

Whitepaper.

Impedanz- messungen bei CFK-Verbunden.

Inhalt

Impedanzmessungen bei CFK-Verbunden.

1. Hintergrund
2. Messaufbau und durchgeführte Messungen
3. Bestimmung von Permittivität und Leitfähigkeit
4. Fazit

1. Hintergrund

Faserverstärkte Kunststoffe, auch Faser-Kunststoff-Verbunde genannt, bestehen aus mindestens zwei Werkstoffen: der Matrix und der Verstärkungsfasern. In diesem Verbund werden die positiven Eigenschaften beider Komponenten kombiniert, häufig mit dem Ziel der Verbesserung der mechanischen Eigenschaften. Je nach Faserart können thermische und elektrische Eigenschaften in den Kunststoff und damit in ein Bauteil eingebracht werden. Die Nutzung von Kunststoffen mit elektrisch leitfähigen Füllstoffen wie Kohlenstofffasern (CFK) bietet hierbei zusätzliche Möglichkeiten im Bereich elektrischer Kontaktierung oder in Anwendungen zur Abschirmung elektromagnetischer Strahlung. Da solche Eigenschaften im Bauteil maßgeblich durch die leitfähigen Fasern bestimmt werden, haben Form, Lage, Füllstoffanteil und die Einstellungen des Herstellungsprozesses, etwa beim Spritzgießen, einen wesentlichen Einfluss hierauf. Die Vorhersage der Lage im Bauteil nach dem Spritzgießprozess ist hier besonders wichtig, setzt aber aufgrund der hohen Komplexität eine simulative Betrachtung voraus. Eine gute simulative Vorhersage benötigt wiederum realgetreue Materialmodelle. In dem Fall der Abschirmung elektromagnetische Strahlung sind Materialmodelle erforderlich, die Permittivität und Leitfähigkeit in einem breiten Frequenzbereich bis in den niedrigen GHz-Bereich berücksichtigen.

2. Messaufbau und durchgeführte Messungen

Bei den durchgeführten Untersuchungen wurden den Simulationsergebnissen reale Bauteiltests gegenübergestellt. Zur Bestimmung der komplexen Permittivität wurde das Impedanzmessgerät E4991B in Kombination mit dem 16453A Test-Fixture und der Material measurement Firmware E4991B-002 der Firma Keysight Santa Rosa, CA, USA verwendet [1].

Die Auswahl des Messgeräts erfolgte in fachlicher Abstimmung mit den Experten von dataTec anhand der vorliegenden Materialien sowie der definierten Messkriterien. Zur Vorbereitung der Messkampagne wurde ein Testgerät leihweise bereitgestellt und eine Einführung in die technischen Eigenschaften des Systems sowie in die Durchführung der Messungen durchgeführt. Der Aufbau des 16453A ist in Abb. 1 dargestellt. Die obere Elektrode verfügt über eine interne Feder, mit der ein MUT (Material unter Test) zwischen den Elektroden befestigt werden kann. Der ausgeübte Anpressdruck kann ebenfalls eingestellt werden und somit bei Mehrfachmessungen reproduziert werden, da ein variierender Druck das Messergebnis beeinflussen kann. Die Messungen können in einem Frequenzbereich als Sweep von 1 MHz bis 1 GHz durchgeführt werden.

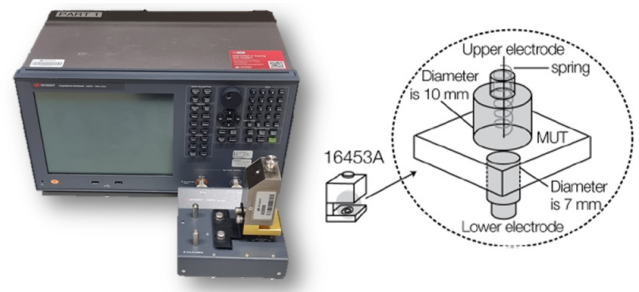


Abbildung 1: Mess-Setup des Impedanzmessgeräts E4991B in Kombination mit dem 16453A Test-Fixture links; schematische Darstellung der Test Fixture rechts [2].

Um den Einfluss der Randkapazität zu verringern, wird in der Firmware des E4991B, Option E4991B-002 (Materialmessung), eine auf Simulationsergebnissen basierende Korrekturfunktion verwendet. Zudem lässt sich die Restimpedanz, die eine Hauptursache für Messfehler darstellt, durch eine Unterbrechungs- und Kurzschlusskompensation nicht vollständig beseitigen. Aus diesem Grund wird eine PTFE-Kalibrierprobe zur Lastkompensation bereitgestellt [2].

