

Untersuchung von kohlenstoff- faserverstärkten Kunststoffen mittels Hochfrequenz- Wirbelstromprüfung

Sebastian JOAS¹, Marc KREUTZBRUCK¹

¹ Institut für Kunststofftechnik, Universität Stuttgart, Stuttgart

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

Kurzfassung. Als Nachteil des Wirbelstromverfahrens wird meist die Beschränkung auf die Prüfung von Werkstoffen mit hoher elektrischer Leitfähigkeit angeführt. Dennoch konnte bereits gezeigt werden, dass auch gering elektrisch leitfähige Werkstoffe, wie beispielsweise kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) zufriedenstellend, und sogar Nichtleiter unter bestimmten Voraussetzungen mittels Wirbelstromprüfung untersucht werden können.

Dieser Beitrag stellt die zugrundeliegenden physikalischen Phänomene dar und beschreibt die Ausbreitung von Wirbelströmen in Nichtleitern und CFK auf Basis von analytischen Berechnungen und FEM-Simulationen. Der Einfluss von Leitungs- und Verschiebungsströmen wird dabei auf Faser-Matrix-Ebene untersucht. Dies ermöglicht eine Quantifizierung des Einflusses von Verschiebungsströmen unter Berücksichtigung der in CFK vorhandenen kapazitiven Strukturen. Weiterhin wird die Eindringtiefe von Verschiebungsströmen in Nichtleitern ermittelt.

Unter Verwendung eines auf 30 MHz Anregungsfrequenz erweiterten PL600 (Rohmann GmbH, Frankenthal) wird experimentell gezeigt, dass lokale Permittivitätsunterschiede selbst bei vergleichsweise geringen Frequenzen im niedrigen Megahertz-Bereich mittels Wirbelstromprüfung nachgewiesen werden können. Das Potenzial des Systems für die Prüfung von Leichtbauwerkstoffen wird abschließend anhand von CFK-Prüfkörpern mit Referenzdefekten demonstriert.

Einführung

Während für das Wirbelstromverfahren an Metallen bereits industrielle Lösungen bis zur Inline-Prüfung in Großserien zur Verfügung stehen, ist die Wirbelstromprüfung faserverstärkter Kunststoffe vergleichsweise wenig gut erforscht. Meist wird das Wirbelstromverfahren als auf die Prüfung von elektrisch hoch leitfähigen Werkstoffen beschränkt betrachtet. Dass auch gering elektrisch leitfähige Werkstoffe prüfbar sind, konnte im Kontext der Charakterisierung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) in zahlreichen Veröffentlichungen gezeigt werden. Allgemein eignen sich für die Prüfung elektrisch gering leitfähiger Werkstoffe vergleichsweise hohe Prüffrequenzen im MHz-Bereich [1–3], da es bei diesen zur Induktion einer höheren Spannung und damit zu einer höheren Stromdichte im Prüfkörper kommt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Spannung nach dem Faraday'schen Gesetz [4] proportional zur zeitlichen Magnetfeldänderung ist. Aus diesem Grund sind höhere Frequenzen besser geeignet, um höhere Stromdichten im Prüfkörper und damit höhere induzierte Spannungswerte in der Empfangsspule zu erhalten [5]. Nachteilig ist dabei jedoch die durch den Skin-Effekt bedingte Reduktion der Tiefenreichweite des Verfahrens bei höheren



Frequenzen. Da in der Literatur häufig der Einfluss der Verschiebungsströme auf das Messsignal vernachlässigt wird, geht man davon aus, dass die Permittivität eines Werkstoffs keinen Einfluss auf das Prüfergebnis hat. Dass dies nicht der Fall ist, wurde bereits im Jahr 1994 vermutet, als gezeigt werden konnte, dass eine steigende Prüffrequenz zu einer Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit orthogonal zur Faserrichtung in UD-CFK führt [1]. In den vergangenen Jahren konnte mit neuen bildgebenden Wirbelstromprüfsystemen gezeigt werden, dass dieser Effekt zu einem Permittivitätsmapping und damit zur Analyse des Matrixwerkstoffs genutzt werden kann. Mittels Hochfrequenz (HF)-Wirbelstromverfahren sind somit auch Flachbodenbohrungen in Nichtleitern, wie beispielsweise Polyoxymethylen (POM) [6] und Polymethylmethacrylat (PMMA) [7, 8] nachweisbar. Weiterhin ist auch eine Korrelation der Permittivität der Epoxidharzmatrix von CFK und damit deren Aushärtegrad zu Wirbelstrommesssignalen vorhanden [9, 8].

