

Hochfrequenz-Wirbelstromprüfung an kohlenstoffaserverstärkten Kunststoffen – von der Theorie zur Anwendung

Sebastian Joas¹, Marc Kreuzbruck¹

¹ Institut für Kunststofftechnik, Universität Stuttgart

KURZFASSUNG | Obwohl das Wirbelstromverfahren bereits seit vielen Jahren für die Prüfung von kohlenstoffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) eingesetzt wird, sind die grundlegenden physikalischen Effekte aufgrund der komplexen Eigenschaften von CFK nicht abschließend geklärt. Im Bereich der Wirbelstromprüfung sind wir gewohnt, dass nur die elektrische Leitfähigkeit σ von Bedeutung ist. Die durch den technischen Fortschritt ermöglichten höheren Prüffrequenzen rufen aber auch Verschiebungsströme im Matrixwerkstoff hervor, die für die Charakterisierung permittivitätsassoziierter Fehlstellen genutzt werden können. Kapazitive Wechselwirkungen der Fasern verstärken auftretende Verschiebestrome dabei weiter und es resultiert ein chaotisches elektrisches Netzwerk im Bauteilinneren. Im Rahmen dieser Veröffentlichung sollen die grundlegenden physikalischen Effekte ausgehend von den Maxwell-Gleichungen sowohl analytisch als auch mittels FEM untersucht werden. Dies soll eine realitätsnahe Modellierung von CFK für die Simulation der Hochfrequenz (HF)-Wirbelstromprüfung ermöglichen. Abschließend wird das Potenzial des Wirbelstromverfahrens für die CFK-Prüfung anhand der Detektion realitätsnaher Fehlstellen demonstriert.

Einleitung

Das Wirbelstromverfahren zählt seit Jahrzehnten als äußerst zuverlässiges, abgesichertes und auch wirtschaftliches Oberflächenprüfverfahren, das nach dem Stand der Technik aber auf die Charakterisierung elektrisch leitfähiger Werkstoffe beschränkt ist [1]. Dieses wird industriell zu Mess- und Prüfzwecken bis hin zur Serienfertigung eingesetzt und bietet ein hohes Potenzial als Qualitätssicherungsverfahren für die Produktion der Zukunft. Insbesondere für künftige Mobilitätslösungen spielt die Entwicklung neuer Werkstoffe zur Gewichtsreduktion des Gesamtsystems eine entscheidende Rolle. Oft sind jedoch reine Werkstoffe, wie beispielsweise Kunststoffe, Metalle oder Keramiken durch ihre definierten Eigenschaftsspektren nicht optimal für die jeweilige Anwendung geeignet. Verbundwerkstoffe, wie beispielsweise CFK, ermöglichen ein Maßschneiden der Werkstoffeigenschaften an die jeweilige Anwendung. Gleichzeitig stellt CFK aufgrund des komplexen Eigenschaftsprofils die Verfahren der ZfP aber vor immense Herausforderungen. So existieren im Bereich der Wirbelstromprüfung an CFK zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten, allerdings sind die grundlegenden physikalischen Mechanismen äußerst komplex und bislang nicht abschließend geklärt. Insbesondere die bei höheren Prüffrequenzen von vielen MHz auftretenden Verschiebestrome im Matrixwerkstoff oder kapazitive Effekte zwischen den elektrisch leitfähigen Fasern scheinen nicht mehr vernachlässigbar zu sein.

Im Rahmen dieser Veröffentlichung sollen die grundsätzlichen Phänomene ausgehend von den Maxwell-Gleichungen sowohl analytisch als auch mittels FEM-Simulationen näher betrachtet werden. Dies umfasst die mathematische Herleitung der Standardeindringtiefe unter Berücksichtigung der Permittivität, sowie deren numerische Validierung. Weiterhin wird ausgehend von einer Betrachtung der Faser-Matrix-Ebene eine Möglichkeit zur realitätsnahen Simulation von Laminaten dargestellt.

Abschließend wird das Potenzial des eingesetzten Prüfsystems anhand von Prüfkörpern mit Referenzdefekten dargestellt.

Theoretische Betrachtung der HF-Wirbelstromprüfung

Im Bereich der konventionellen Wirbelstromprüfung wird meist der Einfluss der Permittivität auf das Prüfergebnis vernachlässigt. Es ist allgemein anerkannt, dass die Standardeindringtiefe δ von der

Frequenz f , der magnetischen Permeabilität μ und der elektrischen Leitfähigkeit σ abhängig ist:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (1)$$

