstruktionen

Nachdem die gewichtete Bewertung ist erkennbar, dass eine Überlappung, vertriebt mit Klebstoff, unter den genannten Bedingungen die beste Variante ist. Durch gefügt von einer Überlappung mit Kleber vertriebt. Für spezielle Anwendungsgebiete können andere Verbindungsarten ebenfalls sinnvoll sein, allerdings sollte möglichst eine Überlappung und

eine effiziente Verbindung gewährt werden, um eine gute Kontaktierung der Metallelemente zu gewährleisten.

9.1 Zusammenfassung

Es sind verschiedene Kontaktierungen untersucht worden, durch die einzelne OF-Platten zu einer größeren Fläche zusammengesetzt werden können. Das Dämpfungsverhalten der Metallverbindung ist für Überlappungen zwischen 0 mm und 2 mm untersucht worden, indem OF-Papiere mit zwei verschiedenen Carbonisierungsgehalten auf ein Trägerpapier geteilt und in der TEM-Messzelle vermessen werden sind. Die Schichtverbindung weist hier eine um 2,5 dB höhere Transmission gegenüber einer vollflächigen Probe auf. Bei einer Überlappung von 2 mm weicht die Transmission um weniger als 1 dB von der vollflächigen Probe ab. Eine hinreichende elektrische Kontaktierung wird daher bereits ab kleinen Überlappungslängen erreicht, sofern die Metallflächen formstreu zueinander liegen.

Feinmessungen von Stumpfkontaktierungen und verschlissenen Verbindungen zeigen darüber hinaus, dass die höchste Dämpfung durch Überlapp und Formschluss erzielt wird. Die höchsten Dämpfungswerte sind durch einen verschlissenen Stumpfkontakt erzielt worden, der mit einem herkömmlichen, nichtfließenden Klebstoff fixiert worden ist.

10 Erstellung eines Auslegungstools für rCF-Verbundbauteile mit maßgeschneiderten EM-Eigenschaften (AP 7)

Basierend auf den Messergebnissen, die mittels der TDR-Messzelle durchgeführt werden und in ein grafisches Berechnungstool in der Programmiersprache C++ erstellt werden, bei dem durch Eingabe der Materialzusammensetzung die Materialdämpfung überungrenzt berechnet wird. Für die Berechnung werden verschiedene CF-Materialien und CF-Papiere voneinander unterschieden, da sie sich in ihrer Carbonfasergehaltes stark unterscheiden. Die Benutzeroberfläche des Programms ist in Abbildung 10.1 für Carbonfaserverstärkungen auf Kunststoffmatrix dargestellt.



Abbildung 10.1: Aufbau des grafischen Tools zur Berechnung der Materialdämpfung für verschiedene Carbonfaserverstärkungen

Für Carbonpapiere sieht das Tool sehr ähnlich aus, allerdings besteht die Matrix ausschließlich aus Epoxidharz und daher gibt es keinen Anteil von Glasfasern oder anderen Materialien in der Matrix, welcher ausgewählt werden kann. Die Oberfläche des Tools für Carbonpapiere ist nachfolgend in Abbildung 10.2 dargestellt.



Abbildung 10.2: Aufbau des grafischen Tools zur Berechnung der Materialdämpfung für Carbonfasernpapier

Für die Berechnung der Materialdämpfungen sind die Messergebnisse der konzentrierten Materialien und der Carbonfasernpapiere über Polynomfunktionen der Form

$$D(x) = a \cdot x^b + c \quad (10.1)$$

approximiert, wobei D die Materialdämpfung in dB und x das CF-Flächengewicht des Materials in g/m^2 darstellt. Die Approximationsfunktionen sind in Abbildung 10.2 zusammen mit den Messpunkten dargestellt. Im Programm wird das allgemeine Flächengewicht eingestellt und durch Angabe der Materialzusammensetzung das CF-Flächengewicht errechnet. Die einstellbaren Wertebereiche sind darauf bedacht, die eine Extrapolation für CF-Flächengewichte, die weit oberhalb des Messpunkte-Bereiches liegen, zu ungenauen Schätzungen führt. Die entsprechenden Materialuntersuchungen sind bis zu einer Frequenz von 5 GHz durchgeführt worden. Daraus folgt, dass die errechneten Dämpfungswerte ausschließlich in diesem Frequenzbereich gültig sind.

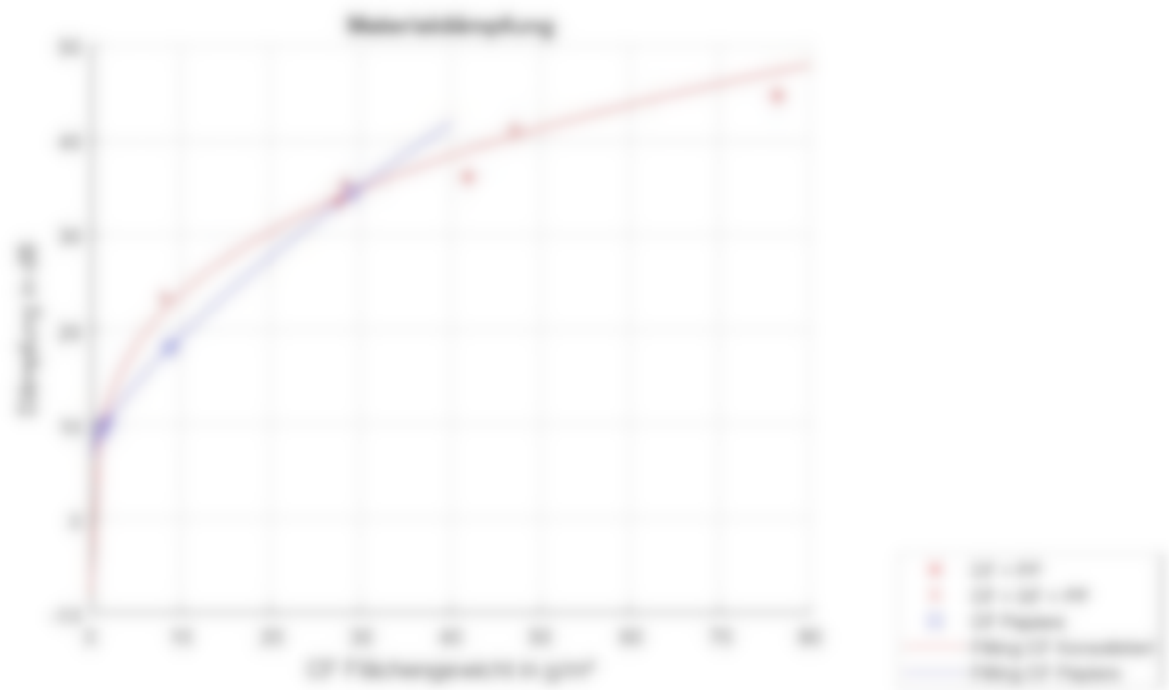


Abbildung 10.2: Approximation der Dämpfung über Polynomfunktionen

10.1 Zusammenfassung

Aus den empirischen Untersuchungen der Materialdämpfung ist ein grafisches Berechnungsprogramm erstellt worden, mit dessen Hilfe für verschiedene CF-Fächergewichte die zu erwartenden Materialdämpfungen ermittelt werden können. Die Berechnung der Dämpfungswerte der betrachteten Materialien sowie der CF-Papier basiert auf der Näherung durch zwei Polynomfunktionen und werden getrennt voneinander approximiert, da sie sich in ihren CF-Fächergewichten stärker voneinander unterscheiden. Da die berechneten Werte aus den Dämpfungsmessungen in der 100-MHz-Sonde abgelesen sind, liegt deren Gültigkeit für den Frequenzbereich von 100 MHz bis 1 GHz. Mit Hilfe des Tools ist es möglich anhand des Fächergewichtes und der Materialstärke die elektromagnetischen Eigenschaften des Materials zu ermitteln. Damit kann schon vor der Herstellung eines Materials eine gute Abschätzung über dessen elektromagnetische Eigenschaften gegeben werden, was die Auslegung stark vereinfacht und wirtschaftlicher macht.

