

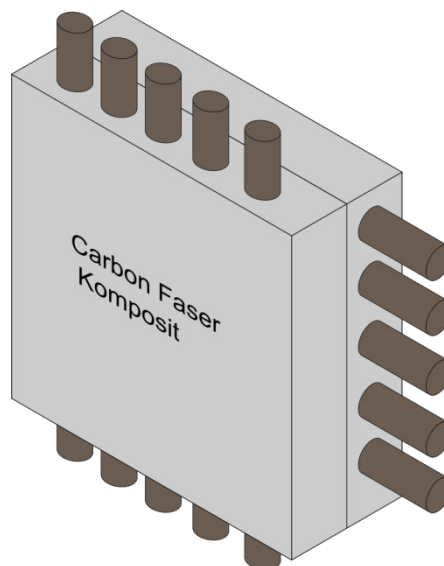
# Numerische Simulation der Schirmwirkung von mehrlagigen, anisotrop leitfähigen Materialien

Dipl.-Ing. Fabian Happ,  
Dr.-Ing. Heinz-D. Brüns,  
Prof. Dr. rer. nat. habil. Frank Gronwald,  
Technische Universität Hamburg-Harburg, Institut für Theoretische Elektrotechnik

## 1 Einleitung

In vielen Hochtechnologiebereichen, wie beispielsweise der Luft- und Raumfahrtindustrie, werden vermehrt Carbonfaser-Kompositwerkstoffe (CFK) verwendet. Diese sind bedeutend leichter als Metall, verfügen über verbesserte mechanische Eigenschaften, gehen aber mit verschlechterten EMV-Eigenschaften bezogen auf Schirmwirkung und elektrische Anbindung einher.

Eine für die EMV komplexer Systeme wichtige Aufgabenstellung ist daher die Modellierung elektromagnetischer Eigenschaften, wie z.B. der Schirmwirkung oder der Streueigenschaften eines Systems, in dem einige oder alle Metallkomponenten durch CFK-Komponenten ersetzt wurden. CFK besteht aus mehreren Schichten von Carbonfasern, die gegeneinander verdreht und in Kunstharz eingeschlossen sind. Im Gegensatz zu Metall, das eine isotrope, d.h. richtungsunabhängige, Leitfähigkeit besitzt, ist jede Schicht von Carbonfasern durch eine anisotrope Leitfähigkeit charakterisiert. Daher werden für die EMV-Analyse Verfahren benötigt, welche es ermöglichen, mehrlagige und anisotrop leitfähige Schichten zu behandeln.



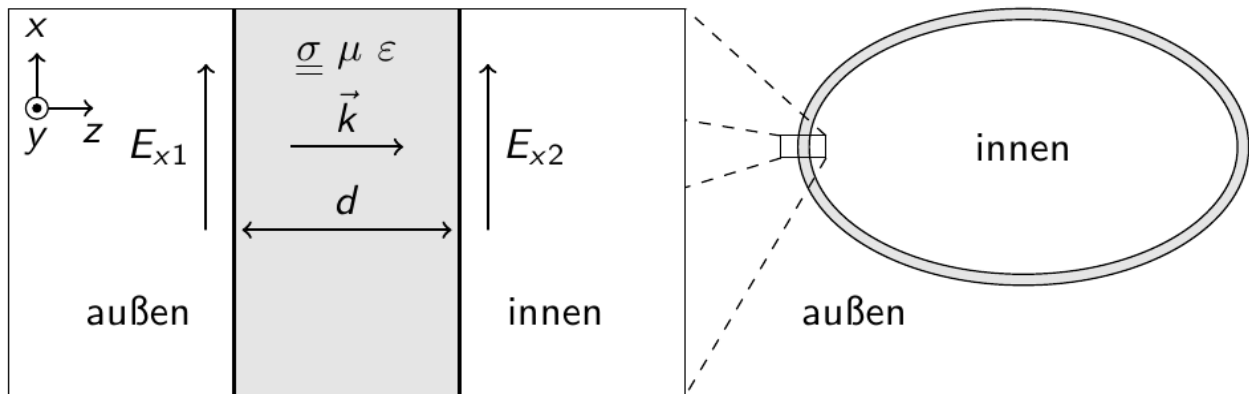
**Abbildung 1:** Dargestellt ist ein Modell für ein CFK mit zwei Schichten. Die Orientierung der Fasern der zweiten Schicht ist um  $90^\circ$  gegenüber der ersten Schicht verdreht.