Trotz dieser experimentellen Untersuchungen ist die Ausbreitung von induzierten Leitungs- und Verschiebungsströmen in CFK und Nichtleitern nicht abschließend geklärt. Insbesondere im Hochfrequenzbereich ist unklar, wie stark beispielsweise kapazitive Effekte in CFK ausgeprägt sind. In zahlreichen Veröffentlichungen zur Simulation der Wirbelstromausbreitung in CFK wird dieses stets als homogener Werkstoff mit Schichtaufbau modelliert [10][11] [12]. Der richtungsabhängigen elektrischen Leitfähigkeit wird dabei durch einen Tensor innerhalb der jeweiligen Ebene Rechnung getragen. Kapazitive Effekte können bei dieser Modellierungsvariante allerdings nicht abgebildet werden. Im Rahmen dieser Veröffentlichung sollen derartige Effekte bei der HF-Wirbelstromprüfung analytisch und mittels FEM untersucht werden. Zunächst wird die Standardeindringtiefe der HF-Wirbelstromprüfung für homogene Nichtleiter ermittelt. Der Einfluss von Leitungs- und Verschiebungsströmen wird anschließend in Abhängigkeit von der Frequenz für CFK auf Faser-Matrix-Ebene untersucht. Dies ermöglicht eine Quantifizierung des Einflusses von Verschiebungsströmen unter Berücksichtigung der in CFK vorhandenen kapazitiven Strukturen. Weiterhin wird experimentell gezeigt, dass selbst im niedrigen Megahertz-Bereich Permittivitätsdifferenzen nachgewiesen werden können. Abschließend sollen einige Beispiele aus dem Bereich der HF-Wirbelstromprüfung von CFK das Potenzial des Verfahrens für die Detektion herstellungs- und betriebsbedingter Fehlstellen verdeutlichen und es soll die maximale Tiefenreichweite ermittelt werden.

1. Analytische und numerische Betrachtung der HF-Wirbelstromprüfung

Während bei der konventionellen Wirbelstromprüfung meist der Einfluss der relativen Permittivität vernachlässigt wird, gewinnt diese bei Verwendung hoher Prüffrequenzen zunehmend an Bedeutung. Dies ist darin begründet, dass nach Maxwell 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} gilt [2]:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + j\omega\mathbf{D} = \mathbf{E} \cdot (\sigma + j2\pi f\epsilon). \quad (1)$$

Somit wird deutlich, dass die Permittivität ϵ eines gering elektrisch leitfähigen Werkstoffs mit der Leitfähigkeit σ bei hohen Frequenzen f zunehmend an Bedeutung gewinnt. In diesem Abschnitt wird zunächst die Standardeindringtiefe von Verschiebungsströmen in Nichtleitern analytisch und mittels FEM ermittelt. Anschließend werden bei CFK auftretende Effekte der HF-Wirbelstromprüfung näher erläutert und mittels FEM untersucht.

1.1 Standardeindringtiefe von Verschiebungsströmen in Nichtleitern

Im Bereich der Wirbelstromprüfung ist allgemein anerkannt, dass die Standardeindringtiefe δ von der Frequenz f , der magnetischen Permeabilität μ und der elektrischen Leitfähigkeit σ abhängig ist:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}. \quad (2)$$

Für die Herleitung des Skin-Effekts wird dabei $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = 0$ vorausgesetzt und somit der Verschiebungsstrom vernachlässigt. Diese Betrachtung gilt jedoch ausschließlich für gute elektrische Leiter bei niedrigen Frequenzen. Im Folgenden soll, analog zur Herleitung des Skin-Effekts [2,3], ein Ausdruck zur Berechnung der Standardeindringtiefe unter Berücksichtigung des

Verschiebungsstroms 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 (1) folgt aufgrund von $\mathbf{E} = \frac{\mathbf{J}}{\sigma}$ und $\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu}$:

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

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. Es gilt somit

$$\frac{dJ_y}{dz} = -j\omega\sigma B_x \quad \text{und} \quad (4)$$

$$-\frac{dB_x}{dz} = J_y \cdot \left(\mu + j \cdot \frac{\omega \varepsilon \mu}{\sigma} \right). \quad (5)$$

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

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

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

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

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

$$\delta_v = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu \cdot \sqrt{\varepsilon^2\omega^2 + \sigma^2} - \omega^2\varepsilon\mu}}. \quad (8)$$

Diese Gleichung kann nach Umformung durch [5] bestätigt werden. Unter der Voraussetzung $\omega\varepsilon \gg \sigma$ 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

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

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 Verschiebungsströmen bei sehr hohen Prüffrequenzen oder sehr geringer elektrischer Leitfähigkeit asymptotisch gegen einen Grenzwert strebt, der lediglich von den Werkstoffparametern bestimmt wird.