Messbar sind laut Gerätespezifikationen Bauteile mit einer Materialdicke von bis zu ca. 3 mm. In diesem Fall wurden die Messungen an den in Abb. 2 dargestellten Proben (gepresst und spritzgegossen) durchgeführt, welche in einem Bereich von 2 mm bis 3,5 mm variierten. Es wurden hierbei je Probe vier Messungen an den dargestellten Messpunkten gemacht.

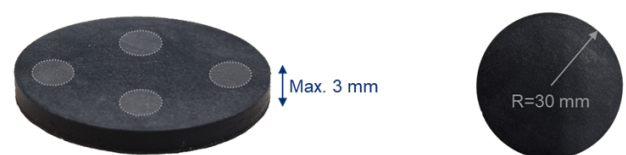


Abbildung 2: Mess-Setup des Impedanzmessgeräts.

Die durchgeführten Messungen, in diesem Fall handelt es sich um logarithmische Frequenzsweeps, wurden als .csv exportiert und automatisiert ausgewertet. Die Messungen werden von dem Messgerät hierbei bereits soweit vorbereitet, sodass diese direkt in den Komponenten der komplexen Permittivität exportiert und weiterverarbeitet werden können.

3. Bestimmung von Permittivität und Leitfähigkeit

Folgend ist das Messergebnis der komplexen Permittivität für Werkstoff 1 (MUT1) und Werkstoff 2 (MUT2) für variierende Kohlenstofffaser-Massenanteile bis maximal 30 M.-% vergleichend dargestellt. Die Faserlängen der untersuchten Werkstoffe variieren jeweils in einem Bereich von ca. 0,2 mm – 0,35 mm. Bei den vermessenen Proben handelt es sich in diesem Fall zunächst um gepresste Plättchen mit granulatförmigen Material, ohne eine durch Spritzgießen induzierte Vorzugsorientierung. Dies bedeutet, dass die Fasern in diesem Fall zufällig orientiert sind. Die Messung wurde mit jeweils vier Wiederholmessungen an verschiedenen Stellen der jeweiligen Probe durchgeführt, bei denen die Probe jeweils neu eingespannt wurde. Die Messungen repräsentieren in diesem Fall die Permittivität in Dickenrichtung der vermessenen Probe. Durch die Anisotropie der Fasern in den Proben bedeutet dies, dass die gemessenen Werte nicht auf die anderen Raumrichtungen übertragbar sein müssen.

In der folgenden Abbildung 4 ist die Permittivität für den ersten untersuchten Werkstoff (MUT1) in Abhängigkeit vom Füllgehalt abgebildet. Bei dem unverstärkten Material 1 (MUT1) ergibt sich eine relative Permittivität von $\epsilon_r \approx 2,2$, was sich im typischen Bereich von thermoplastischen Kunststoffen wie z. B. PP oder PE befindet. (Als Vergleich: Die zur Kalibrierung des Messaufbaus beigelegte PTFE-Probe besitzt einen Kalibrierwert von $\epsilon_r \approx 2,1 - 2,2$).

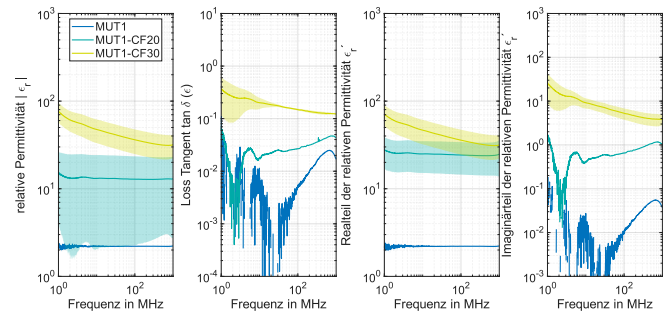


Abbildung 4: Impedanzmessung zur Bestimmung der Permittivität für MUT1 mit variierendem Fasergehalt.

Aufgrund des steigenden Kohlenstofffaseranteils steigt die relative Permittivität an, was auf die hohe elektr. Leitfähigkeit der Kohlenstofffasern zurückzuführen ist. Die hinzugefügten Kohlenstofffasern (CF) haben bei der komplexen Permittivität sowohl auf den Realteil (Speicherung) als auch den Imaginärteil (Verlust) einen Einfluss. Der Realteil steigt an, weil CF die Polarisierbarkeit des Verbunds erhöht. Der Anstieg ist oft nicht linear, sondern hängt stark von Fasergehalt, Orientierung, Frequenz und Porosität des Verbunds ab. Der Imaginärteil wächst mit einem höheren Fasergehalt stärker als der Realteil, weil mit mehr CF mehr Verluste auftreten: Polarisation, Dipolverluste und bei höheren CF-Gehalten auch verstärkte leitfähige Verluste. In HF-Messungen zeigt sich das auch im steigenden Verlustfaktor $\tan \delta$. Diese Effekte sind auch bei den durchgeführten Messungen erkennbar.