11 Validierung des Auslegungstools (AP 8)

Zur Validierung des Berechnungsprogramms ist die Dämpfung weiterer Materialproben ermittelt worden, die CF-Fächergewichte von 8 g/m² bis zu 50 g/m² aufweisen, um die Funktionsfähigkeit über weite Bereiche zu testen. Als Messverfahren ist auch hier die TDM-Messweise genutzt worden. Die Messergebnisse sind in Abbildung 11.1 zusammen mit den im Berechnungsprogramm verwendeten Kurvenapproximationen dargestellt.

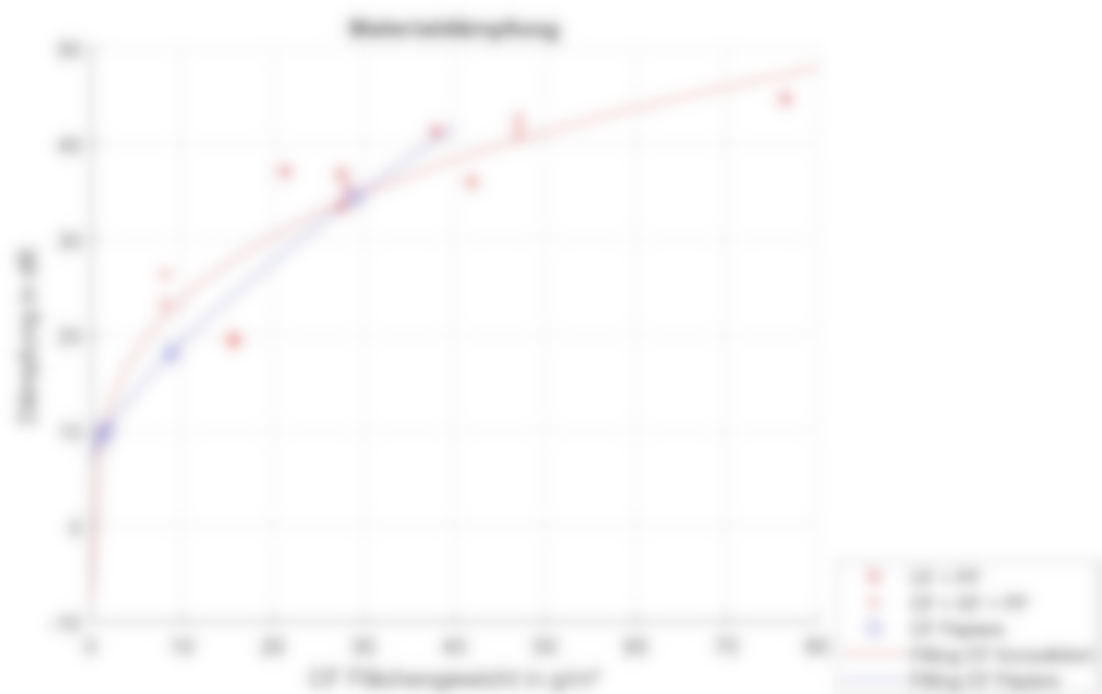


Abbildung 11.1 Validierung des Auslegungstools durch weitere Dämpfungsmessungen

Die gemessenen Dämpfungswerte folgen dem approximierten Kurvenverlauf und streuen um die approximierte Kurve mit ca. ± 3 dB. Derartige Abweichungen sind zu erwarten, da bei den Messungen verschiedene Unsicherheiten vorliegen. Zum einen variieren die Dämpfungswerte von Proben des gleichen Ausgangsmaterials durch eine inhomogene Materialverteilung über der gesamten Probenfläche. In Abbildung 7.10 ist zu erkennen, dass es zur Ausbildung von C-Fasern kommt und dadurch die Fächergewichte des CF-Probenmaterials unabhängig sind. Zum anderen ist das CF-Fächergewicht von dem gesamten Fächergewicht des Probenmaterials abgetrennt und stellt eine genaue Bestimmung des Fächergewichtes und ein genaues Messverhltnis der Einzelbestandteile voraus.

Die Validierung des Auslegungstools erfolgte anders als ursprünglich geplant, da bereits im Kickoff Meeting festgelegt wurde, kein fertiges Produkt zu erhalten, sondern auf der

Materialien zu stellen (siehe MP1). Daher wurde während des Projektes kein Demonstrator mit komplexer Geometrie, sondern ebene Platten hergestellt und untersucht. Die Herstellung erfolgte daher ebenfalls mit weiteren Plattenmaterial, um die Funktionalität des entwickelten Tests, durch Vergleich der berechneten und anhand der Proben gemessenen elektromagnetischen Eigenschaften, sicherzustellen. Durch die Anpassung von Flächengewicht und Carbonfasergehalt der Materialien lassen sich die in MP1 geforderten elektromagnetischen Schirmeigenschaften erzielen.

11.1 Zusammenfassung

Die dem Berechnungsprogramm zugrundeliegenden Approximationen sind durch weitere Dämpfungsmessungen der Materialien überprüft worden. Die Streuung der gemessenen Werte um die approximierten Kurve liegt im Bereich von ca. ± 5 dB. Durch die inhomogene Materialverteilung der C-Fasern, sind abweichende Dämpfungswerte von Proben des gleichen Ausgangsmaterials in dieser Höhe zu erwarten.

12 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (AP 9)

Im folgenden Kapitel werden die Kosten zur Herstellung von Vliesen aus recycelten Carbonfasern und Polypropylen mittels einer Prozesskostenrechnung berechnet. Als Berechnungsgrundlage wird die Krempelvliesanlage des ITA Augsburg herangezogen.

Auf die Verwendung des DeltaCo-Tools (2020-12) wurde nach Absprache mit dem PkK am 10.12.2020 verzichtet, da das Tool für Bauteile und nicht für einen Plattenmaterial konzipiert ist. Zudem ist das Tool für hochbelastete Materialien ausgelegt, was die Vergleichbarkeit einschränkt.

Für die Prozesskostenrechnung werden die folgenden Prozesse unterschieden:

- Vliesherstellung
- Bauteilherstellung im Heißpressverfahren

Diese setzen sich jeweils aus den folgenden Kosten zusammen:

- Personalkosten
- Energiekosten
- Werkzeugekosten
- Investitionskosten
- Abschreibungskosten (CF und PV)

Die entstehenden Investitionskosten werden in jedem Fall pro Jahr ermittelt bzw. auf jährliche Kosten umgerechnet. Die Investitionskosten werden über die Annuitätenrechnung in jährlichen Kosten umgerechnet. Die Formel zur Ermittlung von Annuitäten ist im Folgenden dargestellt (2020):

$$A = \frac{I \cdot i \cdot (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (12.1)$$

Die Annuität (A) besteht aus dem Produkt der Darlehensschuld (I) und dem Annuitätenfaktor. Der Annuitätenfaktor setzt den Zinssatz (i) und die Abschreibedauer (n) der Investition zueinander ins Verhältnis. Das Produkt aus Darlehensschuld (I) und Annuitätenfaktor gibt die jährlichen Aufwendungen für die Investitionssumme an (2020).

Zunächst wird die Vliesherstellung betrachtet.

Die Personalkosten sind abhängig vom jeweiligen Schichtbetrieb. Der Betrieb der Anlage erfolgt im 3-Schicht-Betrieb. Eine Schicht wird mit 8 Stunden veranschlagt. Pro Woche fallen 21 Schichten an, die zu bearbeiten sind:

$$N_{\text{Personnel}} = \frac{\text{Stunden pro Woche}}{\text{Schichtdauer}} \cdot \frac{21 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2}}{F_{\text{Anlage}}} \cdot \frac{\text{Schichten}}{\text{Woche}} \quad (12.2)$$

Pro Anlage können 3 Schichten bzw. 48 Stunden pro Woche gearbeitet werden, bei einer Anwesenheit von ca. 80 % (Schicht, Krankheit etc.). Pro Schicht werden zur Bedienung der Anlage zwei Personen benötigt. Für den Jahresbetrieb werden zehn Anlagentechniker benötigt:

$$N_{\text{Personnel}} = \frac{N_{\text{Anlagen}}}{N_{\text{Anlagen pro Woche}}} \cdot N_{\text{Anlagen pro Schicht}} \\ = \frac{21 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2}}{48} \cdot \frac{\text{Anlagen}}{\text{Schicht}} \cdot \frac{1}{\text{Anwesenheit (80\%)}} = 10 \text{ Anlagentechniker} \quad (12.3)$$

Als Jahreslohn werden 40.000 € veranschlagt. Damit liegen die Kosten für Personal bei 400.000 €.