1.2 Simulation der HF-Wirbelstromprüfung im Kontext der Prüfung von Nichtleitern

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 Verschiebungsströme [6]. 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 Auswahl 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. Für die Berechnung der Standardeindringtiefe von Verschiebungsströmen in Isolatoren 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 1 dargestellt.

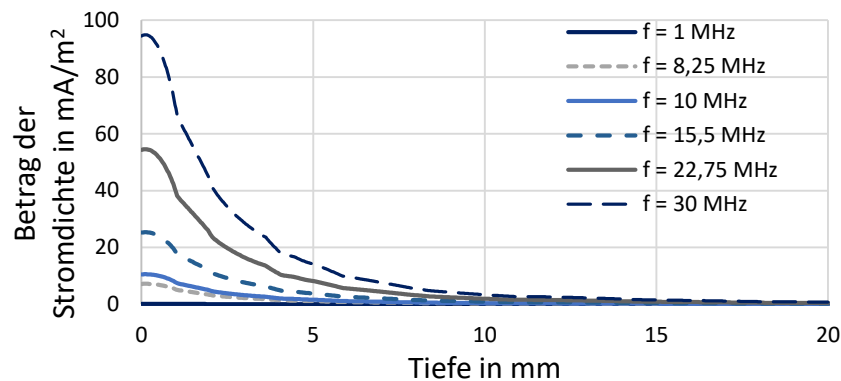


Bild 1: Stromdichte in Abhängigkeit von der Tiefe für unterschiedliche Prüffrequenzen

Ausgehend hiervon kann die Standardeindringtiefe für unterschiedliche Prüffrequenzen ermittelt werden. Es resultiert der in Bild 2 (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.

Während bei der vorangegangenen analytischen Berechnung von einer ebenen einfallenden Welle ausgegangen wurde, kann mittels FEM der Einfluss der Spulenabmessungen untersucht werden. Hierbei kann gezeigt werden, dass die Standardeindringtiefe maßgeblich über den Spulenaußenradius bestimmt wird. Exemplarisch wird dies in Bild 2 (b) anhand der Standardeindringtiefe als Funktion des Spulenaußenradius bei einer Frequenz von 30 MHz verdeutlicht.

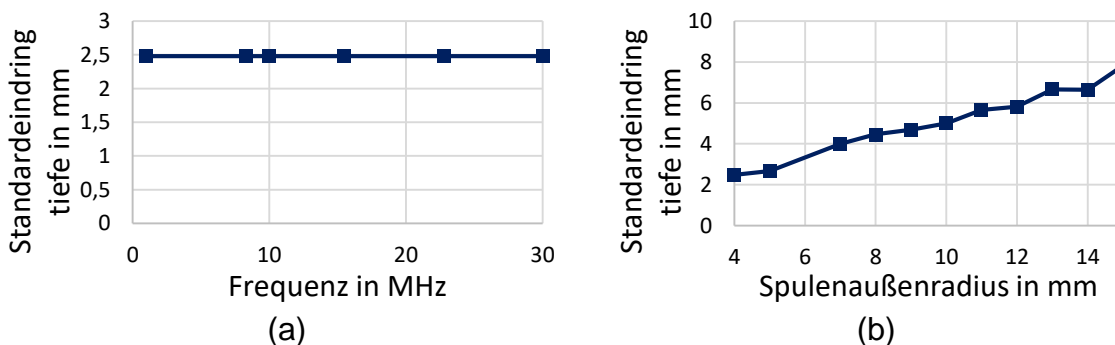


Bild 2: Standardeindringtiefe für eine Ringspule in Abhängigkeit von der Prüffrequenz (a) sowie in Abhängigkeit vom Spulenaußenradius bei einer Frequenz von 30 MHz (b).