In dieser Arbeit wird ein effizientes Verfahren vorgestellt, mit dem die Streu- und Schirmungseigenschaften von anisotropen Schichten bestimmt werden können. Das Verfahren basiert auf der Momentenmethode [1] und erweitert einen bekannten Doppelstromansatz für dielektrische Körper, der bisher die Behandlung dünner, isotrop leitfähiger Schichten ermöglicht [2]. Als Ergebnis resultiert ein Verfahren, das eine analytische Lösung für die elektrische und magnetische Feldstärke innerhalb von anisotropen Schichten als Randbedingung in der Momentenmethode verwendet. Dieses Verfahren ermöglicht es, die elektromagnetischen Felder in der Umgebung und im Innenraum eines Körpers zu simulieren, dessen Oberfläche aus mehreren Lagen von anisotrop leitfähigen Material besteht. Der zusätzliche Rechenaufwand, der im Vergleich zur Simulation eines unbeschichteten, dielektrischen Körpers entsteht, ist minimal. Zur Verifikation des vorgestellten neuen Verfahrens wird anhand einer Beispielanordnung gezeigt, welchen Einfluss die Parameter Leitfähig-

keit, Schichtdicke und Versatzwinkel der Schichten auf die Schirmwirkung haben. Die erhaltenen Ergebnisse werden mit denen von Feldberechnungsprogrammen validiert, die auf der Finiten Integrationstechnik (FIT) [3] bzw. der Finiten-Elemente-Methode (FEM) [4] basieren.

## 2 Vorstellung des numerischen Verfahrens für mehrlagige, anisotrop leitfähige Materialien

In dem hier vorgestellten Verfahren wird eine Koppelmatrix verwendet, welche die Interaktion zwischen den tangentialen Feldern im Außen- und Innenraum analytisch beschreibt. Diese Koppelmatrix wird innerhalb der Momentenmethode als Randbedingung verwendet.



**Abbildung 2:** Diese Abbildung zeigt einen Körper, dessen Rand durch eine endlich dünne, anisotrop leitfähige Schicht gebildet wird.

### 2.1 Koppelmatrix

Für die Herleitung der Koppelmatrix werden zwei Annahmen getroffen. Die erste Annahme ist, dass jede Schicht gut leitfähig ist. Die zweite Annahme ist, dass sich jede Schicht, in einem geeigneten lokalen Koordinatensystem, durch einen diagonalen Leitfähigkeitstensor beschreiben lässt. Die erste Annahme führt dazu, dass in der anisotropen Schicht die Wellenausbreitung nahezu senkrecht zur Oberfläche verläuft. Mit der zweiten Annahme kann das Feld in der Schicht in zwei unabhängige Moden zerlegt werden.

Auf diese Weise ist es möglich, für jede Schicht eine analytische Lösung in Form einer Kettenmatrix zu erhalten. Um ein Material aus mehreren Schichten zu beschreiben, werden einfach die Koppelmatrizen der einzelnen Schichten miteinander multipliziert. Somit lässt sich der folgende Ausdruck:

$$\begin{pmatrix} \vec{E}_1 \\ \vec{H}_1 \end{pmatrix}_{tan} = [\mathbf{M}] \begin{pmatrix} \vec{E}_2 \\ \vec{H}_2 \end{pmatrix}_{tan} = \begin{pmatrix} \vec{f}_E(\vec{E}_2, \vec{H}_2) \\ \vec{f}_H(\vec{E}_2, \vec{H}_2) \end{pmatrix} \quad (1)$$

für die gesamte Koppelmatrix schreiben [5], [6]. Dabei ist  $[\mathbf{M}]$  eine 4 x 4 Matrix und die Indizes 1 und 2 bezeichnen den Außen- bzw. den Innenraum. Die linearen Funktionen

$\vec{f}_E$  und  $\vec{f}_H$  sind eine Kurzschreibweise für die Multiplikation der oberen bzw. unteren beiden Zeilen der Matrix  $[\mathbf{M}]$  mit dem Vektor, der die tangentialen Komponenten der elektrischen und magnetischen Feldstärke des Innenraums enthält.