Die Energiekosten ergeben sich aus der benötigten Leistung. Die Krampel benötigt 60 kW (200 kW) im veranschlagten 3-Schichtbetrieb mit einer Anlageneffektivität von 80 % ergibt sich ein jährlicher Strombedarf für die gesamte Anlage von 517 MWh:

$$P_{\text{Anlage}} \cdot N_{\text{Anlagen}} \cdot \text{Anlageneffektivität} \cdot t_{\text{Anlage}} = 60 \text{ kW} \cdot 21 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{0,8} \\ = 517 \text{ MWh} \quad (12.4)$$

Als Strompreis wird der Preis für Industriestrom aus 2020 verwendet. Der Strompreis 2020/2021 beträgt ca. 19,30 ct/kWh (Strom). Insgesamt ergeben sich die Energiekosten zu 99.870 €:

$$N_{\text{Energy}} = P_{\text{Anlage}} \cdot N_{\text{Anlagen}} \cdot N_{\text{Schicht}} = 47000 \frac{\text{MWh}}{\text{a}} \cdot 19,30 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} = 99.870 \frac{\text{€}}{\text{a}} \quad (12.5)$$

Die Wartungskosten werden aufgrund von Erfahrungswerten mit ca. 10.000 € angegeben.

Aus der Anlagenkapazität von 1.200.000 kg/a und den Kosten für die Fasern ermittelt sich die Rohstoffkosten zu 1.575.007 €/a:

$$K_{\text{Rohstoff}} = K_{\text{Fasern}} \cdot \frac{\text{Produktion}}{\text{Kapazität}} = 0,44 \cdot \frac{1.200.000 \frac{\text{kg}}{\text{a}}}{1} = 1.575.007 \frac{\text{€}}{\text{a}} \quad (12.8)$$

Damit ergeben sich für die Herstellung folgende jährliche Kosten:

Tabelle 12.2: Herstellung jährliche Kosten

Kosten	Jährlich
Personalkosten	410.000 €
Energiekosten	25.275 €
Wartungskosten	11.000 €
Investitionskosten	810.000 €
Rohstoffkosten	1.575.007 €

Die Berechnungen werden analog für eine 1.200 Tonnen Hydraulik Presse durchgeführt.

Als Investitionskosten werden 800.000 € angenommen und zusätzlich 100.000 € für ein entsprechendes Presswerkzeug. Das Presswerkzeug muss aufgrund der hohen Abstände des Carbons regelmäßig gewartet werden. Daher ergeben sich Wartungskosten von geschätzten 20.000 €/a.

Die Energiekosten der Presse werden mit ca. 25 kWh angenommen.

Die Personalkosten werden ebenfalls mit 400.000 €/a angenommen.

Die Pressenkosten pro Teil werden anhand der von PolyMight 3D, Technologies GmbH, Mellingen ermittelten Werte zu 20 min pro Teil angenommen. Angestrebt sind allerdings wesentlich kürzere Taktzeiten. Mit 20 min pro Teil ergibt sich bei durchgehender Produktion und einer Verfügbarkeit von 80 % eine Stückmenge von 18.000 Teilen pro Jahr. Als durchschnittliches Stück-Plattengewicht wird 1000 g angenommen. Die Rohstoffkosten sind bereits in den Herstell angefließen.

Damit ergeben sich für das Pressen von Bauteilen folgende jährliche Kosten für:

Tabella 12.3: Prozess der Bauteile, jährliche Kosten

Kosten	Jahressumme
Personalkosten	410.000 €
Energiekosten	17.400 €
Wartungskosten	30.000 €
Investitionskosten	1.200.000 €

Für die Prozesskostenrechnung werden die leistungsmengeninduzierten Kosten (IK) und die leistungsmengenneutralen Kosten (IN) unterschieden. Im hier betrachteten Beispiel setzen sich die leistungsmengeninduzierten Kosten (IK) aus den folgenden Kosten zusammen:

- Personalkosten
- Energiekosten
- Abschreibung

Die leistungsmengenneutralen Kosten (IN) umfassen die folgenden Kosten:

- Investitionskosten
- Wartungskosten

Die Prozesskosten werden in Kosten pro kg Material angegeben:

Prozess	Prozesskosten in kg	Prozesskosten in €	IK in €	IN in €	Gesamt Prozesskosten in €
Industrie	100000	400000	3,00	3,70	6,70
Neutral	1000	40000	20,00	4,00	24,00

Dabei berechnet sich der IK-Prozesskostensatz aus:

$$\text{IK-Prozesskostensatz} = \frac{\text{Prozesskosten}}{\text{Prozessmenge}} \quad (12.8)$$

Der IN-Prozesskostensatz berechnet sich zu:

$$\text{IN-Prozesskostensatz} = \frac{\sum \text{Leistung neutrale Kosten}}{\sum \text{Leistung industrielle Kosten}} \cdot \text{IK-Prozesskostensatz} \quad (12.9)$$

Es ist anzunehmen, dass der Vliesstoff grundsätzlich mit 4,87 € pro kg wirtschaftlicher zu produzieren ist, als vergleichbare Materialien. Die Vliesstoffherstellung durch Verpressen kann jedoch noch stark optimiert werden, da die Prozesskosten von 25 mit unterschritten sind. Eine Verringerung auf 5 mm würde die Prozesskosten bereits auf 3,33 € pro kg verringern und die gesamten Herstellungskosten liegen dann bei ca. 11 €/kg.

12.1 Zusammenfassung

In diesem Kapitel werden die Kosten zur Herstellung von Carbonfasern-Vliesstoff und anschließender Vliesstoffherstellung mittels Thermoflexion betrachtet. Die Kosten für die Vliesstoffherstellung belaufen sich bei einem Flächengewicht von 20g/m² auf ca. 4,87 €/kg und sind damit wirtschaftlich.

Das Verpressen des Vliesstoffes mittels Thermoflexion bedarf noch weiterer Entwicklung, um wirtschaftlicher zu sein. Bei der im Projekt ermittelten Takzeit von 25 ms sind die Kosten pro Beutelplatte mit einem Gewicht von 1 kg mit 27,83 € sehr hoch. Durch eine Verringerung der Takzeit kann das Verfahren ebenfalls wirtschaftlich werden. Alternativ kann der Vliesstoff je nach Anwendungsfeld auch unimpressiert hergestellt werden.

13 Zusammenfassung der Projektergebnisse

Zunächst wurden die Anforderungen an das zu untersuchende Material ermittelt und eine Materialsuche zu alternativen Schwingungsmaterialien durchgeführt.

Dabei sind die gewünschten elektromagnetischen Materialeigenschaften stark vom Verwendungszweck abhängig und teilweise sollen sogar gegenläufige Anforderungen erfüllt werden.

Zur Überprüfung der Eigenschaften wurde im Rahmen des Projektes ein Messstand aufgebaut und in Betrieb genommen. Mit dem Messsystem kann die Transmission in Abhängigkeit des Winkels der Probe gemessen werden, ebenso wie die Reflexion, sowohl normalstrahlend als auch totalstrahlend. Bei normalstrahlenden Messungen ist die Position von Sender- und Empfängerantenne identisch, bei totalstrahlenden Messungen unterscheidet sich die Position von Sender- und Empfängerantenne. Dies ist insbesondere bei Messung der diffuse Reflexion entscheidend bzw. bei nicht-verbreitertem Einfall der Welle.

Dabei wurden für die unterschiedlichen Messungen verschiedene Systeme benötigt. Exemplarisch ist hier ein Bild für die Fernmessung diffuser Reflexion gezeigt.



Abbildung 13.1: Messaufbau zur Untersuchung diffuser Reflexion

Zum Nachweis von Materialdämpfungen im Bereich über 50 dB, ist eine Messung im Freiraum aufgrund der geringen Messdynamik des Aufbaus außerhalb der Nachweisgrenze und erfordert einen abstrahierenden Messaufbau. Eine Möglichkeit höhere Materialdämpfungen nachzuweisen ist mittels einer TEM-Messzelle gegeben. Daher wurde auch eine TEM-Zelle (siehe nachfolgende Abbildung) in Betrieb genommen.