1.3 Ausbreitung von Wirbelströmen in CFK

Ein entscheidender Faktor der HF-Wirbelstromprüfung ist die Entwicklung der für die jeweiligen Prüfaufgabe geeigneten Sonde. Um aufwendige experimentelle Versuche zu ersetzen, wird hierfür oft auf Simulationen zurückgegriffen. Im Bereich der HF-Wirbelstromprüfung ist bislang jedoch weitestgehend ungeklärt, wie eine realitätsnahe Modellierung von CFK durchgeführt werden soll. Während die meisten Ansätze auf die Homogenisierung der elektrischen Eigenschaften einzelner Lagen zurückgreifen, wird im Folgenden eine Modellierung auf Faser-Matrix-Ebene durchgeführt, anhand derer untersucht werden soll, wie CFK für unterschiedliche Anwendungsfälle in der HF-Wirbelstromprüfung geeignet modelliert werden kann. Dies ermöglicht eine Quantifizierung des Einflusses von Verschiebungsströmen bei Frequenzen im Megahertz-Bereich unter Berücksichtigung der in CFK vorhandenen kapazitiven Strukturen.

Um zu demonstrieren, dass Kohlenstofffasern wie runde Kapazitäten wirken, wird zunächst ein plattenförmiger Induktor (160 mm x 300 mm x 1 mm) als möglichst homogene Anregungsquelle genutzt und in einem Abstand von 0,1 mm oberhalb des Prüfkörpers (300 mm x 300 mm x 500 mm) platziert. Durch den Induktor aus Kupfer fließt dabei ein Wechselstrom mit einer Stromstärke von 1 A, wobei die Stromdichte über den Querschnitt des Induktors konstant ist. Die Fasern im Prüfkörper weisen eine Länge von 200 mm sowie einen Radius von 3 mm auf und sind orthogonal zur Anregungsstromrichtung im Induktor orientiert. Insgesamt werden zwei Faserlagen mit jeweils sieben Fasern im Prüfkörper simuliert. Die Werkstoffeigenschaften des Prüfkörpers liegen mit $\sigma = 0$ S/m und $\mu_r = \epsilon_r = 1$ näherungsweise im Bereich der elektrischen Eigenschaften eines Kunststoffs. Für den Kohlenstoffeinschluss wird $\sigma = 70.000$ S/m und $\epsilon_r = \mu_r = 1$ gewählt. Ein Querschnitt durch den Prüfkörper zeigt dabei, dass kapazitive Effekte zwischen den Fasern in der jeweiligen Ebene vorhanden sind, was in **Bild 3** zu sehen ist. Gleichzeitig kann erkannt werden, dass keine kapazitiven Effekte bei der vorliegenden Prüffrequenz von 10 MHz zwischen den Lagen vorhanden sind.

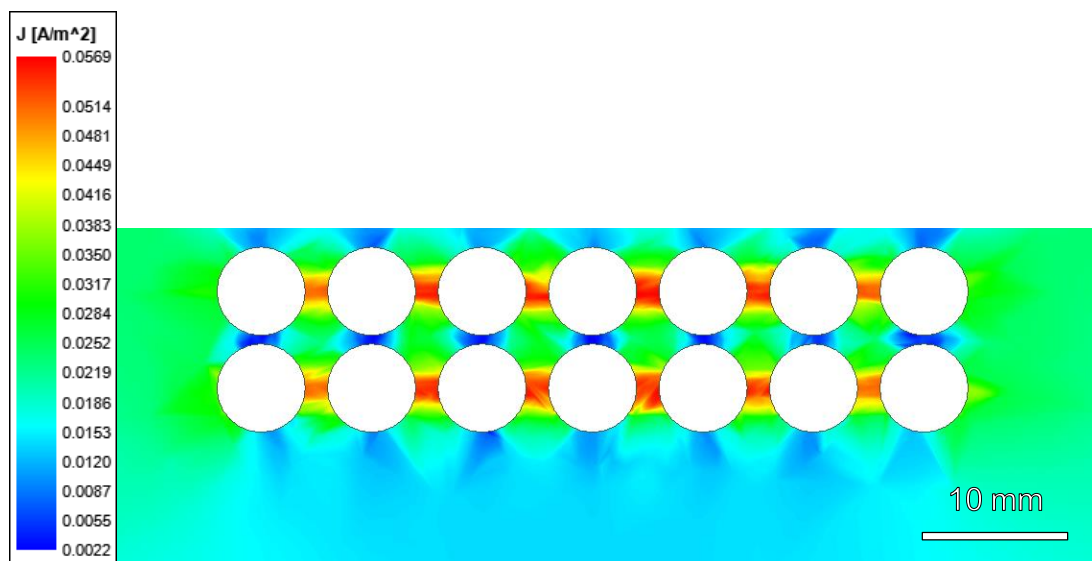


Bild 3: Darstellung der Verschiebungsstromdichte für den Matrixwerkstoff im Querschnitt