## 2.2 Verwendung der Koppelmatrix in der MoM

Nun wird auf den Oberflächenelementen der anisotropen Schicht diese Bedingung (1) gefordert und das Testverfahren der Momentenmethode [1] angewendet:

$$\langle \vec{t}, \vec{E}_1 \rangle = \langle \vec{t}, \vec{f}_E(\vec{E}_2, \vec{H}_2) \rangle \quad (2)$$

$$\langle \vec{t}, \vec{n} \times \vec{H}_1 \rangle = \langle \vec{t}, \vec{n} \times \vec{f}_H(\vec{E}_2, \vec{H}_2) \rangle. \quad (3)$$

Dabei ist  $\vec{t}$  die jeweilige Testfunktion entlang der Oberfläche und  $\vec{n}$  der nach außen zeigende Normalenvektor der Oberfläche. Das innere Produkt ist hier als Oberflächenintegral über die Fläche der beiden zur Testfunktion gehörenden Oberflächenelemente definiert:

$$\langle \vec{t}, \vec{E}_1 \rangle = \iint \vec{t}(r) \cdot \vec{E}_1(r) dA. \quad (4)$$

Auf diese Weise werden die Einträge der Systemmatrix und der rechten Seite des linearen Gleichungssystems erzeugt, dessen Lösung die Oberflächenstromdichte liefert. Mit der bekannten Oberflächenstromdichte können nachfolgend die Feldstärken des elektrischen und magnetischen Feldes in jedem Raumpunkt bestimmt werden.

## 3 Anwendungsbeispiel

Das vorgestellte Verfahren wird in diesem Abschnitt auf die im Folgenden beschriebene Beispielanordnung angewendet, um den Einfluss der Schichtdicke und der Leitfähigkeit zu untersuchen. Außerdem wird bei einer Anordnung mit zwei Schichten die Orientierung der Fasern der zweiten Schicht gegenüber der ersten Schicht verdreht. Die Auswirkung der verschiedenen Parameter auf die Schirmwirkung der Anordnung wird dargestellt. An einzelnen Simulationsergebnissen wird eine Validierung mittels volumendiskretisierender Feldrechenprogramme vorgenommen.

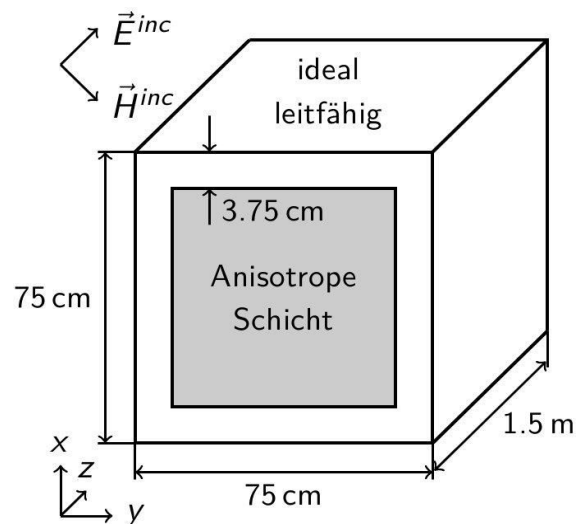


Abbildung 3: Illustration der Beispielanordnung

### 3.1 Beschreibung der Beispielanordnung

Bei der Beispielanordnung handelt es sich um einen Quader, dessen Oberfläche ideal leitfähig ist. In dieser ideal leitfähigen Oberfläche befindet sich eine quadratische Öffnung. Dort ist, für unsere Betrachtungen, ein ein- oder zweilagiges anisotrop leitfähiges Material eingefügt (**Abbildung 3**). Diese Anordnung wird durch eine ebene Welle im

Frequenzbereich zwischen 1 MHz und 300 MHz angeregt. Die x- und y-Komponente des Polarisationsvektors des elektrischen Feldes sind gleich groß und betragen 1 V/m. Aus Symmetriegründen folgt, dass bei einer isotrop leitfähigen Schicht die resultierende elektrische Feldstärke in x- und y-Richtung den gleichen Wert ergeben muss.