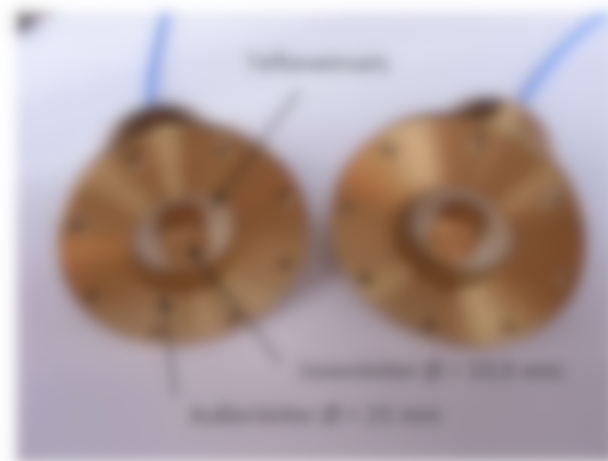


Abbildung 13.2: Aufbau einer TDR-Messzelle zur Messung der Materialgrößen bis 5 GHz

Zudem wurde auch ein System zur Ermittlung des Radernickstrahlungsquerschnitts aufgeföhrt. Dabei wird die Messung nicht mehr mit dem vorher beschriebenen Netzwerkanalysator durchgeführt, sondern es wird stattdessen ein spezieller Radarsensor benutzt, der im Frequenzbereich 70-80 GHz arbeitet. Die Messung des Radernickstrahlungsverhaltens (Radar Cross Section) erlaubt eine Aussage darüber, wieviel Leistung in Richtung des Radars zurückgestrahlt wird und gibt einen Wert für die (elektromagnetische) Größe eines Zieles. Je höher das RCS, desto höher ist die empfangene Leistung am Radar und desto sichtbarere und somit erkennbare ist ein Ziel. Die nachfolgende Abbildung zeigt den Radarsensor.



Abbildung 13.3: Messanordnung mit hochauflösendem Radar

Mit den aufgebauten Messsystemen wurden die Beschleunigungsmaterialien auf ihre elektromagnetischen Schwingungseigenschaften hin untersucht. Zusätzlich wurde zur Bestimmung der dielektrischen Materialparameter eine Koaxialsonde verwendet.

Anschließend wurden die Transmissions- und Reflexionseigenschaften untersucht. Zusätzlich wurden die mechanischen Eigenschaften der Materialien ermittelt.

Auf Basis der Ergebnisse der Beschleunigungsmaterialien wurden Proben aus Carbonfasern und Carbonpapier hergestellt. Dabei entstanden die Vliesproben an ITA Augsburg und die Carbonpapiere bei der Firma Resin-Überflächenstechnik.

Zur Herstellung der Vliesstoffe aus Carbonfasern und thermoplastischen Fasern wurde die DLD Kompakt Vliesstoffline, welche an ITA Augsburg in Betrieb ist, verwendet. Nachfolgend ist in Abbildung 7.1 die Vliesstoffline abgebildet.



Abbildung 7.1 DLD Kompakt Vliesstoffline

Die hergestellten Proben wurden auf dem in AP 2 aufgebauten Messsystemen und anschließend auf ihre mechanischen Eigenschaften hin untersucht.

Die Messkurven der Reflexionsmessungen, die in Abbildung 7.11 dargestellt sind, liegen für die Probenmessungen nahe der 0-dB-Linie. Dies deutet auf hohe Reflexionen an der Materialoberfläche hin und zeigt, dass die Materialdämpfung der Proben maßgeblich durch Reflexionen bestimmt ist, die in Zusammenhang mit ihrer hohen elektrischen Leitfähigkeit stehen.

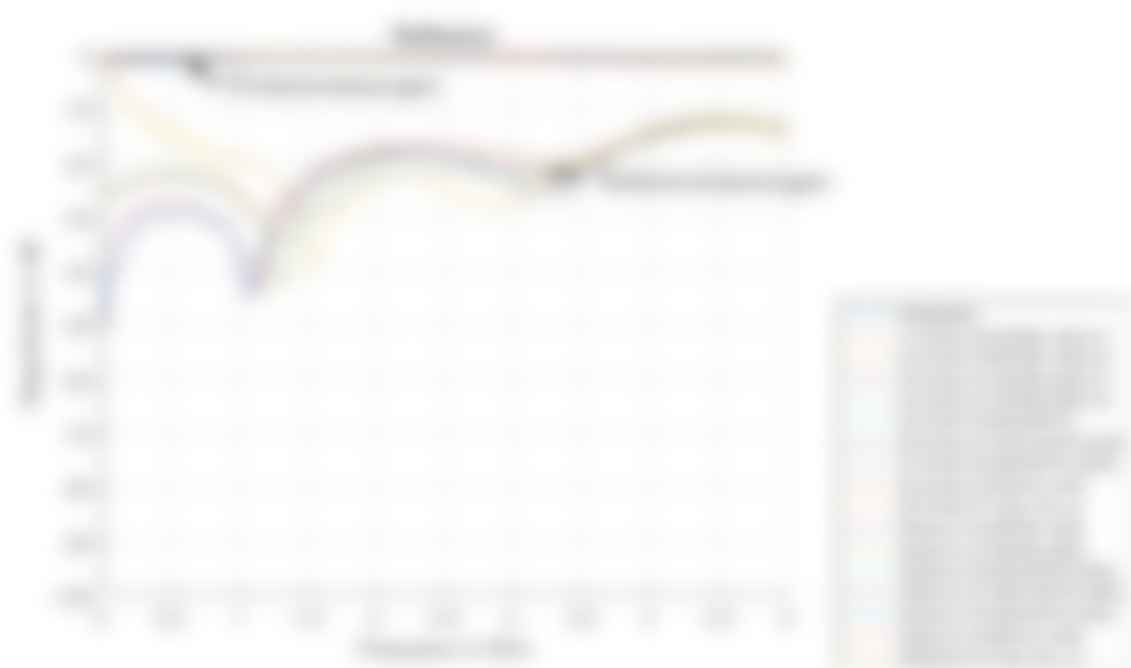


Abbildung 10: Entwicklung der verschiedenen Parameter

Die Abbildung zeigt die Entwicklung der verschiedenen Parameter über die Zeit. Die y-Achse stellt die Werte dar, die von 0 bis 100 reichen. Die x-Achse zeigt die Zeitpunkte von 1 bis 10. Fünf verschiedene Parameter sind über die Zeit hinweg verfolgt worden. Die Parameter sind durch unterschiedliche Farben markiert: Blau, Gelb, Rot, Grün und Lila. Alle Parameter zeigen eine deutliche Abnahme in den ersten beiden Zeitpunkten, gefolgt von einer gewissen Erholung oder Stabilisierung. Der Parameter in Blau beginnt bei 100 und sinkt auf 80, während der Parameter in Lila von 100 auf 40 sinkt. Die Parameter in Gelb, Rot und Grün zeigen nach der anfänglichen Abnahme tendenziell einen Anstieg, wobei der Parameter in Grün die stärkste Abnahme erleidet.

Die Daten der Abbildung sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst dargestellt. Die Werte sind auf zwei Dezimalstellen gerundet.