Insgesamt sind die bei dieser Frequenz vorhandenen kapazitiven Effekte im Vergleich zu den Leitungsströmen jedoch sehr gering ausgeprägt. Da eine eher makroskopische Simulation durchgeführt wurde, wird im folgenden Schritt die Elementgröße der Faserelemente auf eine Höhe und Breite von 0,1 mm verringert. Gleichzeitig werden diese als Blockelemente simuliert, um ein Vernetzen des Modells zu ermöglichen. Durch die abwechselnde Aneinanderreihung von quaderförmigen Faser- und Matrixelementen wird schrittweise eine einzelne Lage (Tape) mit 40 mm Breite und 40 mm Länge aufgebaut. Mit einem Offset von 0,1 mm wird eine Ringspule oberhalb des Tapes als Anregungselement platziert. Die Werkstoffeigenschaften bleiben unverändert. In Bild 4 sind die resultierenden Leitungs- und Verschiebungsstromdichten bei einer Frequenz von 10 MHz in Aufsicht dargestellt.

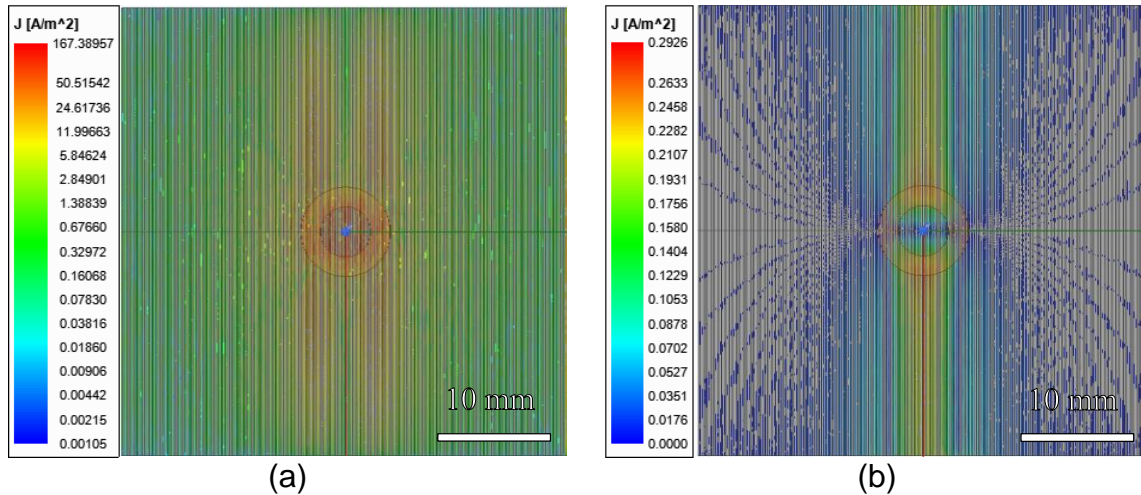


Bild 4: Stromdichte in den Kohlenstoffelementen (a) und Verschiebungsstromdichte im Matrixwerkstoff (b) bei einer Frequenz von 10 MHz und einer Elementbreite von 0,1 mm.

Obwohl die gewählten Abmessungen der Fasern noch eine Größenordnung über realen Werten liegen, ist hier bereits eine elliptische Form der Leitungsströme in den Fasern zu beobachten. Kapazitive Effekte verstärken die geringen induzierten Verschiebungsströme 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.

3. Experimentelle Ergebnisse und Diskussion

Im Rahmen dieser Arbeiten wurde ein auf bis zu 30 MHz erweitertes Wirbelstromprüfgerät ELOTEST PL600 der Firma Rohmann GmbH (Frankenthal) eingesetzt. 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 wird bei allen Prüfungen eine Bahngeschwindigkeit von 10 mm/s sowie eine Spurbreite von 0,1 mm gewählt. Die Sonde wird stets in einem möglichst geringen Abstand von weniger als 0,2 mm zum Prüfkörper positioniert. Das Gesamtsystem ist unter Angabe der relevanten Komponenten in **Bild 5** dargestellt.