### 3.2 Simulationsbeispiele für Einzelschichten

Das beschriebene Verfahren wurde in ein bestehendes Programmpaket implementiert [7] und wird hier zunächst für die Simulation einer Anordnung mit einer Schicht CFK verwendet. Die Schirmwirkung (Shielding Efficiency, SE) wird hier getrennt für zwei Richtungen betrachtet:

$$SE_x = 20 \log \left( \frac{|E_x^{inc}(\vec{p})|}{|E_x(\vec{p})|} \right) \quad SE_y = 20 \log \left( \frac{|E_y^{inc}(\vec{p})|}{|E_y(\vec{p})|} \right). \quad (5)$$

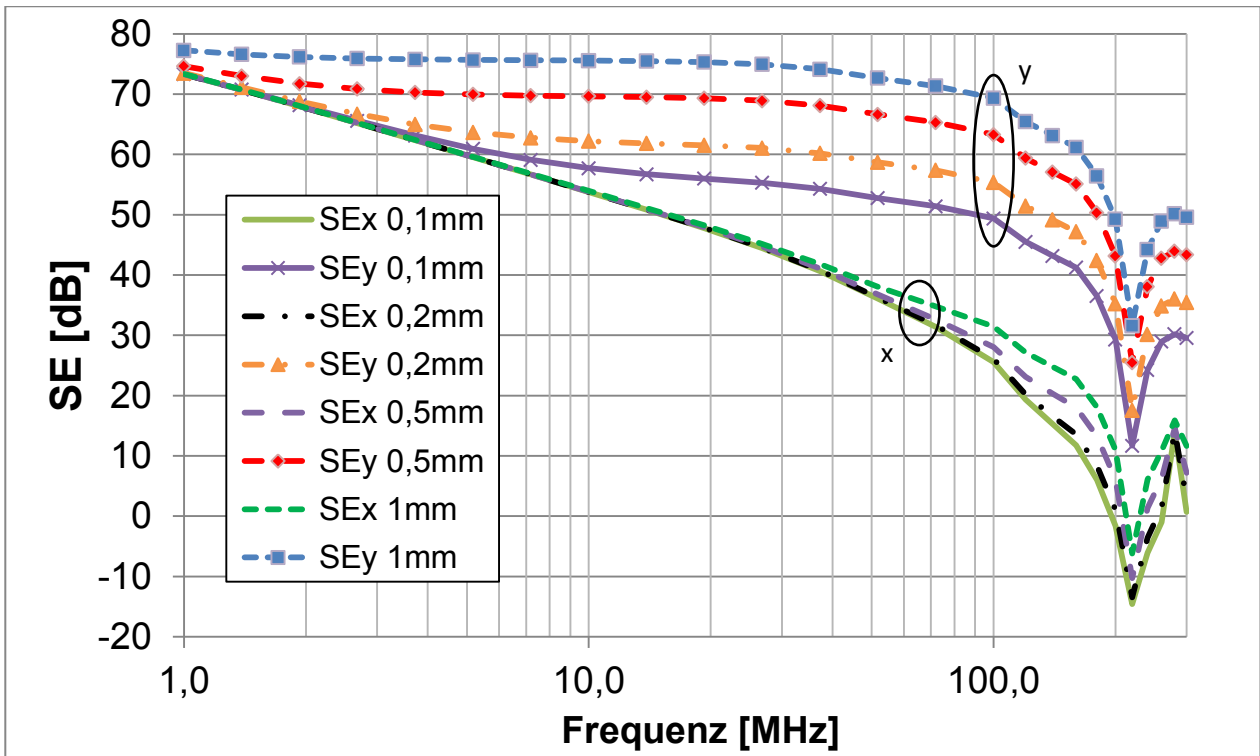
Dabei bezeichnet  $E_x^{inc}$  die x-Komponente der einfallenden elektrischen Feldstärke ohne den Schirm und  $E_x$  ist die Feldstärke in Anwesenheit des Schirms. Der Aufpunkt  $\vec{p}$  wurde hier als der Mittelpunkt der Beispielanordnung mit den Koordinaten (37,5; 37,5; 75) cm gewählt. Die linke untere Ecke des Quaders nach **Abbildung 3** befindet sich bei (0;0;0).