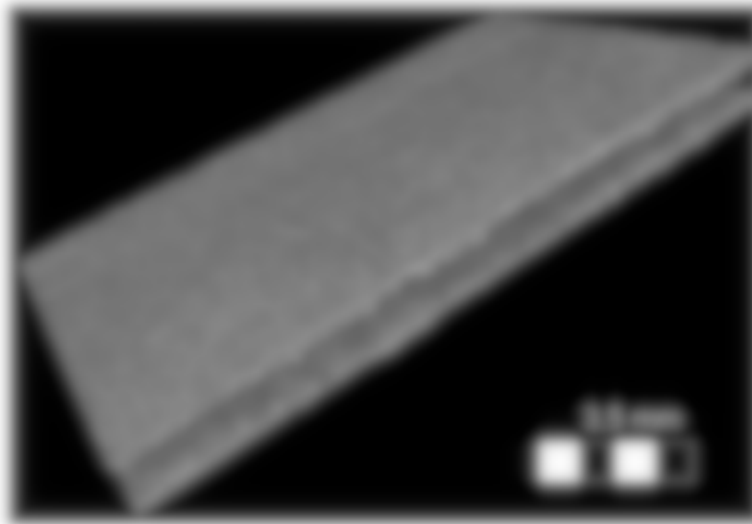


Abbildung 13.6: 3D Visualisierung der CT Aufnahmen eines Carbonfaserbündels

Mit Hilfe des physikalischen Modells ist die Simulation des Radar-Rückstreuquerschnitts möglich. Das Rückstreuverhalten kleinerer CF-Proben ist simuliert worden und deutet auf ein stark gestreutes Reflexionsverhalten an der Materialoberfläche hin. Nachfolgend ist ein beispielhafte Visualisierung der Simulation gezeigt.

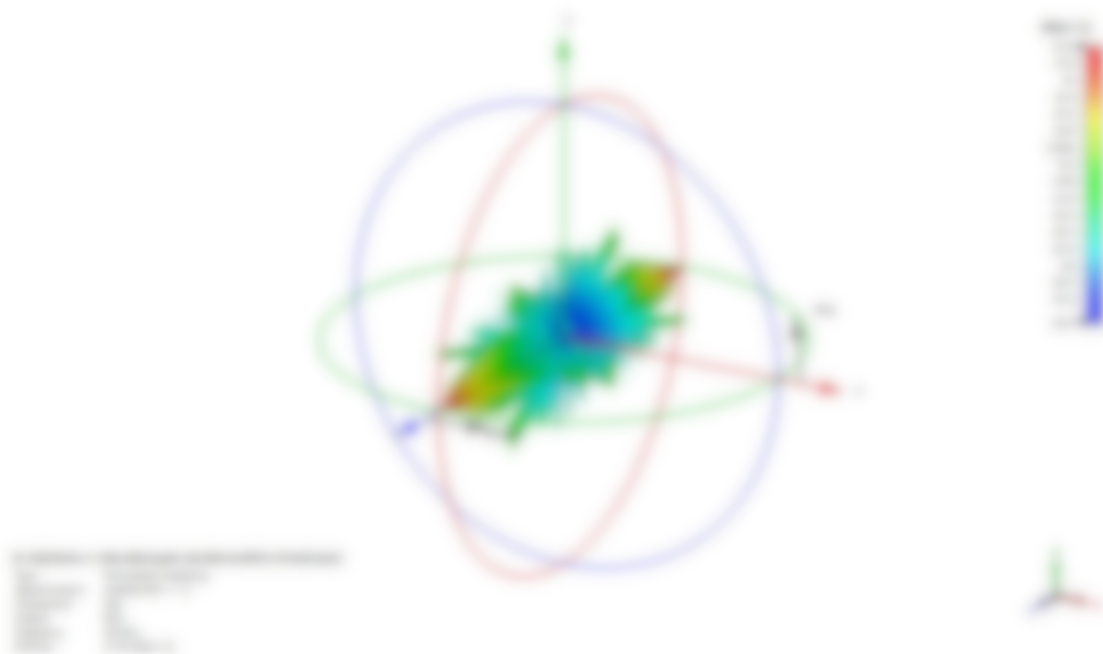


Abbildung 13.7: Simulation des Radar-Rückstreuquerschnittes bei 30 GHz

Im Rahmen des zweiten Arbeitspakets wurde die Korrelation der Schwingungsmaterialien betrachtet. Es wurden verschiedene Varianten hergestellt und vermessen. Die gemessenen Varianten wurden in einem House of Quality miteinander

verglichen. Dabei stellte sich heraus, dass eine einfache und kosteneffiziente Herstellung der Membranen mit Halbleitern sehr gute Ergebnisse liefert.

Auf Basis der Erkenntnisse im Projekt wurde ein Auslegungstool für Carbonfasern und Fasern erstellt. Dieses beruht derzeit noch auf empirischen Untersuchungen der Membranherstellung. Mit Hilfe des Tools können für verschiedene CF-Fächergewichte die zu erwartenden Membranhöhen ermittelt werden können. Das Tool wurde mit weiteren Messungen validiert.

Abschließend wurde eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Produktionsprozesses durchgeführt. Dabei wurde ermittelt, dass der Pressprozess für Carbonfasern noch großes Optimierungspotential besitzt. Nach erfolgreicher Optimierung ist das hergestellte Material zu den auf dem Markt erhältlichen Optionen konkurrenzfähig.

14 KMU-Nutzen

Im Rahmen des IGF-Vorhabens „Zellulose“ wurde die Schirmwirkung von Carbonfasern in Kunststoffen und Papieren untersucht. In den nachfolgenden Abschnitten erfolgt eine Darstellung hinsichtlich des Nutzens der Projektergebnisse.

14.1 Wissenschaftlich technischer Nutzen

Mit den durchgeführten Arbeiten wurden die Schirmwirkungen von Kunststoffen und Papieren mit Carbonfasern untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass die Schirmwirkung bereits mit vergleichsweise geringen Anteilen an Carbonfasern bei einer Referenz-Messprobe erreicht.

Es wurden verschiedene Schirmungsmaterialien untersucht und auf Grundlage dieser Referenzmaterialien auf Kunststoffen hergestellt. Zur Untersuchung wurde der Referenzmaterialien als auch im weiteren Verlauf des Projektes hergestellten weiteren Proben wurde ein IRE als Prüfstand zur Messung der elektromagnetischen Eigenschaften genutzt, aufgebaut und in Betrieb genommen. Dieser Prüfstand kann in Zukunft zur weiteren Untersuchung der elektromagnetischen Eigenschaften von Materialien genutzt werden.

Mit Hilfe des im Rahmen des Projektes aufgebauten Prüfstandes kann durch weitere Messungen von Materialien eine Datengrundlage für eine Datenbank von Schirmwerkstoffen aufgebaut werden.

Die Erkenntnisse über die Herstellung von Abschirmungsmaterialien aus Kunststoffen mit Carbonanteil und Polymeren lassen sich auch auf andere Materialmaterialien übertragen, so dass weitere Materialkombinationen für die elektromagnetische Schirmung hergestellt und getestet werden können. Dabei können darüber hinaus auch andere Materialeigenschaften untersucht werden, ohne die elektromagnetische Schirmwirkung zu verringern.

Die Untersuchung der Konstellationsmaterialien hat gezeigt, dass zur elektromagnetischen Schirmung oftmals keine aufwändige Konstellierung notwendig ist. Diese Erkenntnisse kann für andere Anwendungen mit Carbonfasern genutzt werden, wie z. B. Befestigung.

Das entwickelte physikalische Modell kann zukünftig für weitere Simulationen und Berechnungen von Herstellern und ihren Eigenschaften verwendet werden. Dabei bietet sich vielfältige Möglichkeiten.

14.2 Wirtschaftlicher Nutzen insbesondere für KMU

Neuherfindungen von Carbonfasern können die Fasereigenschaften wirtschaftlicher verbessern, da die Erweitern der Produktpalette neue Anwendungen für Carbonfasern eröffnen. Weiterhin werden neue Kundenkreise erschlossen, da die Nutzung als Schwingungsmaterial neue Märkte eröffnet. Dasselbe gilt für die Hersteller von neuen Carbonfasern.

Hersteller erhalten neue Produktionsmöglichkeiten in einem stark wachsenden Markt durch die Herstellung von ICF-verstärkten Gegenständen auf Basis von Microfasern aus ICF und Thermoplastfasern. Durch die erweiterten Anwendungsbereiche der Materialien und Kombinationen können neue Kunden akquiriert werden, die z. B. Schwingelemente in Leichtbauweise nutzen möchten, um das vorhandene Marktpotential zu erschließen. Die Erweiterung der Erzeugung kann ohne Investitionskosten erfolgen, da die bestehende Anlagentechnik weiter genutzt werden kann sofern diese zur Verarbeitung von Carbonfasern geeignet ist.