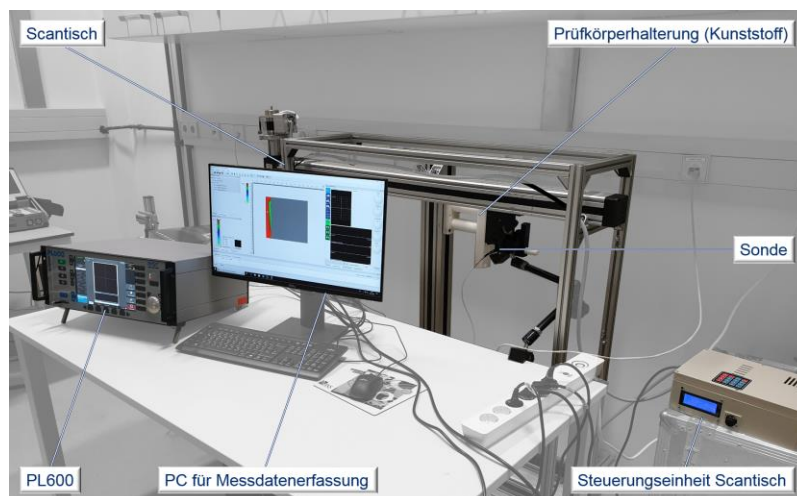


Bild 5: Wirbelstrom-Prüfstand für die Charakterisierung von CFK

Um zu demonstrieren, dass lokale Unterschiede in der relativen Permittivität nachgewiesen werden können, wurde zunächst demineralisiertes Wasser in eine Flachbodenbohrung mit 1 mm Restwanddicke in einer Polymethylmethacrylat (PMMA)-Platte eingebracht. Hierdurch befindet sich ein Fluid mit $\sigma \approx 0 \text{ S/m}$ und $\epsilon_r \approx 80$ in einem Prüfkörper mit $\sigma \approx 0 \text{ S/m}$ und $\epsilon_r \approx 3$. Für die Prüfung eingesetzt wurde eine Absolutsonde mit Ferritkern bei einer Frequenz von 1,9 MHz und einer Phase von 357° sowie einer Gesamtverstärkung von 85 dB. Das Prüfergebn eines Linienscans ist in **Bild 6** dargestellt.

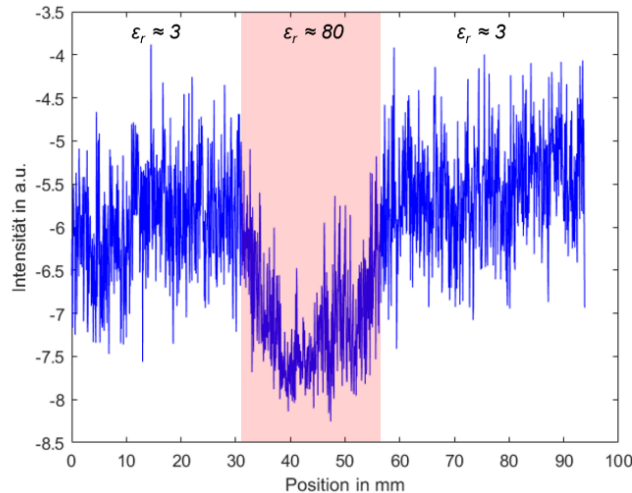


Bild 6: Nachweis einer lokalen Permittivitätsänderung von $\Delta\epsilon_r = 77$

Es kann somit gezeigt werden, dass lokale Änderungen der relativen Permittivität bei vergleichsweise niedrigen Frequenzen nachgewiesen werden können. Dabei ist mit der eingesetzten Sonde noch ein hohes Rauschen vorhanden, das durch ein künftig optimiertes Sondendesign reduziert werden soll.

Um das Potenzial des Prüfsystems für die Untersuchung von CFK aufzuzeigen, werden im Folgenden zwei Plattenprüfkörper mit Referenzdefekten eingesetzt. Beide Prüfkörper weisen ein Gewebe als Faserhalbzeug auf. In den ersten Prüfkörper wurden mittels Marx-Generator künstlich Blitzschäden mit drei Entladungen zu jeweils einer Ladespannung von 350 kV und einem Strom von etwa 600 A eingebracht. Im zweiten Prüfkörper befinden sich Flachbodenbohrungen mit unterschiedlichen Durchmessern (12 mm, 7 mm, 5 mm, 4 mm, 3 mm, 2,5 mm, 2 mm, 1,5 mm, 1 mm und 0,5 mm) in einer Tiefenlage von 1 mm unterhalb der Prüfkörperoberfläche.