Für die Herleitung des Skin-Effekts wird dabei $\frac{\partial D}{\partial t} = 0$ vorausgesetzt und somit der Verschiebungsstrom vernachlässigt. Im Folgenden soll, analog zur Herleitung des Skin-Effekts [2,3], ein Ausdruck zur Berechnung der Standardeindringtiefe unter dessen Berücksichtigung ermittelt werden. Dies ermöglicht sowohl eine Einordnung der Bedeutung der Permittivität in hohen Frequenzbereichen, als auch eine kritische Beurteilung der darauf aufbauenden Simulationen. Nach Maxwell gilt der nachfolgende Zusammenhang zwischen Magnetfeld \mathbf{H} , den zeitlich veränderlichen elektrischen Strömen \mathbf{J} , der elektrischen Flussdichte \mathbf{D} und dem elektrischen Feld \mathbf{E} [2]:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + j\omega \mathbf{D} = \sigma \mathbf{E} + j\omega \epsilon \mathbf{E} = \mathbf{E} \cdot (\sigma + j\omega \epsilon), \quad (2)$$

wobei ω die Kreisfrequenz darstellt. Aufgrund von $\mathbf{E} = \frac{\mathbf{J}}{\sigma}$ und $\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu}$ folgt:

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mathbf{J} \left(\mu + j \cdot \frac{\omega \epsilon \mu}{\sigma} \right). \quad (3)$$

Im Folgenden wird angenommen, dass der Stromdichtevektor parallel zur Oberfläche verläuft und dessen y -Komponente lediglich von der Tiefe z abhängt. Aus dem Biot-Savart-Gesetz [4] folgt somit, dass \mathbf{B} nur eine x -Komponente aufweist. Der definierte Zusammenhang ist in Bild 1 dargestellt.

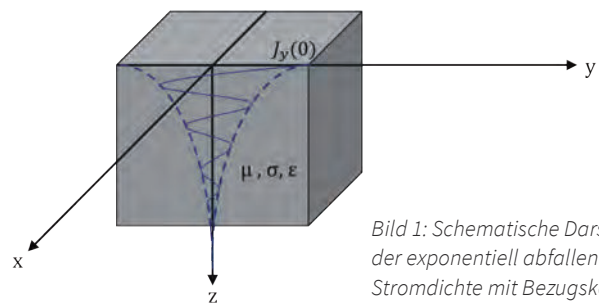


Bild 1: Schematische Darstellung der exponentiell abfallenden Stromdichte mit Bezugskoordinationssystem

Es folgt somit:

$$\frac{dJ_y}{dz} = -j\omega\sigma B_x \tag{4}$$

$$\frac{dB_x}{dz} = J_y \cdot \left(\mu + j \cdot \frac{\omega\epsilon\mu}{\sigma} \right) \tag{5}$$

Nach Kombination und Ableitung ergibt sich hieraus eine lineare, homogene Differentialgleichung zweiter Ordnung:

$$\frac{d^2J_y}{dz^2} - J_y \cdot (j\omega\sigma\mu - \omega^2\epsilon\mu) = 0. \tag{6}$$

Diese lässt sich mit einem allgemeinen Ansatz lösen und es folgt $c_1 = 0$ unter Verwendung der Randbedingung $\lim_{z \rightarrow \infty} J_y(z) = 0$. Unter Verwendung der Randbedingung $J_y(0) = J_0$ resultiert schließlich:

$$J_y(z) = J_0 \cdot e^{-\sqrt{\frac{\omega\mu \cdot \sqrt{\epsilon^2\omega^2 + \sigma^2} - \omega^2\epsilon\mu}{2}} \cdot z} \left(\cos\left(-\sqrt{\frac{\omega\mu \cdot \sqrt{\epsilon^2\omega^2 + \sigma^2} + \omega^2\epsilon\mu}{2}} \cdot z\right) + j \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{\omega\mu \cdot \sqrt{\epsilon^2\omega^2 + \sigma^2} + \omega^2\epsilon\mu}{2}} \cdot z\right) \right) \tag{7}$$

Zur Ermittlung der Standardeindringtiefe wird $J_y(z) = \frac{1}{e} \cdot J_0$ angenommen und es ergibt sich:

$$\delta_v = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu \cdot \sqrt{\epsilon^2\omega^2 + \sigma^2} - \omega^2\epsilon\mu}} \tag{8}$$

Diese Gleichung kann nach Umformung durch [5] bestätigt werden. Unter der Voraussetzung $\omega\epsilon \gg \sigma$ handelt es sich, wie beispielsweise bei Kunststoffen, um einen schlechten elektrischen Leiter. Dies ist für $\omega \rightarrow \infty$ erfüllt. Hierfür ergibt sich folgende Grenzwertbetrachtung und es resultiert nach Vereinfachung schließlich

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} \delta_v(\omega) = \sqrt{\lim_{\omega \rightarrow \infty} \left(\frac{\sqrt{4\epsilon^2\omega^2}}{\sqrt{\omega^2\sigma^4\mu^2}} \right) + \lim_{\omega \rightarrow \infty} \left(\frac{\sqrt{4\sigma^2}}{\sqrt{\omega^2\sigma^4\mu^2}} \right) + \lim_{\omega \rightarrow \infty} \left(\frac{2\omega^2\epsilon\mu}{\omega^2\sigma^2\mu^2} \right)} = \frac{2}{\sigma} \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \tag{9}$$

Die elektrische Leitfähigkeit geht hierbei invers mit ein und steht gegenüber der konventionellen Formel für die Standardeindringtiefe nicht mehr unter der Wurzel. Es wird somit deutlich, dass die Standardeindringtiefe unter Berücksichtigung von Verschiebestömen bei sehr hohen Prüffrequenzen oder sehr geringer elektrischer Leitfähigkeit asymptotisch gegen einen Grenzwert strebt, der lediglich von den Werkstoffparametern bestimmt wird.