Hersteller von Baugruppen und Bauteilen erhalten neue Möglichkeiten als Variante für die Produktentwicklung. Durch die neuen Optionen können entweder bestehende Produkte günstiger angeboten, oder neue Materialkonzepte entwickelt werden. Insbesondere die gute Schweißbarkeit der ICF-Materialie bei gleichzeitig geringem Preis ermöglicht dabei die Entwicklung einer neuen Generation nachhaltiger Produkte. Auch im Bereich der hochfrequenten Schwingung sind leichte und widerstandsfähige Schwingungsmaterialien anwendbar.

Erweiterter können ebenfalls von den verbesserten Eigenschaften der Schwingungsmaterialien profitieren. Darüber sind Anwendungen wie Automobil, Luft- und Raumfahrt, Sensortechnik, Abwehr, Personenschutz, und medizinische Geräte. Die hohe Temperaturfestigkeit der CFasern ermöglicht außerdem den Einsatz für den Personenschutz im Hochtemperaturbereich bei gleichzeitiger elektromagnetischer Abschirmung. Es könnte außerdem gezeigt werden, dass das Material in

Anwendungsbereich: Reflektoren zur Erkennung von Fahrerassistenz-Systemen, Verkehrsschilder

14.3 Innovativer Beitrag

Durch das Projekt wurden carbonfaserverstärkte Kunststoffe und Papiere im Hinblick auf ihre elektromagnetische Schirmwirkung genau charakterisiert. Durch diese neuen Erkenntnisse können Bauteilgewicht und ggf. Kosten reduziert werden. Gerade im Bereich der Elektromobilität ist die Gewichtsreduktion von entscheidender Bedeutung.

Im Gegensatz zu vielen bekannten und kommerziell genutzten Schirmwerkstoffen sind Kunststoffe leichter und lassen sich gut drapieren. Damit gestaltet sich die Formgebung des Materials wesentlich einfacher und ermöglicht mehr Freiheiten. Das Material ist durch den thermoplastischen Polymeranteil zudem formstabil und kann damit direkt zu Bauteilen mit elektromagnetischer Schirmwirkung umgeformt werden, ohne dass eine zusätzliche Auf- oder Verbringung eines elektromagnetischen Schirmwerkstoffes nötig ist.

Zur Auslegung von Bauteilen mit den ermittelten elektromagnetischen Schirmwerkstoffen können die Auslegungstools, welches auf Basis des ermittelten mathematischen Modells arbeitet, genutzt werden. Damit ist eine einfache und schnelle Auslegung des Materials möglich. Zudem wurden durch die Untersuchungen der Korrelation von neuen Erkenntnissen über die Anbindung von Carbonfaserverstärkten Materialien gewonnen, welche ebenfalls in die Gestaltung und Auslegung von Bauteilen einfließen können.

14.4 Industrielle Anwendung

Die Übertragung der Projektergebnisse auf die Nutzung in industriellen Maßstab gestaltet sich unterschiedlich.

Die Hybridteile aus KCF und thermoplastischen Polymeren können von Kunststoffherstellern auf herkömmlichen Maschinenten ohne oder mit minimalen Anpassungen des Prozesses verarbeitet werden. Auch die Weiterverarbeitung der Hybridteile zu Organblechen und Bauteilen ist ebenfalls auf herkömmlichen Anlagen

möglich, so dass auch hier eine Übertragung auf industrielle Prozesse selbst möglich sein. Immer vorausgesetzt die Anlagen sind für die Verarbeitung von Carbonfasern geeignet. Zu beachten sind hierbei die elektrische Leitfähigkeit der Fasern, die elektrische Teile beschädigen kann, und die Abrasivität der Fasern.

Die Nutzung der Carbonfasern und -spinnere als Schwingungsmaterial mit bekannten elektromagnetischen Eigenschaften ist für die Industrie von Vorteil da die Auslegung von Teilen gezielt erfolgen kann, ohne dass die Teile unnötig überdimensioniert werden müssen, da die genaue Schwingung unbekannt ist. Zudem können bestehende Schwingungsmaterialien durch ggf. weitere Verfahren ersetzt werden.

15 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die gesamten Arbeiten an diesem Projekt erfolgten innerhalb der bewilligten Projektlaufzeit im Zeitraum zwischen dem 01.01.2019 und dem 31.12.2020.

Die Durchführung des Projekts an den Forschungseinheiten war notwendig, um die Schmelzung von selbstbeschaltenden Nanostäben und -papieren abbilden und untersuchen zu können. In der Kombination von ITA Aachen, ITA Augsburg und IPE Karlsruhe standen die notwendigen Produktionskapazitäten sowie die spezifischen Kompetenzen und das Fachwissen der Experten zur Verfügung. Auf diese Weise konnten die Erhebung von Prüfständen, die Wiederherstellung, die Durchführung von Prüfungen an fertiggestellten und fertiggestellten Material und die darauf aufbauende internationale Weiterbildung, die zur Erfüllung der Forschungsaufgabe notwendig waren, schnell und erschließend abbildet sowie bewertet werden.

Wichtigkeit der selbsthergestellten Pelt-Fasern und die Auswertung der Abbildung in der Prozesskette, insbesondere in Organisch, untersuchen zu können. An ITA standen die notwendigen Produktionskapazitäten sowie die spezifischen Kompetenzen und das Fachwissen der Experten vor Ort zur Verfügung. Auf diese Weise konnten die Herstellungsgeschichte, Feuertemperaturversuche, die Wiederherstellung und die erschließende Organischherstellung, die zur Erfüllung der Forschungsaufgabe notwendig waren, schnell und erschließend geprüft sowie bewertet werden.

Das Projektbudget entspricht weitgehend dem beantragten Arbeitsplan. Allerdings mussten aufgrund der weltweiten Covid-19 Pandemie seit dem Frühjahr 2020 einige Schritte angepasst werden, da insbesondere Besuche in den Produktionsstätten der Mitglieder des PIA in persönlicher Form nicht möglich waren.

Die Personalbudgets für das wissenschaftliche Personal des ITA Aachen belaufen sich auf 22,41 Personennominate. Bei allen Arbeiten wurden die wissenschaftlichen Mitarbeiter durch technisches Fachpersonal und studentischen Mitarbeiter unterstützt.

Die Personalbudgets für das wissenschaftliche Personal des IPE belaufen sich auf 16,0 Personennominate. Bei allen Arbeiten wurden die wissenschaftlichen Mitarbeiter durch studentische Mitarbeiter unterstützt.

Die Personalausgaben für das wissenschaftliche Personal des IFA Augsburg belaufen sich auf 3,0 Personennominate. Bei allen Arbeiten wurden die wissenschaftlichen Mitarbeiter durch technisches Fachpersonal und studentischen Mitarbeiter unterstützt.

Die Personalmittel wurden dementsprechend der Vorgabe der Bewirtschaftung in der Haushaltspläne 2019 und 2020 bei den Personalausgaben in der beantragten Höhe verbraucht. Der Personalersatz war für das Forschungsvorhaben angemessen und notwendig.

Wie bei der Projektplanung vorgesehen, wurden weitere Gerätebeschaffungen durchgeführt und Leistungen Dritter in Anspruch genommen.

16 Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Nachfolgend sind die bereits ergriffenen Maßnahmen zum Ergebnistransfer sowie die weiter geplanten Maßnahmen aufgelistet.