Das gleiche Bild ergibt sich, wenn man die Messungen mit einem weiteren kohlenstofffaserverstärkten Material (MUT2) von 10 M.-% bis 30 M.-% (siehe Abbildung 5) durchführt. Die Messungen zeigen bei MUT2 bei gleichem Fasergehalt höhere Werte in der Permittivität als MUT1. Dies lässt darauf schließen, dass in diesem Fall nicht nur der Fasergehalt, sondern auch die Kombination mit dem Matrixwerkstoff, die Orientierung und die Länge der Fasern einen Einfluss hat. Trotz der Unterschiede bei dem Vergleich expliziter Fasergehalte zwischen den zwei untersuchten Werkstoffen, zeigt sich jedoch auch bei beiden jeweils ein vergleichbarer Trend bei einem Anstieg des Fasergehalts.

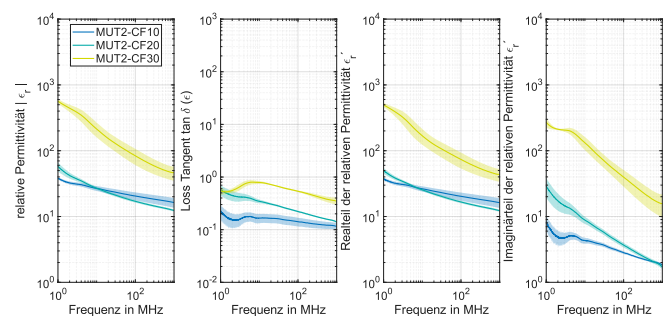


Abbildung 5: Impedanzmessung zur Bestimmung der Permittivität für MUT2 mit variierendem Fasergehalt.

Aus dem Imaginärteil der komplexen Permittivität kann im Anschluss die komplexe elektrische Leitfähigkeit berechnet werden. In Abbildung 6 ist hierbei der Realteil der komplexen elektrischen Leitfähigkeit dargestellt, welcher anschließend für die Modellierung der Werkstoffe in der Simulation verwendet werden kann.

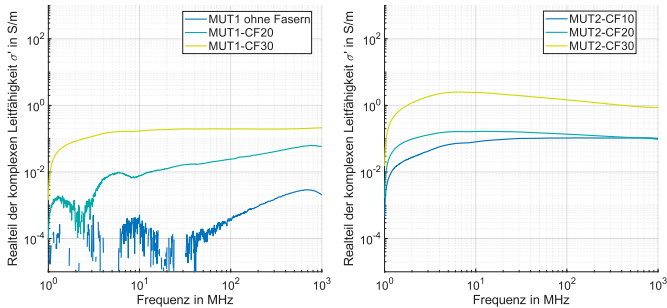


Abbildung 6: Berechnete Leitfähigkeit für MUT1 (links) und MUT2 (rechts).

Auf der linken Seite ist ersichtlich, dass für MUT1 ohne Fasern – wie erwartet – eine nur sehr geringe elektrische Leitfähigkeit messbar ist. Dies ändert sich dann mit einem steigenden Fasergehalt, welcher dementsprechend zu einem Anstieg in der elektrischen Leitfähigkeit führt. Vor allem im Bereich der hohen Frequenzen (>10 MHz) und bei einem hohen Füllstoffgehalt (>30 M.-%) ist dieser über einen breiten Frequenzbereich weitestgehend konstant.