**Numerische Simulation der HF-Wirbelstromprüfung
Validierung der Standardeindringtiefe**

Um die Ergebnisse der analytischen Betrachtungen zu validieren, werden im Folgenden numerische Simulationen unter Verwendung von ANSYS® Maxwell 3D (Version 19.0) durchgeführt. Vorteil gegenüber anderen Softwaremodulen ist hierbei die vollständige Implementierung der Maxwell-Gleichungen hinsichtlich auftretender Verschiebestrome [6], was insbesondere bei höheren Frequenzen relevant ist. Für alle durchgeführten Simulationen wird der virtuelle Raum, für welchen mittels des Eddy Current Solvers die Lösungen berechnet werden, zu allen Seiten noch einmal genau so groß gewählt, wie alle Objekte des Modells selbst. Es ist somit ein Offset von 100 % in alle Raumrichtungen vorhanden, wobei die Umgebung stets als Luft definiert wird. An den Außenseiten des virtuellen Raums gelten Neumann-Grenzbedingungen. Für die Vernetzung des erstellten Modells wird auf das adaptive Meshing zurückgegriffen, das bei Aus-

wahl eines statischen Solvers zur Verfügung steht. Die einzelnen Objekte werden hierbei mittels Tetraedern in finite Elemente unterteilt. Auf diese Weise wird zunächst ein grobes Netz mit vergleichsweise wenigen Elementen generiert. In Bereichen mit hohen Änderungen der zu berechnenden Felder wird das Netz anschließend lokal schrittweise verfeinert, bis der zulässige Fehler unterschritten wird. Als zulässiger Fehler wird ein Wert von 0,1 % gewählt. Für die Simulationen wurde ein Intel® Core i7-9700 Prozessor mit 16 GB Arbeitsspeicher und 64-Bit-Betriebssystem eingesetzt. Um die analytischen Berechnungen zu validieren und die Standardeindringtiefe von Verschiebestömen in Isolatoren zu ermitteln, wird eine Ringspule auf dem Prüfkörper ($\sigma = 0$; $\mu_r = 1$; $\epsilon_r = 1$) platziert. Diese weist einen Innenradius von 2 mm, einen Außenradius von 4 mm sowie eine Höhe von 5 mm auf und wird als stranded coil simuliert, was die erforderlichen Rechenzeiten deutlich reduziert. Die 28 Windungen der Spule werden von einem Wechselstrom mit 100 mA durchflossen. Zunächst wird hierbei die Stromdichte ausgehend vom Mittelpunkt zwischen Außen- und Innenradius in Tiefenrichtung für unterschiedliche Prüffrequenzen ermittelt. Die resultierenden Verläufe sind nachfolgend in Bild 2 dargestellt.

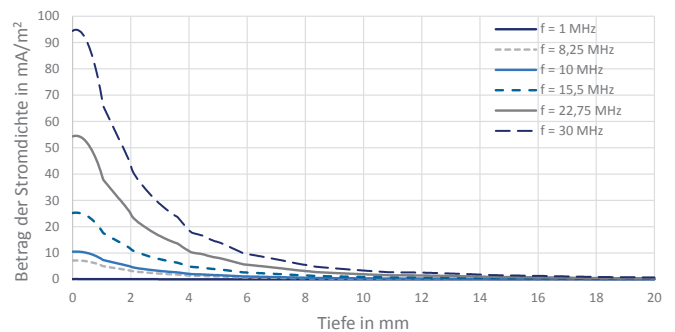


Bild 2: Stromdichte in Abhängigkeit von der Tiefe für unterschiedliche Prüffrequenzen

Ausgehend hiervon kann die Standardeindringtiefe für unterschiedliche Prüffrequenzen ermittelt werden. Es resultiert der in Bild 3 (a) abgebildete Verlauf. Somit wird deutlich, dass entgegen der Formel für die Standardeindringtiefe bei elektrisch leitfähigen Werkstoffen, in diesem Fall keine Beeinflussung der Eindringtiefe über die Prüffrequenz möglich ist. Qualitativ bestätigt werden kann dies durch die vorangegangene mathematische Herleitung, wonach sich die Standardeindringtiefe für hohe Frequenzen an ein Plateau annähert, das ausschließlich durch die Werkstoffparameter gegeben ist. Weiterhin kann gezeigt werden, dass die Standardeindringtiefe maßgeblich über den Spulenaußenradius bestimmt wird.

