

Simulationsgestützte Auslegung von Sensoren für die Hochfrequenzwirbelstromprüfung an multiaxialen Kohlenstofffasergelegen

Till SCHULZE¹, Henning HEUER¹, Dirk HOFMANN¹, Jürgen MICHAUK¹,
Martin OEMUS¹, Christian PILZ¹, Matthias POOCH¹, Maren RAKE¹,
Martin SCHULZE¹

¹ Fraunhofer Institut für Keramische Technologien und Systeme, Dresden

Kontakt E-Mail: till.schulze@ikts.fraunhofer.de

Kurzfassung. Die zerstörungsfreie Prüfung mittels Wirbelstroms an gering elektrisch leitfähigen Bauteilen hat in den letzten Jahrzehnten enorm zugenommen. Mit der Möglichkeit Prüffrequenzen von mehreren Megahertz einzusetzen, wurden ideale Voraussetzungen geschaffen, um schwach elektrisch leitfähige Strukturen wie beispielsweise kohlenstofffaserbasierte Werkstoffe zu prüfen. Diese Materialien sind i.d.R. aus mehreren Schichten unterschiedlicher Faserorientierung aufgebaut, was inhomogene und anisotrope elektrische Leitfähigkeiten zur Folge hat. Die Auslegung und Fertigung von Sensoren zur Bewältigung dieser Herausforderungen sind die Aufgabenbereiche der Arbeitsgruppe Wirbelstromverfahren am Fraunhofer IKTS.

Statt die Dimensionierung der Wirbelstromsensoren aufwendigen und kostenintensiven empirischen Versuchsreihen zu überlassen, werden validierte Simulationsmodelle eingesetzt. Damit findet die Sensorauslegung mithilfe computergesteuerter Parameterstudien schneller, effizienter sowie günstiger statt und kann auf den jeweiligen Anwendungsfall genau angepasst werden.

In diesem Beitrag soll die simulationsgestützte Sensorentwicklung am Beispiel multiaxialer Kohlenstoffgelege vorgestellt werden. Neben der Charakterisierung dieser Strukturen hinsichtlich fehlender Fasern oder Abweichungen in der Faserorientierung sind vor allem die Erkennung von Defekten wie bei der Herstellung abgebrochene Nähnadeln oder eingenähte Ansammlungen loser Fasern Hauptaufgaben der Prüfung.

Der Beitrag stellt sowohl methodisch wie auch exemplarisch einen Ansatz vor, wie mit Simulationen die Anordnung von Sensoren, die Gestaltung von Spulengeometrien, die Auswahl von Prüffrequenzen und weiteren Parametern für multiaxialen Kohlenstofffasergelege erfolgen kann, um die nachzuweisenden Eigenschaften exakt zu lokalisieren und quantitativ zu beschreiben.

Einführung

Die steigenden Ansprüche an komplexen Bauteilen im Bereich der Automobilindustrie, Luft- und Raumfahrttechnik sowie im Bauwesen erfordern die Entwicklung leistungsfähiger Materialien bei möglichst geringem Gewicht und Bauraum. Carbonfaserverstärkter Kunststoff (CFK) hat sich hierbei als sehr vielversprechend herausgestellt. In vielen Industriezweigen mittlerweile etablierter Werkstoff stellt sich für CFK eine verlässliche Qualitätskontrolle nach wie vor als große Herausforderung dar.

Die zerstörungsfreie Prüfung mehrlagiger Lamine wird durch die starke Anisotropie und Inhomogenität der einzelnen Schichten erschwert. Als ein mögliches Verfahren zur Qualitätssicherung nach der Fertigung hat sich die Wirbelstromprüfung als besonders geeignet erwiesen [1].

Durch seine fast hundertjährige Historie vor allem bei der Analyse von Metallen haben sich im Bereich der Wirbelstromprüfung weltweite Kompetenzen aufgebaut. Mit der Möglichkeit zur Verwendung höherer Prüffrequenzen sowie das Einbringen mehrlagiger Spulen in Leiterplatten lässt sich das Verfahren mittlerweile auch auf schlecht elektrisch leitfähige Materialien wie CFK anwenden.

Die Auslegung entsprechender Sensoren basiert immer noch auf umfangreiche Erfahrungen sowie aufwendig durchgeführten, empirischen Versuchsreihen. An dieser Stelle können bereits elektromagnetische Simulation genutzt werden, um die Sensordimensionierung effizienter zu gestalten sowie zu besseren Designs zur Charakterisierung von CFK-Strukturen zu gelangen.