#### 3.2.1 Einfluss der Schichtdicke

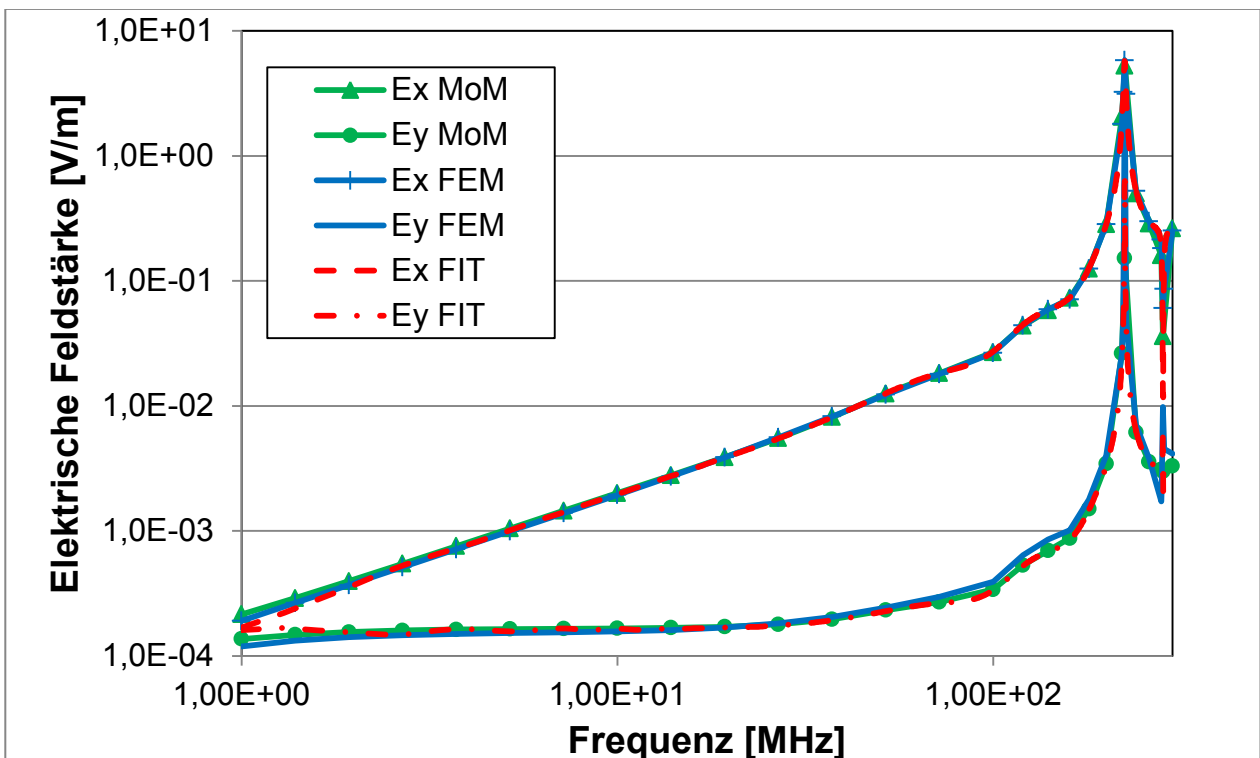
Die elektrische Leitfähigkeit beträgt in diesem Beispiel  $\sigma_x = 10 \text{ S/m}$ ,  $\sigma_y = 1000 \text{ S/m}$ . Die Dicke der Schicht wird in den Grenzen von 0,1 mm bis 1 mm verändert. Da von einer Wellenausbreitung in z-Richtung ausgegangen wird gibt es innerhalb der Schicht keine Feldkomponenten in z-Richtung. Aus diesem Grund hat die Leitfähigkeitskomponente  $\sigma_z$  keine Bedeutung.

Die Ergebnisse der Simulationen sind in **Abbildung 4** zusammengefasst. Wie erwartet ist zu sehen, dass die Schirmwirkung mit steigender Schichtdicke zunimmt. Bei einer Frequenz von 224 MHz haben alle Kurven ein Minimum. Diese Frequenz entspricht der ersten Resonanzfrequenz der Anordnung und es kommt dadurch zu Feldstärkeüberhöhungen im Innenraum. Es handelt sich bei dieser Resonanzfrequenz um die TE<sub>101</sub>-Mode und der Aufpunkt befindet sich genau in einem Feldstärkemaximum.