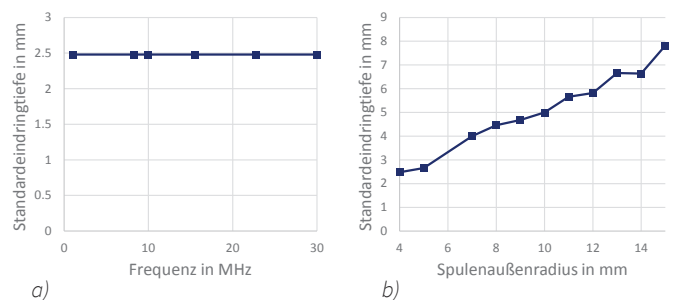


Bild 3: Standardeindringtiefe für eine Ringspule in Abhängigkeit von der Prüffrequenz (a) sowie in Abhängigkeit vom Spulenaußenradius bei einer Frequenz von 30 MHz (b)

Dies kann exemplarisch anhand der Standardeindringtiefe als Funktion des Spulenaußenradius bei einer Frequenz von 30 MHz verdeutlicht werden, wie in Bild 3 (b) dargestellt.

Kapazitive Kopplungseffekte

Nach der Betrachtung homogener Werkstoffe soll im Folgenden näher auf einzelne faserförmige Einschlüsse in diesen und Wechselwirkungseffekte zwischen mehreren Fasern sowie deren Frequenzabhängigkeit eingegangen werden. Hierfür wird eine Ringspule aus Kupfer mit einem Außenradius von 4 mm und einem Innenradius von 2,25 mm in einem Abstand von 0,1 mm oberhalb der Prüfkörperoberfläche platziert. Die Spulenhöhe beträgt 3 mm und wird als stranded coil simuliert. Ihre 28 Windungen werden dabei mit einem Strom von 100 mA durchflossen. Als Prüfkörper wird eine Platte ($l = 80 \text{ mm}$, $b = 80 \text{ mm}$, $h = 5 \text{ mm}$) mit denselben Werkstoffparametern wie zuvor verwendet. Zusätzlich wird ein weiterer Fall mit einer abweichenden relativen Permittivität von $\epsilon_r = 4$ modelliert. Der dielektrische Verlustfaktor ist für den Prüfkörper gegeben zu $\tan(\delta) = 0,02$. Im jeweiligen Prüfkörper befinden sich zylinderförmige Kohlenstoffeinschlüsse ($\sigma = 70 \text{ kS/m}$, $\mu_r = \epsilon_r = 1$) unterschiedlicher Anzahl. Für die nachfolgend genauer dargestellten Fälle wird jeweils unter Verwendung des Field Calculators als Indikator für die in der Spule induzierte Spannung der magnetische Fluss im Spulenquerschnitt analog zu [7] berechnet. Zu den betrachteten Kombinationen von Faser und Matrix zählt ein homogener Prüfkörper ohne Faser sowie derselbe Prüfkörper mit einer oder zwei Fasern. Mehrere Fasern sind dabei so angeordnet, dass eine kapazitive Struktur in einer Ebene parallel zur Prüfkörperoberfläche oder orthogonal hierzu resultiert. Eine Übersicht hierüber ist unter Angabe der relevanten Abmessungen in Bild 4 dargestellt. Es resultieren folglich insgesamt acht Szenarien.

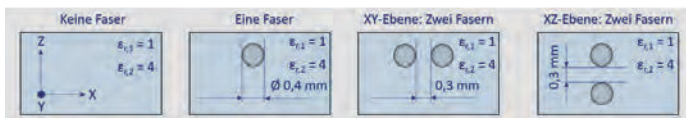


Bild 4: Schematische Darstellung der untersuchten Faser-Matrix-Kombinationen

Für jede der dargestellten Varianten wird der magnetische Fluss im Spulenquerschnitt für die Frequenzen 1 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz und 30 MHz berechnet. Im Anschluss wird jeweils die Differenz des magnetischen Flusses im Spulenquerschnitt eines Szenarios mit höherer Permittivität bei einer bestimmten Frequenz und des entsprechenden Szenarios mit niedriger Permittivität bei derselben Frequenz ermittelt. Dies ermöglicht eine Aussage darüber, ob die Permittivität einen Einfluss auf den magnetischen Fluss und damit