Tabelle 16.1: Durchgeführte Ergebnistransfer während des Projekts

Maßnahme	Ziel	Durchführung	Termin
Ergebnistransfer	Ankündigung Ergebnis der Forschungsarbeiten an den IFA	Erste Sitzung zum Projektstatus, Diskussion zur ggf. Anpassung der weiteren AP	FA Treffen am 07.06.2016
		Treffen zur Ankündigung und Diskussion der ersten Ergebnisse	FA Treffen am 16.06.2016
		Wissenschaftler zur ersten Ankündigung und Diskussion	FA Treffen am 16.12.2016
Veröffentlichungen in Fachzeitschriften, Wissen und erfahren zugängliche Medien	Bekanntheit des Projekts in der Industrie	April 2016: 16th World Wide Conference	11. 16.06.2016
		16th World ProjectForum	07.10.2016
Projektkommunikation	Informieren und Einbindung von externen Partnern	Zu Projektstart wurde auf der Homepage berichtet. Die Seite wird kontinuierlich aktualisiert	Zum Projektstart

Tabelle 16.2: Geplante Ergebnismetriken nach Projektende

Metrikname	Ziel	Definition	Skalierung
<p>Umsetzung in der Wirtschaft Folgerichtig Übertragung auf Produkte und Verfahren</p>	<p>Übertragung der physikalischen Effekte auf andere Materialklassen wie z. B. Carbonfasern, Glasfasern Ermittlung geeigneter Produkte und Übertragung dieser Wirkstoffe in die Herstellung Prozesse</p>	<p>Ziel: Projekte mit 100% Partnern, z.B. Entwicklung von EMI-Reflexoren für Kinder und Straßenverkehr für die Verkehrssicherheit im Hinblick auf Fahrerassistenzsysteme Auch mögliche Funktionserweiterung Schulungsgruppen für Fachkräfte und Lehrkräfte in der Elektrotechnik</p>	<p>Skalierung nach Projektende</p>
<p>Veröffentlichungen in</p>	<p>Übertragung der Ergebnisse in die Wirtschaft</p>	<p>Artikel in Fachzeitschriften Allgemeiner Wissenschaftsreport, Trade Research Journal, Renewable Industry Journal, Industrial Technology, IEEE Transactions</p>	<p>Nach Projektende</p>

Schulung von KMU	Übertragung der Ergebnisse in die Wirtschaft	Gemeinsame Workshops mit IFA oder dem IFE	Nach Projektende
------------------	--	---	------------------

Die Realisierbarkeit der geplanten Maßnahmen zum Ergebnistransfer wird unterschiedlich bewertet. Die Weiterverfolgung der Thematik wird auf Forschungsebene als sehrversprechend, da es noch weiteren Forschungsbedarf zu EM-Schwingungsmaterialien gibt. Die Ergebnisse werden in verschiedenen Medien veröffentlicht werden. Die Nutzung der Ergebnisse in industriellen Anwendungen wird voraussichtlich eher lang als kurzfristig erfolgen.

17 Durchführende Forschungsstellen

- Forschungsstelle 1: RWTH Aachen University
Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University (ITA)
Otto-Blumenthal-Straße 1
52074 Aachen
Institutsleiter: Univ.-Professor Professor h. c. (MGU) Dr.-Ing.
Dipl.-Wirt. Ing. Thomas Gries
Projektleiter: Jonas Broening, M. Sc.
- Forschungsstelle 2: Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Höchstfrequenztechnik und Elektronik
Kaiserstraße 12
76131 Karlsruhe (Baden-Württemberg)
Institutsleiter: Prof. Dr.-Ing. Werner Wiesbeck
- Forschungsstelle 3: Institut für Textiltechnik Augsburg gGmbH
Am Technologiezentrum 5
86159 Augsburg (Bayern)
Institutsleiter: Prof. Dr.-Ing. Stefan Schlichter

18 Danksagung

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das IGF-Vorhaben 20293 N der Forschungsvereinigung Forschungskuratorium Textil e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Wir danken der IGF für die Förderung dieses Projekts.

Weiterhin danken wir den Teilnehmern des projektbegleitenden Ausschusses und ihren Mitarbeitern für die konstruktiven Diskussionen und die inhaltliche Teilnahme.

- CFK Valley Stade Recycling GmbH & Co KG, Wischhafen
- CTC GmbH, Stade
- Daimler AG Group Research & MBC Development, Hamburg
- Naval Projects UG GmbH, Bischofswiesen
- Pill Nassvliestechnik GmbH, Reutlingen
- PKTEC Pauli & Kayser GmbH, Schutterwald
- Polyvlies, Franz Beyer GmbH & Co KG, Hörstel
- RESO Oberflächentechnik GmbH, Mering
- Sandler AG, Schwarzenbach a.d.Saale
- SGL Technologies GmbH, Meitingen
- Tenowo Nonwovens GmbH, Hof
- IVGT – Industrieverband Veredlung - Garne - Gewebe - Technische Textilien e.V., Frankfurt am Main
- Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV (e.V.), Freising
- Wehrwissenschaftliches Institut für Schutztechnologien - ABC Schutz e.V., Munster

Forschungskuratorium
textil 

Industrielle
Gemeinschaftsforschung



19 Literaturverzeichnis

- [199/519/EG] Empfehlung des EU-Rates vom 12. Juli 1999 zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0Hz – 300 GHz)
- [ABB17] Abbt, Matthias Alexander: Modellierung der Kostenstrukturen bei der Herstellung von Vliesstoffen aus rezyklierten Carbonfasern, Universität Augsburg, Augsburg, ITA Augsburg, Bachelorarbeit, 2017
- [AF12] Albrecht, W; Fuchs, H: Vliesstoffe - Rohstoffe, Herstellung, Anwendung, Eigenschaften, Prüfung, Chemnitz, Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V., Sachbuch, 2012
- [AVK14] AKV – Industrievereinigung verstärkte Kunststoffe e.V.: Handbuch Faserverbundkunststoffe: Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen 3. Aufl. - Wiesbaden: Vieweg + Teubner/GWV Fachverlage GmbH, 2014.
- [BCG+13] Berg, D. C.; Cetin, M.; Greb, C.; Kaufmann, M.; Waeyenbergh, B.; Ziegmann, G.; Meiners, D.: Design for Manufacture of Composites – DeMaCo, 19. Nationales Symposium SAMPE Deutschland e.V.; 27.02. - 28.02.2013, Hamburg
- [Che11] Cherif, C.: Textile Werkstoffe für den Leichtbau Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2011.
- [Cle14] Cleff, Cordula, Carbonfaserrecycling, Diplomarbeit, Bibliothek des Instituts für Textiltechnik der RWTH Aachen University, Aachen, 2014.
- [Cun13] Cuntze, R.; Entwicklung von Bauteilen aus Faserverbundkunststoff: - Struktursimulation, Teil der Entwicklungs-Prozesskette-, 3. BBG Innovationstag, Vortrag, Mindelheim, Juni 2013.
- [Eic13] Eickenbusch, H., Krauss, O.: Kurzanalyse NR.3: Kohlenstoffverstärkte Kunststoffe im Fahrzeugbau - Ressourceneffizienz und Technologien, VDI ZRE Publikationen, Berlin, 2013.

- [EK13] Dr. Eickenbusch, Heinz; Dr. Krauss, Oliver: Kohlenstoffverstärkte Kunststoffe im Fahrzeugbau - Ressourceneffizienz und Technologien, Berlin, VDI Zentrum Ressourceneffizienz, 2013, Kurzanalyse
- [BGB06] Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft, Sachgebiet Elektrotechnik und Feinmechanik:

DGUV Regel 103-013 Elektromagnetische Felder, zugehörige Regel BGR B11, 2006
- [BJV13] Bundesministerium der Justiz und Verbraucherschutz:
Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder – 26. BImSchV), 2013
- [GS08] Gruschka, Herbert; Schnitzenbaumer, Franz: Methoden zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen bei Investitionsmaßnahmen und Angebote, Bayerischer Kommunalen Prüfungsverband, Geschäftsbericht 2008
- [GVW15] Gries, T.; Veit, D.; Wulfhorst, B.; Textile Technology: An introduction; 2nd Ed.; Munich [u.a.]; Hanser, 2015.
- [Hol14] Holtermann, T.; Methode zur Bewertung und Erhöhung der Energieeffizienz von Produktionsprozessen der Textilindustrie, Shaker Verlag, Aachen, 2014.
- [HSJ05] Holloway, C. L.; Sarto, M. S.; Johansson, M.: Analyzing carbon-fiber composite materials with equivalent-Layer models, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 47, 2005.
- [HW08] Wolfesperger, H. A.: Elektromagnetische Schirmung: Theorie und Praxisbeispiele, Springer Heidelberg, 2008.
- [ICN98] ICNIRP - International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection: Richtlinien für die Begrenzung der Exposition durch zeitlich veränderliche elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder (bis 300 GHz) Health Physics 74 (4): 494-522; 1998.