Den Schwerpunkt dieses Beitrages bilden die Herausforderungen bei Wirbelstromprüfungen an kohlenstofffaserbasierten Textilien. Dabei werden anhand von unterschiedlichen Beispielen aus dem industriellen Umfeld etablierte oder neuartige Simulationsmethoden vorgestellt und erläutert. Basierend auf diesen Erkenntnissen werden abschließend allgemeingültige Handlungsweisen zur Simulation der Wirbelstromprüfung an CFK abgeleitet und ein Ausblick auf zukünftige Entwicklungen gegeben.

1 Herausforderungen der Wirbelstromsimulation in CFK

1.1 Anisotropie von Kohlenstofffasern

Durch ihre stark anisotropen Eigenschaften müssen CFK-Strukturen belastungsgerecht in Bauteile integriert werden. Nur so können die enormen gewichtsspezifischen Steifigkeiten und Festigkeiten optimal ausgenutzt werden. Die anisotropen Eigenschaften beziehen sich allerdings nicht nur auf die Mechanik. Auch die elektrische Leitfähigkeit verhält sich in Richtung der Faser deutlich anders als quer dazu.

Während sich elektrische Wirbelströme in isotropen Materialien wie Metallen bei der Anregung durch eine Zylinderspule kreisförmig ausbreiten, verlaufen sie in einer Schicht von Kohlenstofffasern ellipsenförmig wie in Abbildung 1 zu sehen.

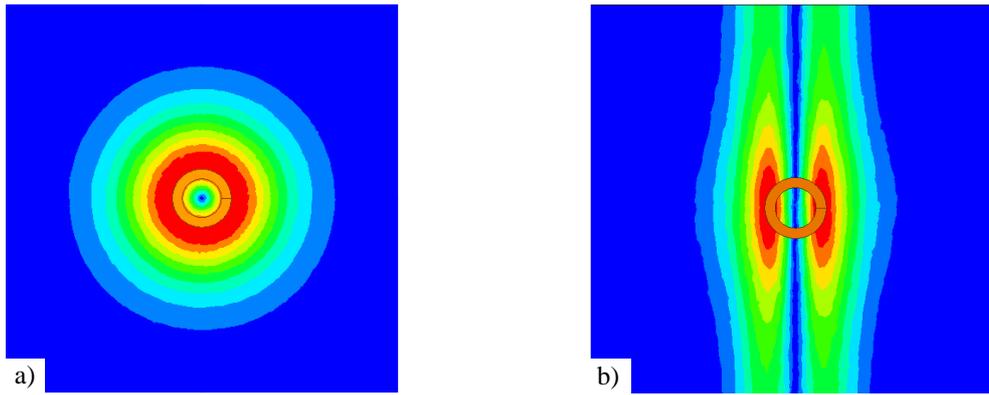


Abbildung 1: Wirbelstromausbreitung bei Anregung durch Zylinderspule a) isotropes b) anisotropes Material

Hinzu kommt eine vom Laminataufbau abhängige Wirbelstromausbreitung in Dickenrichtung. Am Beispiel der Eindringtiefe soll die Problematik bei der Auswahl der Prüffrequenz kurz erläutert werden.

In der Wirbelstromprüfung wird die Standardeindringtiefe δ als Länge definiert, bei der die Wirbelstromdichte auf rund 37% ihres Wertes an der Oberfläche gesunken ist. In Metallen wird sie mit folgender Formel berechnet:

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

Bei Kenntnis der magnetischen Permeabilität μ und elektrischen Leitfähigkeit σ , kann die Prüffrequenz f variiert werden, um eine gewünschte Eindringtiefe zu erreichen. So lassen sich bspw. Lunker in Gussteilen bis zu einer einstellbaren Tiefe erkennen oder Bleche nur auf Oberflächenrisse untersucht werden.

In CFK-Laminaten lässt sich die Standardeindringtiefe zumeist nur auf Grundlage von Erfahrungen oder durch Durchführung von aufwendigen Versuchsreihen abschätzen. So ermittelten Matvieieva et al. durch iterative Messungen individuelle Prüfparameter für verschiedene Sensortypen, bei denen in CFK eingebrachte Kupferfolien in unterschiedlichen Tiefen detektiert werden konnten [2]. Solche Versuchsreihen bilden eine gute Grundlage, um Einschätzungen zur Messfähigkeit eines Sensortyps an einem bestimmten mehrschichtigen Faserlaminat zu treffen. Damit ist es allerdings nur begrenzt möglich, allgemeine Aussagen abzuleiten. Bei anderen Strukturen wie bspw. ein neuer Schichtaufbau müssen häufig die Messungen wiederholt werden.