Da die Orientierung der Fasern einen maßgeblichen Einfluss auf die Leitfähigkeit in die jeweilige Raumrichtung besitzt, wurden zusätzlich spritzgegossene Proben mit unterschiedlichen Wanddicken untersucht. Beim Spritzgießen wird die Orientierung der Fasern durch das Strömungsprofil während des Einspritzens ausgerichtet. Im Vergleich dazu ist die Orientierung in Dickenrichtung jedoch sehr gering. Vorangegangene Computertomografie-Messungen haben jedoch gezeigt, dass eine höhere Wanddicke grundsätzlich zu einer etwas erhöhten Orientierung der Fasern in Dickenrichtung führt. Die Faserorientierung beeinflusst die gemessenen Impedanzwerte deutlich; die elektrische Antwort ist entlang der Fasern anders als quer dazu. Wenn die Fasern überwiegend parallel zum elektrischen Feld oder zur Feldausbreitungsrichtung liegen, steigt die effektive Polarisation meist stärker an, wodurch sich die Impedanz anders verschiebt als bei quer orientierten Fasern. Es wurde aus diesem Grund auch untersucht, ob dies auch zu einer Erhöhung der Leitfähigkeit in Dickenrichtung führt, welche mit dem genutzten Mess-Setup abgebildet werden kann. In Abbildung 7 ist auf der linken Seite vergleichend die Messung mit den Wanddicken 2 mm und 3,5 mm bei 10 M.-% Fasergehalt und rechts bei 20 M.-% Fasergehalt dargestellt.

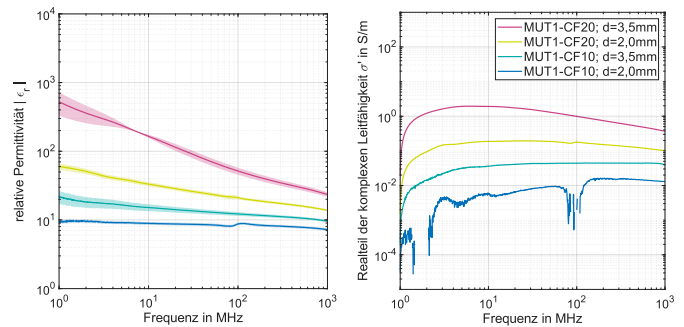


Abbildung 7: Gemessene relative Permittivität für MUT1 (links) und berechnete Leitfähigkeit (rechts).

Da bei diesen Proben generell sehr wenige Fasern in Dickenrichtung orientiert vorliegen, fallen die berechneten Leitfähigkeiten generell deutlich niedriger aus als bei zufällig orientierten Fasern. Jedoch erkennt man auch in den abgebildeten Messkurven, dass auch hier eine größere Wanddicke zu einem Anstieg der gemessenen Leitfähigkeit führt, was sich auf die erhöhte Orientierung zurückführen lässt, welche bei vorangegangenen Faserorientierungsbestimmungen bestätigt werden konnten.

4. Fazit

Die Messungen haben gezeigt, dass mit dem dargestellten Messverfahren die Messung der komplexen Permittivität und die anschließende Berechnung der komplexen Leitfähigkeit für Faser-Kunststoff-Verbunde mit variablem Kohlenstofffaseranteil möglich ist. Die Variation des Fasergehalts liefert mit höheren Leitfähigkeiten bei steigendem Fasergehalt zudem plausible Ergebnisse im gesamten Messbereich.

Hier hat sich zudem ebenfalls gezeigt, dass bereits geringe Unterschiede in der elektrischen Leitfähigkeit, beispielsweise durch variierende Orientierungen der Fasern, messbar sind.

Weiterführende Literatur:

[1] KEYSIGHT TECHNOLOGIES. E4991B Impedance Analyzer - Brochure [online], 2018 [Zugriff am: 2. Juni 2026]. Verfügbar unter: <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-04258/brochures/5991-3892.pdf>

[2] KEYSIGHT TECHNOLOGIES. Solutions for Measuring Permittivity and Permeability with LCR Meters and Impedance Analyzers [online], 2024 [Zugriff am: 2. Juni 2026]. Verfügbar unter: <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-06683/application-notes/5980-2862.pdf>

Zum Autor:

Philip Reitinger: Philip Reitinger ist seit 2019 Mitarbeiter am Institut für Kunststofftechnik (IKT) der Universität Stuttgart im Bereich der Verarbeitungstechnik. Er beschäftigt sich hauptsächlich mit der simulativen Auslegung und Optimierung von Kunststoffbauteilen und Herstellungsprozessen. Ein Schwerpunkt seiner Arbeit liegt hierbei auf der Anwendung faserverstärkter Kunststoffe beim Spritzgießen und der Modellierung des Materialverhaltens in der Simulation.

Institut für Kunststofftechnik

Pfaffenwaldring 32
70569 Stuttgart
Raum: 2.10

Telefon +49 711 685 62800
Telefax +49 711 685 62066
E-Mail sekretariat@ikt.uni-stuttgart.de

www.ikt.uni-stuttgart.de

dataTec AG

Ferdinand-Lassalle-Str. 52
72770 Reutlingen

Telefon +497121 / 51 50 50
Telefax +497121 / 51 50 10
E-Mail info@datatec.eu

www.datatec.eu