**Abbildung 5** vergleicht für dieses Beispiel die Feldstärken im Innenraum, die mit dem hier vorgestellten MoM-Verfahren bzw. mit auf FEM oder FIT basierten Feldrechenprogrammen bestimmt wurden, miteinander. Die Resonanzen treten jeweils bei den gleichen Frequenzen auf und auch im übrigen Frequenzbereich ist eine gute Übereinstimmung der Kurven zu erkennen.



**Abbildung 4:** Dargestellt ist die Schirmwirkung in x- und y-Richtung in Abhängigkeit von der Frequenz für unterschiedliche Materialstärken, berechnet mit der vorgestellten MoM-basierten Methode. Die Leitfähigkeiten betragen hier  $\sigma_x = 10 S/m$  und  $\sigma_y = 1000 S/m$ .

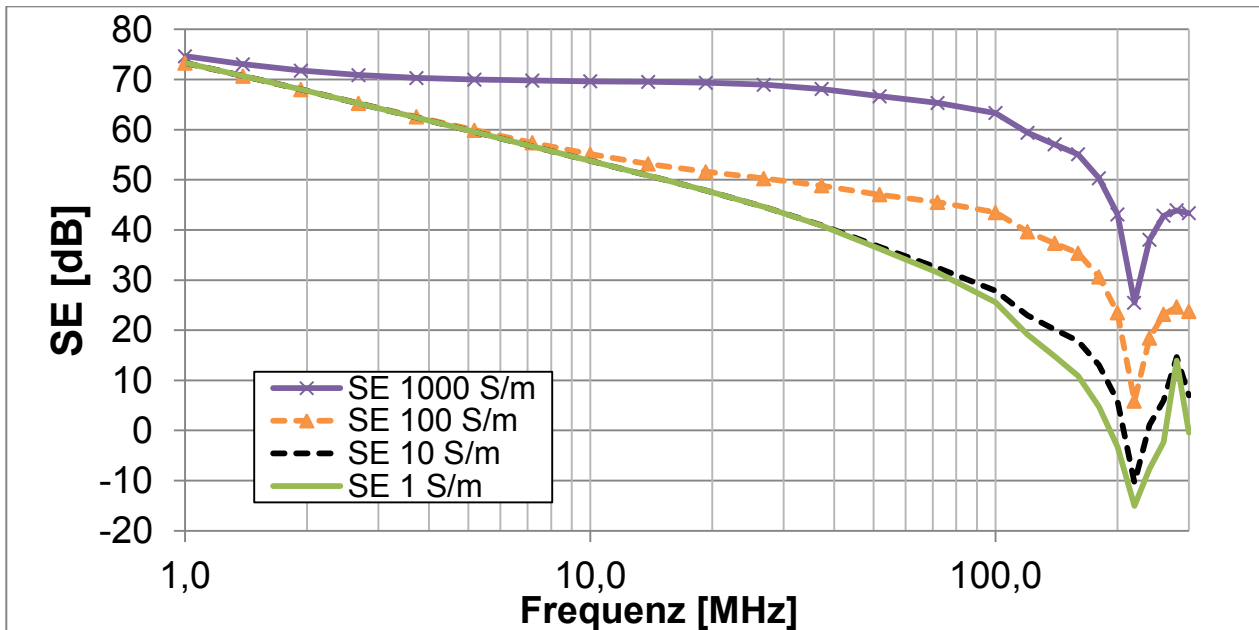


**Abbildung 5:** Validierung der berechneten elektrischen Feldstärke im Innenraum mit den alternativen Verfahren FEM [4] und FIT [3]. Die Schichtdicke beträgt hier 1 mm und die Leitfähigkeiten haben die Werte  $\sigma_x = 10 S/m$  und  $\sigma_y = 1000 S/m$ .

### 3.2.2 Einfluss der Leitfähigkeit

Die Schichtdicke ist bei diesem zweiten Beispiel konstant 0,5 mm. Es werden unterschiedliche Leitfähigkeiten untersucht.