Der künstlich erzeugte Stoßstrom-Schaden kann anhand des dunklen Bereichs im Prüfergebn (s. Bild 7 (a)) eindeutig identifiziert werden. Dabei wurde für die Prüfung die Absolutsonde KA 2-1 bei einer Frequenz von 800 kHz, einer Phasenlage von 207° und einer Gesamtverstärkung von 60 dB eingesetzt. Somit könnte die Wirbelstromprüfung selbst bei Frequenzen im Sub-Megahertz-Bereich ein geeignetes Verfahren zur Detektion von Blitzschäden in CFK darstellen.

Unter Verwendung derselben Sonde und Prüfparameter sind weiterhin Defekte in einer Tiefenlage von 1 mm mit einem Durchmesser von bis zu 2,0 mm mit einem SNR von etwa 4 dB identifizierbar. Größere Fehlstellen werden mit entsprechend höherem SNR detektiert. So kann beispielsweise ein Defekt mit einem Durchmesser von 12 mm mit einem SNR von 12 dB nachgewiesen werden. Darüber hinaus ist in beiden Prüfergebnissen deutlich die Struktur des jeweiligen Gewebes erkennbar. Die Wirbelstromprüfung kann somit auch genutzt werden, um Fehlorientierungen in CFK in unterschiedlichen Tiefenlagen nachzuweisen.

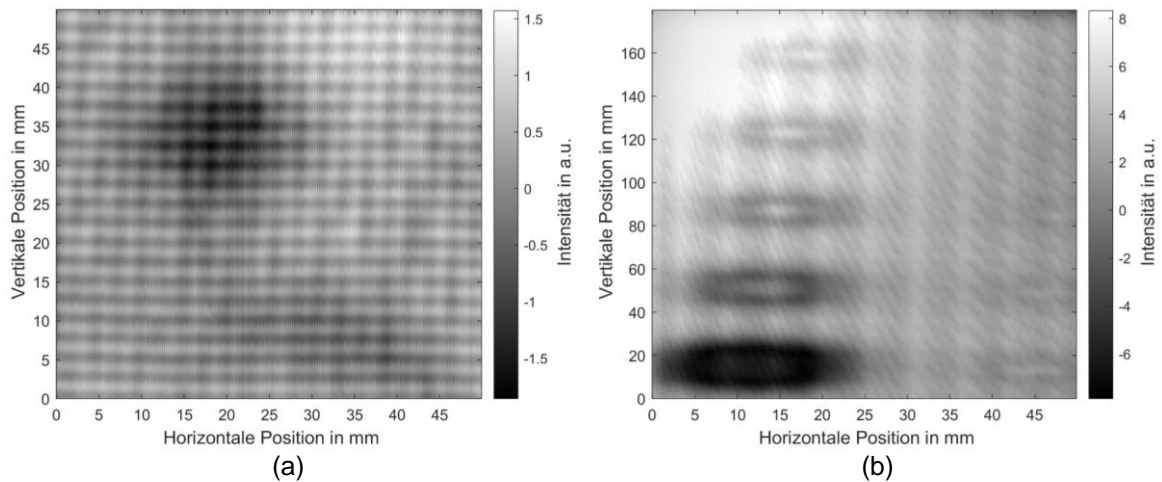


Bild 7: Referenzdefekte wie Blitzschäden (a) und Flachbodenbohrungen (b) können anhand der geringen Intensitäten eindeutig nachgewiesen werden.

4. Fazit

Im Rahmen dieses Beitrags wurden zunächst grundlegende physikalische Phänomene bei der HF-Wirbelstromprüfung von CFK und Nichtleitern beschrieben. Es konnte gezeigt werden, dass die Standardeindringtiefe bei der HF-Wirbelstromprüfung von Isolatoren lediglich durch die Spulenparameter und nicht mehr über die Wahl einer geeigneten Prüffrequenz gesteuert werden kann. Weiterhin wurde der Einfluss von Leitungs- und Verschiebungsströmen im Hochfrequenzbereich durch Simulationen auf Faser-Matrix-Ebene untersucht. Dabei zeigte sich, wie sich Verschiebungsströme in einzelnen Lagen von CFK ausbreiten und dass sie trotz hoher Frequenzen im Vergleich zu den Stromdichten in Faserelementen vergleichsweise gering ausgeprägt sind. Experimentell wurde gezeigt, dass unter Verwendung eines auf 30 MHz Anregungsfrequenz erweiterten PL600 (Rohmann GmbH, Frankenthal) lokale Permittivitätsunterschiede selbst bei vergleichsweise geringen Frequenzen im niedrigen Megahertz-Bereich mittels Wirbelstromprüfung nachgewiesen werden können. Das Potenzial des Systems für die Prüfung von CFK wurde abschließend anhand von CFK-Prüfkörpern mit Referenzdefekten demonstriert.