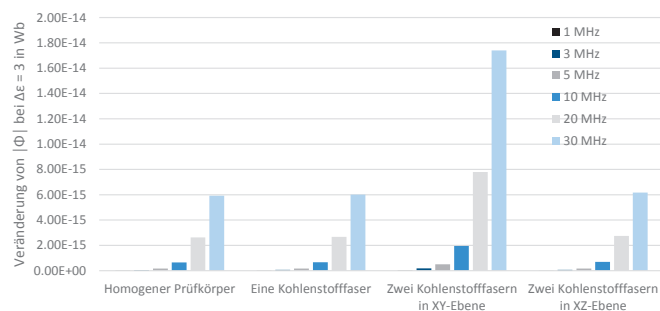


Bild 5: Änderung der magnetischen Flussdichte des Matrixwerkstoffs bei $\Delta\epsilon = 3$

die induzierte Spulenspannung aufweist und wie hoch der Einfluss kapazitiver Effekte zwischen Fasern verglichen mit der reinen induzierten Verschiebungsstromdichte ist. Die ermittelten Änderungen der magnetischen Flussdichte sind für die unterschiedlichen Szenarios und Frequenzen in Bild 5 dargestellt.

Es wird somit deutlich, dass kapazitive Wechselwirkungen bei hohen Frequenzen von einigen MHz vor allem innerhalb der einzelnen Lagen auftreten. Zwischen einzelnen Lagen ist dieser Effekt nahezu vernachlässigbar. Dies kann qualitativ auch durch [7] bestätigt werden und ist auf die Orientierung des elektrischen Felds in der Ebene der Fasern zurückzuführen. Eine Ausnahme hierbei stellen jedoch geringere Prüffrequenzen, wie beispielsweise in der Größenordnung von 1 MHz oder geringer, dar. Hier kommt es auch zwischen einzelnen Lagen zu kapazitiven Wechselwirkungen. Um diesen Zusammenhang zu verdeutlichen, wird die jeweilige Änderung im Folgenden auf die Änderung des magnetischen Flusses für einen homogenen Prüfkörper normiert, d. h. diese entspricht 100 % und repräsentiert auf diese Weise die rein durch Verschiebungsströme im Matrixwerkstoff hervorgerufene Änderung des magnetischen Flusses. Werden alle weiteren Szenarios auf diesen Wert normiert, so resultieren ausschließlich die Einflüsse kapazitiver Wechselwirkungen bezogen auf den Einfluss der induzierten Verschiebungsströme. Dieser Zusammenhang ist in Bild 6 dargestellt.

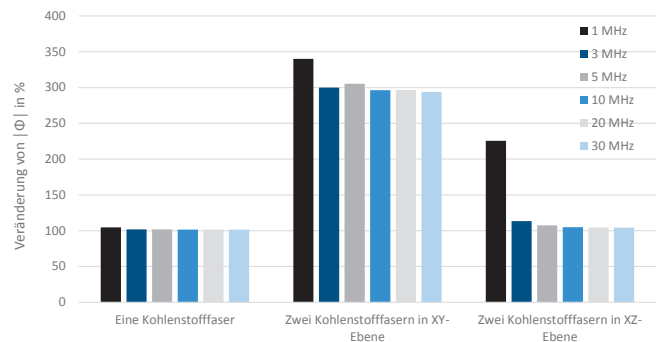


Bild 6: Prozentuale Veränderung des magnetischen Flusses bezogen auf einen homogenen Prüfkörper bei $\Delta\epsilon = 3$ (entspricht 100 %)

Für eine einzelne Kohlenstofffaser zeigt sich gegenüber einem homogenen Prüfkörper nahezu keine Änderung, da bei einer einzelnen Faser keine kapazitiven Wechselwirkungen auftreten können. Auftretende Abweichungen sind dementsprechend eher auf numerische Ungenauigkeiten zurückzuführen. Weiterhin kann gezeigt werden, dass höhere Prüffrequenzen von mehreren MHz dazu führen, dass kapazitive Effekte sowohl innerhalb als auch zwischen einzelnen Lagen (bezogen auf die Änderung eines homogenen Prüfkörpers bei derselben Frequenz) geringer ausgeprägt sind als bei niedrigeren Prüffrequenzen. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass sich analog zu [8] bei geringeren Frequenzen magnetische Multipole in den Fasern ausbilden, die Wechselwirkungseffekte zwischen Fasern in unterschiedlichen Lagen begünstigen. Um dies zu verifizieren, sind allerdings weitere Untersuchungen erforderlich.

Modellierung von unidirektionalen CFK-Tapes

Während die meisten Ansätze zur Simulation von CFK im Bereich der Wirbelstromprüfung auf die Homogenisierung der elektrischen Eigenschaften einzelner Lagen zurückgreifen, wird im Folgenden eine Simulation auf Faser-Matrix-Ebene für ein einzelnes unidirektionales Tape durchgeführt. Hierbei sind quaderförmige Faser- und Matrixelemente mit einer Elementbreite von 0,1 mm abwechselnd