Die Schirmwirkung der Beispielanordnung in **Abbildung 2** ist in **Abbildung 6**, für unterschiedliche Leitfähigkeiten der anisotropen Schicht, dargestellt. Da eine höhere Leitfähigkeit zu einer höheren Absorption innerhalb des Schirmmaterials führt, kann durch Erhöhung der Leitfähigkeit die Schirmwirkung stark verbessert werden.



**Abbildung 6:** In diesem Diagramm wird der Einfluss der Leitfähigkeit auf die Schirmwirkung veranschaulicht. Die Schicht ist in diesem Fall 0,5 mm dick.

### 3.3 Simulationsbeispiele für Zweifachschichten

In diesem Beispiel wird ein Material aus zwei Schichten betrachtet. Jede Schicht hat die Dicke 0,5mm und die Leitfähigkeiten  $\sigma_x = 10 \text{ S/m}$  und  $\sigma_y = 1000 \text{ S/m}$ . Nun wird die Orientierung der Fasern und damit die Leitfähigkeit der zweiten Schicht im mathematisch positiven Sinn um die z-Achse gedreht.

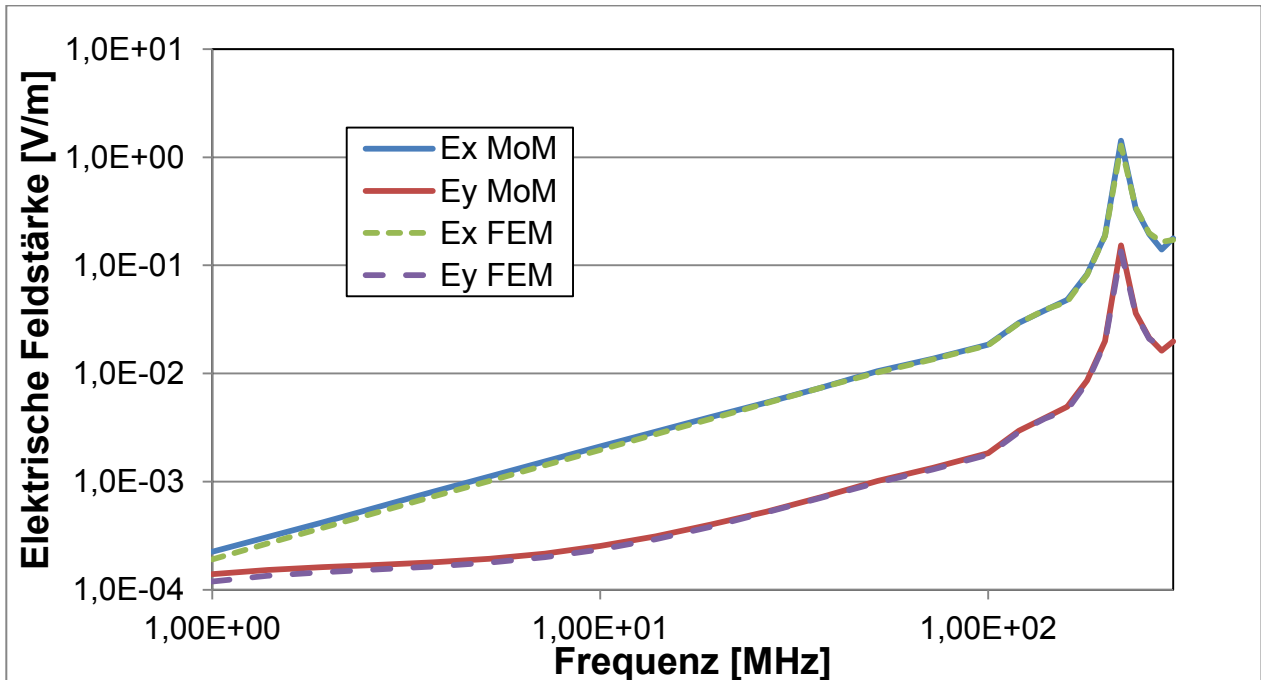
Die Resultate in **Abbildung 7** zeigen, welchen Einfluss der Verdrehwinkel auf die Schirmwirkung hat. Bei einem Winkel von  $0^\circ$  ist die Schirmwirkung in y-Richtung am größten und die in x-Richtung am geringsten. Wird nun der Winkel vergrößert, erhöht sich auch die Schirmwirkung in x-Richtung, aber die Schirmwirkung in y-Richtung sinkt.