Weitere Arbeiten sollen die Zuverlässigkeit der HF-Wirbelstromprüfung für CFK systematisch und in Abhängigkeit vom jeweiligen Faserhalbzeug untersuchen. Weiterhin ist die Automatisierung der Prüfung geplant, indem das Verfahren robotergestützt durchgeführt wird. Hierdurch soll künftig auch die Prüfung von Realbauteilen mit komplexeren Geometrien ermöglicht werden.

Danksagung



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

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. Ein weiterer Dank geht an Christian Kolb (SKZ – KFE gGmbH, Würzburg) für die Bereitstellung des stoßstrombeaufschlagten Prüfkörpers.

Referenzen

1. LANGE, R. und G. MOOK. Structural analysis of CFRP using eddy current methods. NDT & E International, 1994, (5). ISSN 09638695.
2. MOOK, G. und R. LANGE. Wirbelstromprüfung von Hochleistungswerkstoffen. DGZfP-Jahrestagung, 1995.
3. LANGE, R. Zur Wirbelstromprüfung von kohlefaserverstärkten Kunststoffen. Dissertation. Magdeburg: Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 1997.
4. FARADAY, M. V. Experimental researches in electricity. Royal Society ©2017, 1831.
5. HEUER, H., M. SCHULZE, M. POOCH, S. GÄBLER, A. NOCKE, G. BARDL, C. CHERIF, M. KLEIN, R. KUPKE, R. VETTER, F. LENZ, M. KLIEM, C. BÜLOW, J. GOYVAERTS, T. MAYER und S. PETRENZ. Review on quality assurance along the CFRP value chain – Non-destructive testing of fabrics, preforms and CFRP by HF radio wave techniques [online]. Composites Part B: Engineering, 2015, 77, 494-501. ISSN 13598368. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.compositesb.2015.03.022
6. GÄBLER, S., H. HEUER, G. HEINRICH und R. KUPKE, Hg. Quantitatively Analyzing Dielectrical Properties of Resins and Mapping Permittivity Variations in CFRP with High-frequency Eddy Current Device Technology, 2014.
7. GÄBLER, S., H. HEUER und G. HEINRICH. Measuring and Imaging Permittivity of Insulators Using High-Frequency Eddy-Current Devices [online]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(8), 2227-2238. ISSN 0018-9456. Verfügbar unter: doi:10.1109/TIM.2015.2390851
8. GÄBLER, S. Untersuchung des Anwendungspotenzials der Hochfrequenzwirbelstrommesstechnik zur Charakterisierung dielektrischer Eigenschaften von Epoxidharzen und Faserverbundmaterialien. Dissertation, 2017.
9. KOSUKEGAWA, H., R. YAMADA, S. TAMONOKI, N. SATO, K. URA und T. TAKAGI. Nondestructive Evaluation of Hardening Degree of Epoxy Resin in CFRP with Eddy Current Testing. Electromagnetic Non-Destructive Evaluation (XXI), 2018, 65-72.
10. JIAO, S., J. LI, F. DU, L. SUN und Z. ZENG. Characteristics of Eddy Current Distribution in Carbon Fiber Reinforced Polymer [online]. Journal of Sensors, 2016, 2016, 1-8. ISSN 1687-725X. Verfügbar unter: doi:10.1155/2016/4292134
11. HONGU, T., K. KOYAMA und J. TORIUMI. Investigation of Eddy Current Nondestructive Testing for Carbon Fiber-Reinforced Plastic (CFRP) Based on Electromagnetic Field Analysis [online]. Journal of Mechanics Engineering and Automation, 2018, 8(3). ISSN 21595275. Verfügbar unter: doi:10.17265/2159-5275/2018.03.004
12. MIZUKAMI, K., Y. MIZUTANI, A. TODOROKI und Y. SUZUKI. Analytical solutions to eddy current in carbon fiber-reinforced composites induced by line current [online]. Advanced Composite Materials, 2016, 25(4), 385-401. ISSN 0924-3046. Verfügbar unter: doi:10.1080/09243046.2015.1052132