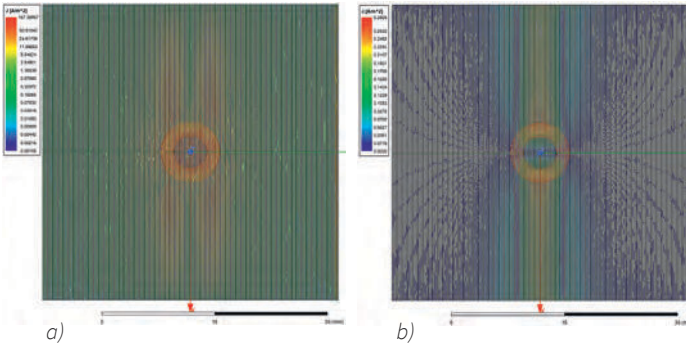


Bild 7: Leitungsstromdichte in den Kohlenstoffelementen (a) und Verschiebungsstromdichte im Matrixwerkstoff (b) bei einer Frequenz von 10 MHz und einer Elementbreite von 0,1 mm.

aneinandergereiht. Die Werkstoffeigenschaften bleiben unverändert. In Bild 7 sind die resultierenden Leitungs- und Verschiebungsstromdichten in Aufsicht dargestellt.

Obwohl die gewählten Abmessungen der Fasern noch eine Größenordnung über realen Werten liegen, ist hier bereits eine elliptische Form der Leitungsströme zu beobachten. Kapazitive Effekte verstärken die geringen induzierten Verschiebestrome im Matrixwerkstoff immens und treten auch in großer Entfernung vom Spulenzentrum noch zwischen Fasern auf. Der Betrag der Verschiebungsstromdichte beträgt maximal ca. 0,29 A/m², während die Leitungsstromdichte Werte von bis zu etwa 167,39 A/m² annimmt.

Simulation von Laminaten

Ausgehend von den Ergebnissen der Simulation auf Faser-Matrix-Ebene soll im Folgenden eine Möglichkeit für die effiziente und realitätsnahe Simulation von Laminaten aufgezeigt werden. Da für die Simulation eines Laminats auf Faser-Matrix-Ebene immense Rechenleistungen und Speicherkapazitäten benötigt werden, ist dies für die Praxis – nicht zuletzt auch aufgrund des Aufwands in der Modellerstellung – nicht zielführend. Aus diesem Grund wird oft dazu übergegangen, einzelne Laminatschichten zu homogenisieren und ihnen anisotrope elektrische Eigenschaften zuzuweisen. Hierdurch ist jedoch der Einfluss der Permittivität auf die induzierte Spulenspannung und somit der Nachweis von permittivitätsassoziierten Defekten nicht mehr realitätsnah möglich. Weiterhin grenzen bei den meisten in der Literatur dokumentierten Modellierungsansätzen elektrisch leitfähige Lagen direkt aneinander. Da jedoch eine elektrisch isolierende Matrix zwischen den Schichten vorhanden ist, sollten, unter Vernachlässigung der punktuell eventuell vorhandenen Faser-Faser-Kontakte, keine Leitungsströme in tieferliegende Schichten geleitet werden. Darüber hinaus konnte zuvor gezeigt werden, dass bei höheren Frequenzen auch keine kapazitiven Effekte zwischen den Lagen auftreten. Aus diesen Gründen wird im Folgenden ein Laminat mit insgesamt 34 Lagen aufgebaut, wobei jede einzelne Lage aus drei Teilschichten besteht, die mit ihren elektrischen Eigenschaften und Abmessungen in Bild 8 dargestellt sind.

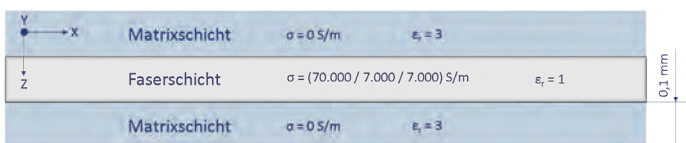


Bild 8: Schematische Darstellung des Aufbaus einer einzelnen Lage des 34-lagigen Laminats

Auf diese Weise kann gezeigt werden, dass es auch bei Präsenz elektrisch isolierender Schichten zwischen zwei Faserschichten zu einer exponentiellen Abnahme der Stromdichte kommt, was anhand von Bild 9 verdeutlicht werden kann. Die Verschiebestromdichte zwischen zwei Lagen ist ungleich Null, allerdings im Vergleich zu den Leitungsströmen in der Faserebene sehr gering. Kapazitive Effekte zwischen den Lagen sind, wie zuvor bereits auf Faser-Matrix-Ebene gezeigt, nicht vorhanden.