Eine einfallende Welle nimmt für jede Richtung eine effektive Leitfähigkeit wahr. Diese effektive Leitfähigkeit ist dann am größten, wenn die Fasern der beiden Schichten in die gleiche Richtung ausgerichtet sind. Bei einem Versatzwinkel von  $90^\circ$  ist sowohl eine Schicht mit Fasern in x- als auch eine Schicht mit Fasern in y-Richtungen vorhanden.

Darum ist die effektive Leitfähigkeit in beiden Richtungen gleich und die Kurven für die Schirmwirkung in x- und y-Richtung liegen übereinander.



**Abbildung 7:** Die Schirmwirkung der Beispielanordnung mit zwei Schichten von Carbon-Fasern ist hier dargestellt. Die Orientierung der Fasern der zweiten Schicht wurde dabei zwischen 0° und 90° gegenüber der Orientierung der Fasern der ersten Schicht verdreht.



**Abbildung 8:** Berechnung der elektrischen Feldstärke im Innenraum für die Anordnung mit zwei Schichten, bei der die Orientierung der Fasern der zweiten Schicht um 10° gegenüber der ersten Schicht gedreht ist.

In **Abbildung 8** sind die Komponenten der elektrischen Feldstärke dargestellt, die mit dem hier vorgestellten MoM-Verfahren bzw. mittels FEM errechnet wurden. Es ist eine sehr gute Übereinstimmung der Ergebnisse für die elektrische Feldstärke zu erkennen.

## 4 Zusammenfassung

Es wurde ein Verfahren vorgestellt, welches es ermöglicht, ein Material aus mehreren Lagen von anisotrop leitfähigen Schichten mit der Momentenmethode numerisch zu modellieren. Dieses Verfahren kann unter anderem dazu eingesetzt werden, um die elektromagnetischen Felder in der Umgebung von CFK-Strukturen zu simulieren.

Weiterhin wurde eine Beispielanordnung betrachtet, um das vorgestellte Verfahren zu validieren und um einige prinzipielle Aussagen treffen zu können. Wie zu erwarten, führt eine Verringerung der Schichtdicke oder der Leitfähigkeit zu einer Verschlechterung der Schirmwirkung.

Um einen möglichst guten Schirm aus CFK herzustellen, sollte die Orientierung der Fasern der verschiedenen Schichten so gewählt werden, dass eine möglichst isotrope Schirmwirkung entsteht. Ansonsten wäre die erzielte Schirmwirkung sehr stark von der Polarisation des einfallenden Feldes abhängig.

Für ein Material aus mehreren Schichten mit unterschiedlicher Faser-Orientierung besteht Grund zu der Annahme, dass sich das Verbundmaterial in einem breiten Frequenzbereich durch eine effektive, isotrope Leitfähigkeit beschreiben lässt.

## 5 Literaturverzeichnis

- [1] R. F. Harrington, *Field Computation by Moment Methods*, Piscataway, NJ: Wiley-IEEE Press, 1993.
- [2] G. Bürger, H.-D. Brüns and H. Singer, "Simulation of thin layers in the method of moments," in *International Zurich Symposium on EMC*, Zurich, Switzerland, 1995.
- [3] CST, „Microwave Studio 2011,“ [www.cst.com](http://www.cst.com).
- [4] ANSYS, „HFSS 14.0,“ [www.ansys.com](http://www.ansys.com).
- [5] M. Sarto, „A matrix surface impedance formulation for the analysis of EM-interactions to finite laminated composite slabs,“ in *IEEE International Symposium on EMC*, Santa Clara, California, USA, 1996.
- [6] F. Happ, A. Schröder, H.-D. Brüns and F. Gronwald, "A method for the calculation of electromagnetic fields in the presence of thin anisotropic conductive layers using the method of moments," in *IEEE EMC Europe*, Bruges, Belgium, 2013.
- [7] Technische Universität Hamburg-Harburg, „CONCEPT-II,“ [www.tet.tu-harburg.de/concept/](http://www.tet.tu-harburg.de/concept/).