1.2 Geringe elektrische Leitfähigkeit von CFK

Zur Auslegung von Wirbelstromsensoren ist die Kenntnis der elektrischen Leitfähigkeit einer Struktur von hoher Bedeutung. Während diese bei Metallen meist in Tabellenbüchern gegeben oder durch Widerstandsmessungen einfach bestimmbar ist, stellt sich ihre Ermittlung in CFK-Strukturen als deutlich komplexer heraus. Abgesehen von der Ermittlung der Leitfähigkeit in drei Raumrichtungen müssen bei konsolidierten Verbänden die Eigenschaften der Matrix berücksichtigt werden [3].

Im Vergleich zu Metallen sind die Leitfähigkeiten von kohlenstofffaserbasierten Textilien um ca. den Faktor 10^3 niedriger in Faserrichtung und ca. um den Faktor 10^5 geringer quer dazu. Einer der Hauptgründe für die Anwendung der Wirbelstromprüfung bei diesen schwach leitfähigen Werkstoffen ist die Nutzung von Prüffrequenzen ab 1 MHz. Bei diesen Frequenzen bilden sich neben Leitungsströmen an Kreuzungspunkten von Fasern ebenfalls Verschiebungsströme aus, wobei die Matrix wie ein Kondensator zwischen nah beieinander liegenden Faser wirken kann [4].

Die Effekte der Verschiebungsströme mit ihren Einflüssen auf Messsignale müssen eingehend untersucht und verstanden werden, um eine zuverlässige Prüfung zu ermöglichen. Andererseits eröffnet sich so ein neues Anwendungsfeld der Wirbelstromprüfung. Bisher beschränkte sich die Wirbelstromprüfung nur auf schwach bis gut elektrisch leitfähige Bauteile. Lassen sich mit optimierten Sensoren bei sehr hohen Frequenzen auch Unterschiede in der Permittivität messen, können so Fehlstellen in nahezu nicht leitfähigen Materialien wie Kunststoffen nachgewiesen werden [5].

1.3 Inhomogenität in CFK-Strukturen

Metallische Werkstoffe sind i. d. R. homogene Materialien, wohingegen mehrlagige Textilien heterogene Eigenschaften aufweisen. Abbildung 2 zeigt den Querschnitt eines CFK-Laminats.

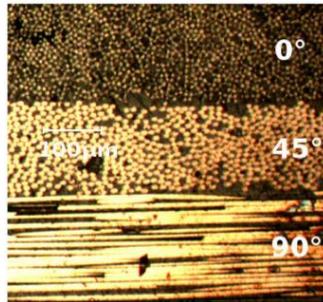


Abbildung 2: Querschnitt eines triaxialen kohlenstofffaserbasierten Laminates [5]

Zu erkennen sind ungleichmäßige Verteilungen der Filamente innerhalb der Schicht, sowie Faserabstände und Lücken zwischen den Schichten. In Abbildung 3 ist die bildbasierte Wirbelstromprüfung einer Aluminiumplatte mit zwei horizontalen Nuten und eines multiaxialen Kohlenstofffasergeleges dargestellt.

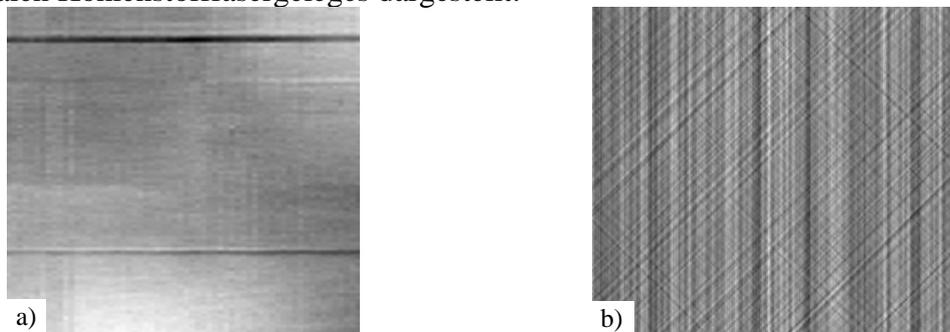


Abbildung 3: Wirbelstromscans a) Aluminiumplatte mit horizontalen Nuten b) Triaxiales Kohlenstofffasergelege

Während bei metallischen Prüfkörpern nur minimale Kontrastunterschiede u.a. durch Abhebeeffekte auftreten, werden bei Fasergelegen die Textur der einzelnen Lagen sichtbar. So können u. a. die Faserorientierungen von verdeckten Lagen sehr gut ermittelt werden.