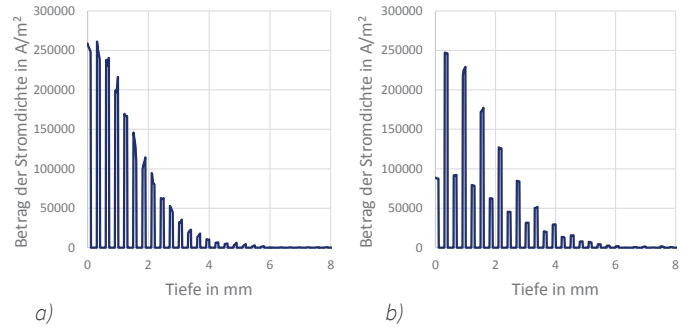


Bild 9: Betrag der Stromdichte in Abhängigkeit von der Tiefe für eine Frequenz von 10 MHz dargestellt für ein UD-Laminat (a) sowie ein Laminat mit einem [90°,0°]-Lagenaufbau (b)

An den Grenzflächen einzelner Lagen mit unterschiedlicher Faserichtung kommt es in der Faserschicht zu einer lokalen Verstärkung der Stromdichte. Bei unidirektionalen Laminaten ist aus diesem Grund eine vergleichsweise schnellere Abschwächung der Stromdichten in Tiefenrichtung zu beobachten als bei multidirektionalem CFK.

Experimentelle Ergebnisse und Anwendung

Hochfrequenz-Wirbelstromprüfung an CFK wird sowohl zur Prüfung von Faserhalbzeugen [9], für das Monitoring der CFK-Herstellungsprozesse [10], als auch zur Betriebsprüfung [11,12] eingesetzt. Hersteller von auf die Prüfung von CFK zugeschnittenen Wirbelstromprüfsystemen ist die Suragus GmbH (Dresden), wobei diese entlang der gesamten CFK-Wertschöpfungskette genutzt werden können. Im Rahmen dieses Beitrags wurde das Wirbelstromprüfgerät ELOTTEST PL600 der Firma Rohmann GmbH (Frankenthal) auf bis zu 30 MHz erweitert und für die Prüfung von CFK eingesetzt. Das Potenzial des neuen Wirbelstromprüfsystems soll anhand zweier Prüfkörper mit Referenzdefekten exemplarisch demonstriert werden. Hierzu zählen zwei Prüfkörper mit duroplastischer Matrix und einem Gelege bzw. Gewebe als Faserhalbzeug. Während ersterer einzelne Legespalte aufweist, wurde im Prüfkörper mit Gewebe ein

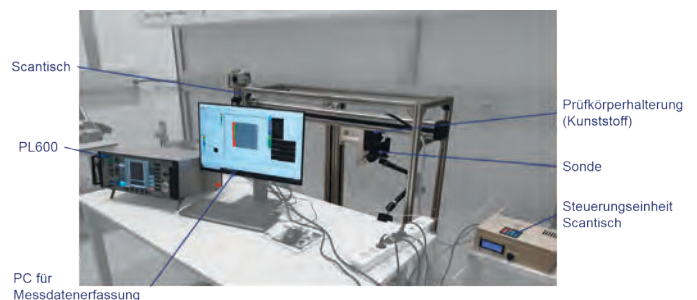


Bild 10: Darstellung des Wirbelstrom-Prüfstands

40 J-Impactschaden eingebracht. Mittels XY-Manipulator können Prüfkörper abgerastert und die Impedanzwerte durch die Encodersignale den einzelnen Ortskoordinaten zugeordnet werden, wodurch eine bildgebende Wirbelstromprüfung möglich ist. Als Parameter wurde eine Bahngeschwindigkeit von 10 mm/s sowie eine Spurbreite von 0,5 mm gewählt.

Der Abstand der Absolutsonde KAS2-3 zum Prüfkörper beträgt etwa 0,2 mm. Das Gesamtsystem ist unter Angabe der relevanten Komponenten in Bild 10 dargestellt.

Hierdurch kann die Faserorientierung sowie damit verbundene Fehlstellen, wie beispielsweise Fehlorientierungen, Legespalte oder Ondulationen detektiert werden. Exemplarisch ist die Ermittlung der Faserorientierung mittels Fast-Fourier-Transformation (FFT) nachfolgend in Bild 11 dargestellt, wobei hellere Bereiche im Gelege auf Legespalte zurückzuführen sind. Der Faserorientierungswinkel kann im Frequenzspektrum direkt gemessen werden.

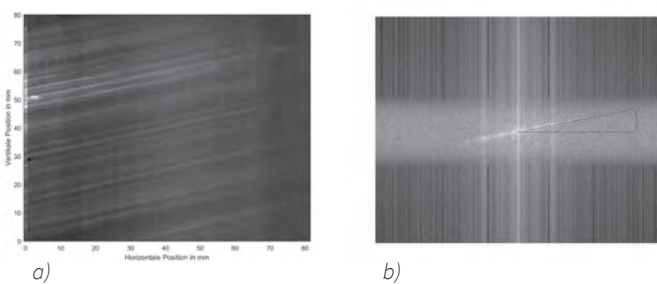


Bild 11: Unter Verwendung der Absolutsonde KAS2-3 bei 3,5 MHz geprüftes CFK-Gelege (a) sowie dessen FFT zur direkten Ermittlung der Faserorientierung (b)

Weiterhin können nicht nur herstellungsassoziierte Schäden, sondern auch betriebsbedingte Schäden nachgewiesen werden. Dies ist beispielhaft in Bild 12 anhand eines 40 J-Impactschadens dargestellt.