- [JH10] Jäger, H.; Hauke, T.: Carbonfasern und ihre Verbundwerkstoffe: Herstellungsprozesse, Anwendungen und Marktentwicklung München: Verl. Moderne Industrie, 2010.
- [KG14] Thomé-Kozimeinsky, Karl J.; Goldmann, Daniel: Recycling und Rohstoffe - Band 7, Neuruppin, TK Verlag Karl Thomé-Kozimeinsky, 2014, Sachbuch
- [LEM12] Lässig, R.; Eisenhut, M.; Mathias, A.; Schulte, R. T.; Peters, F.; Kühmann, T.; Waldmann, T.; Begemann, W.: Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen 1. Aufl. – Berlin, Roland Berger Strategy Consultants, 2012.
- [Mar11] Martens, H.: Recyclingtechnik Fachbuch für Lehre und Praxis. Auflage 2011.- Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 2011.
- [MG11] Martens, Hans; Goldmann, Daniel: Recyclingtechnik - Fachbuch für Praxis und Lehre, Wiesbaden, Springer Vieweg Verlag, 2011, Fachbuch
- [MLN+15] Möbitz, C.; Lütke, C.; Niebel, V.; Gries, T.: „Neue Anwendungsmöglichkeiten für Carbonvliesstoffe – Elektromagnetische Abschirmung und Flächenheizung“, Arbeitskreis Technische Textilien, Memmingen, 3.2.2016
- [Poz11] Pozar, D. M.: Microwave Engineering, Wiley, 2011.
- [PW88] Wilson, P. F.; Ma, M. T.: Techniques for measuring the electromagnetic shielding effectiveness of materials: Part II: Near-field source simulation, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 30, 1988.
- [Rus07] Russel, S.J.; Handbook of Nonwovens, Woodhead Publishing, Camebridge, 2007.
- [SI18] Singh, H., et al.: Fundamentals of EM Design of Radar Absorbing Structures (RAS), Springer, 2018.
- [SK11] Schwab, A. J.: Elektromagnetische Verträglichkeit, Springer Berlin Heidelberg, 2011.

- [SLN+14] Schneiders, S., et. al; Recycling of carbon fibres – potentials and approaches for reuse, Dornbirn Man-Made Fibre Congress, Konferenzbeitrag, Dornbirn September 2014.
- [Sta20] Statista GmbH; 2021; URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/252029/umfrage/industriestrompreise-inkl-stromsteuer-in-deutschland/>
- [Str17] Strauß, O.; Organoblech – Alternative zu Stahl und Aluminium, Online-Portal Industrieanzeiger.de, Konradin Verlag Leinfelden-Echterdingen, Ohne Datumsangabe
- [Tre12] Trechow, P.; Leichtbau wird Materialmix von Autos massiv verändern, VDI Nachrichten, Düsseldorf, 06.01.2012.
- [W+14] Witten, E., Kraus, T.; Kühnel, M.; Composites Marktbericht 2014, Onlineveröffentlichung der Carbon Composites e.V., Oktober 2014.
- [Wei12] Weißbach, W.: Werkstoffkunde Strukturen, Eigenschaften, Prüfung, S.241 – 291, 18. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2012, ISBN: 978-3-8348-1587-3.
- [WF12] Wiertz, P., Fuchs, H.: Einführung, In Hilmar Fuchs, H.; Albrecht, W.: Vliesstoffe - Rohstoffe, Herstellung, Anwendung, Eigenschaften, Prüfung. 2. Aufl. - Weinheim: Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA, 2012, S. 1 – 21.
- [WK18] Kark, K. W.: Antennen und Strahlungsfelder: Elektromagnetische Wellen auf Leitungen, im Freiraum und ihre Abstrahlung, Springer Vieweg, 2018.
- [WPR10] Wong, K. H.; Pickering, S. J.; Rudd, C. D.: Recycled carbon fibre reinforced polymer composite for electromagnetic interference shielding, Composites: Part A, Volume 41 (2010), H. 6, S. 693-702
- [WM88] Wilson, P. F.; Ma, M. T.; Adams, J.W.: Techniques for measuring the electromagnetic shielding effectiveness of materials: Part I: Far-field source simulation, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 30, 1988.

20 Anhang

20.1 Erweiterte Ergebnisse der Recherche zu Schirmungsmaterialien

IGF	IGF-Bezeichnung	IGF-Nr.	IGF-Status	IGF-Start	IGF-Ende	IGF-Dauer	IGF-Status	IGF-Status	IGF-Status
1	IGF-Bezeichnung	1	IGF-Status	IGF-Start	IGF-Ende	IGF-Dauer	IGF-Status	IGF-Status	IGF-Status
2	IGF-Bezeichnung	2	IGF-Status	IGF-Start	IGF-Ende	IGF-Dauer	IGF-Status	IGF-Status	IGF-Status
3	IGF-Bezeichnung	3	IGF-Status	IGF-Start	IGF-Ende	IGF-Dauer	IGF-Status	IGF-Status	IGF-Status
4	IGF-Bezeichnung	4	IGF-Status	IGF-Start	IGF-Ende	IGF-Dauer	IGF-Status	IGF-Status	IGF-Status

1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
19	19	19	19	19	19	19	19	19	19
20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
28	28	28	28	28	28	28	28	28	28
29	29	29	29	29	29	29	29	29	29
30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
33	33	33	33	33	33	33	33	33	33
34	34	34	34	34	34	34	34	34	34
35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
37	37	37	37	37	37	37	37	37	37
38	38	38	38	38	38	38	38	38	38
39	39	39	39	39	39	39	39	39	39
40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
43	43	43	43	43	43	43	43	43	43
44	44	44	44	44	44	44	44	44	44
45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
46	46	46	46	46	46	46	46	46	46
47	47	47	47	47	47	47	47	47	47
48	48	48	48	48	48	48	48	48	48
49	49	49	49	49	49	49	49	49	49
50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
51	51	51	51	51	51	51	51	51	51
52	52	52	52	52	52	52	52	52	52
53	53	53	53	53	53	53	53	53	53
54	54	54	54	54	54	54	54	54	54
55	55	55	55	55	55	55	55	55	55
56	56	56	56	56	56	56	56	56	56
57	57	57	57	57	57	57	57	57	57
58	58	58	58	58	58	58	58	58	58
59	59	59	59	59	59	59	59	59	59
60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
61	61	61	61	61	61	61	61	61	61
62	62	62	62	62	62	62	62	62	62
63	63	63	63	63	63	63	63	63	63
64	64	64	64	64	64	64	64	64	64
65	65	65	65	65	65	65	65	65	65
66	66	66	66	66	66	66	66	66	66
67	67	67	67	67	67	67	67	67	67
68	68	68	68	68	68	68	68	68	68
69	69	69	69	69	69	69	69	69	69
70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
71	71	71	71	71	71	71	71	71	71
72	72	72	72	72	72	72	72	72	72
73	73	73	73	73	73	73	73	73	73
74	74	74	74	74	74	74	74	74	74
75	75	75	75	75	75	75	75	75	75
76	76	76	76	76	76	76	76	76	76
77	77	77	77	77	77	77	77	77	77
78	78	78	78	78	78	78	78	78	78
79	79	79	79	79	79	79	79	79	79
80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
81	81	81	81	81	81	81	81	81	81
82	82	82	82	82	82	82	82	82	82
83	83	83	83	83	83	83	83	83	83
84	84	84	84	84	84	84	84	84	84
85	85	85	85	85	85	85	85	85	85
86	86	86	86	86	86	86	86	86	86
87	87	87	87	87	87	87	87	87	87
88	88	88	88	88	88	88	88	88	88
89	89	89	89	89	89	89	89	89	89
90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
91	91	91	91	91	91	91	91	91	91
92	92	92	92	92	92	92	92	92	92
93	93	93	93	93	93	93	93	93	93
94	94	94	94	94	94	94	94	94	94
95	95	95	95	95	95	95	95	95	95
96	96	96	96	96	96	96	96	96	96
97	97	97	97	97	97	97	97	97	97
98	98	98	98	98	98	98	98	98	98
99	99	99	99	99	99	99	99	99	99
100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Bitte beachten: Die Angaben zu den verschiedenen Merkmalen sind nur als Orientierung zu verstehen und sind nicht verbindlich. Die Angaben zu den Merkmalen sind nur als Orientierung zu verstehen und sind nicht verbindlich.