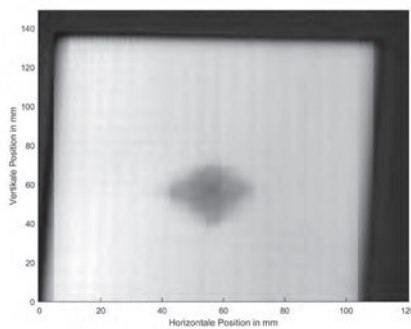


Bild 12: Unter Verwendung der Absolutsonde KAS2-3 bei 3,5 MHz detektierter 40 J-Impactschaden

Fazit

Im Rahmen dieser Arbeiten konnte gezeigt werden, dass die Standardeindringtiefe unter Berücksichtigung von Verschiebestromen bei sehr hohen Prüffrequenzen oder sehr geringer elektrischer Leitfähigkeit asymptotisch gegen einen Grenzwert strebt, der lediglich von den Werkstoffparametern bestimmt wird. Für die Prüfung von Nichtleitern kann die Standardeindringtiefe folglich nicht mehr über die Frequenz, sondern lediglich über die geometrischen Abmessungen der Spule bestimmt werden. Weiterhin konnte demonstriert werden, dass kapazitive Effekte in CFK bei hohen Frequenzen (> 1 MHz) ausschließlich in der Ebene auftreten, während bei niedrigeren

Frequenzen (< 1 MHz) eine Verstärkung der kapazitiven Effekte zwischen Lagen zu beobachten ist. Der hierfür zu Grunde liegende Effekt soll in weiteren Arbeiten näher untersucht werden. Der entwickelte Wirbelstrom-Prüfstand soll darüber hinaus für eine systematische Untersuchung von Fehlstellen in CFK bei unterschiedlichen Faserhalbzeugen, Faservolumengehalten und Matrices eingesetzt werden, um eine ausreichende Datenbasis und damit eine hohe Prüfzuverlässigkeit zu erzielen.

Danksagung

Das IGF-Vorhaben Nr. 20213 N der Forschungsvereinigung Fördergemeinschaft für das Süddeutsche Kunststoff-Zentrum 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 Bundestags gefördert.



REFERENCES

1. Grellmann, W.; Seidler, S. *Kunststoffprüfung*, 3., aktualisierte Aufl.; Carl Hanser Verlag: München, 2015, ISBN 9783446443501.
2. Maxwell, J.C. *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field* 1865.
3. Huang, S.; Wang, S. *New Technologies in Electromagnetic Non-destructive Testing*; Springer Singapore: Singapore, 2016, ISBN 978-981-10-0577-0.
4. Donnevert, J. *Die Maxwell'schen Gleichungen*; Springer Fachmedien Wiesbaden: Wiesbaden, 2015, ISBN 978-3-658-09955-8.
5. Jordan, E.C.; Balmain, K.G. *Electromagnetic Waves and Radiating Systems*, 2nd edition; Prentice-Hall, Inc: Englewood Cliffs, New Jersey, 1968.
6. ANSYS Inc. *Maxwell Help*; Canonsburg, PA 14317, 2019.
7. Gäbler, S. *Untersuchung des Anwendungspotenzials der Hochfrequenzwirbelstrommesstechnik zur Charakterisierung dielektrischer Eigenschaften von Epoxidharzen und Faserverbundmaterialien*. Dissertation; Technische Universität Dresden, 2017.
8. Kreuzbruck, M.; Casperson, R.; Reimund, V.; Blome, M. *Magnetic Response Field of Spherical Defects within Conductive Components*. *Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics* 2010.
9. Heuer, H.; Schulze, M.; Pooch, M.; Gabler, S.; Kupke, R. *PROCESS MONITORING FOR RESINS, CARBON FIBER FABRICS, PREFORMS AND CONSOLIDATED CFRPS BY HF RADIO WAVE TECHNIQUES*. 20th International Conference on Composite Materials 2015.
10. Berger, D.; Lanza, G. *Development and Application of Eddy Current Sensor Arrays for Process Integrated Inspection of Carbon Fibre Preforms*. *Sensors (Basel)* 2017, 18, doi:10.3390/s18010004.
11. Mook, G.; Lange, R.; Koeser, O. *Non-destructive characterisation of carbon-fibre-reinforced plastics by means of eddy-currents*. *Composites Science and Technology* 2001, 65–873.
12. Bardl, G.; Kupke, R.; Heuer, H.; Cherif, C. *Wirbelstromprüfung in der CFK-Fertigung*. *Lightweight design* 2018, 58–63.

Kontakt: sebastian.joas@ikt.uni-stuttgart.de