Andererseits ist die Lokalisierung und Quantifizierung von Defekten, wie die deutlich sichtbaren Nuten innerhalb der Aluminiumplatte mit wenig Aufwand in der Bildverarbeitung möglich. Hingegen müssen bei der Detektion von Gassen zwischen strukturell bedingten Leitfähigkeitsunterschieden und tatsächlich fehlenden Fasern in den Wirbelstromprüfdaten differenziert werden.

1.4 Fehlstellen in kohlenstofffaserbasierten Textilien

Fehlstellen in CFK können sehr vielfältig sein. Gebrochene oder fehlende Fasern, eingnähte Ansammlungen loser Fasern oder Reste von Nähadeln sowie Winkelabweichungen der Faserorientierung sind nur einige der möglichen Quellen für eine potenziell erhebliche Senkung der mechanischen Steifigkeiten und Festigkeiten eines Verbundes.

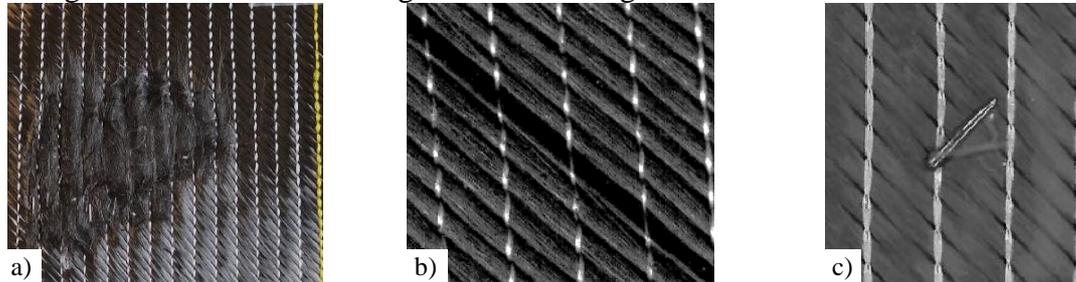


Abbildung 4: Ausgewählte Fehlstellen in Textilien aus Kohlenstofffasern a) Ansammlung loser Fasern
b) Gasse c) Abgebrochene Nähadel

Mit einem einzelnen Sensor und einer Parameterkonfiguration lassen sich nicht alle Defekte in Abbildung 4 gleich gut erkennen und quantifizieren. So ist die Gasse mit einem in Faserlage ausgerichteten Halbtransmissionssensor besser zu vermessen als mit einem Absolutsensor. Dafür wird der Absolutsensor größere Ansammlungen ungerichteter Fasern besser detektieren als ein Halbtransmissionssensor.

Grundsätzlich gibt es für den jeweiligen Anwendungsfall einen optimierten Sensor mit dazugehörigen Prüfparametern. Mit der Entwicklung von Wirbelstromsensorarrays [6] ist sogar ein Umschalten von Sensorkonfigurationen und Parametern während des Prüfprozesses im Bereich von Mikrosekunden möglich. So können sehr hohe Prüfgeschwindigkeiten erreicht und gleichzeitig mehrere Prüfeigenschaften des Textils bestimmt werden.

2 Lösungsansätze

2.1 Anisotropie

Moderne Simulationsumgebungen ermöglichen die Definition von anisotropen Materialien. Bei Kenntnis der elektrischen Leitfähigkeit in den drei Raumrichtungen lässt sich ein Leitfähigkeitstensor σ wie folgt aufstellen [7]:

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{\parallel} \cos^2 \theta + \sigma_{\perp} \sin^2 \theta & \frac{\sigma_{\parallel} - \sigma_{\perp}}{2} \sin(2\theta) & 0 \\ \frac{\sigma_{\parallel} - \sigma_{\perp}}{2} \sin(2\theta) & \sigma_{\parallel} \sin^2 \theta + \sigma_{\perp} \cos^2 \theta & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_t \end{pmatrix} \quad (2)$$

Hierbei sind die Leitfähigkeiten σ_{\parallel} in Faserrichtung, σ_{\perp} quer zur Faser und σ_t in Laminatdickenrichtung angegeben. Der Winkel θ gibt die Orientierung der Fasern an. Wird dieser Tensor jeder Schicht des Laminates zugewiesen, ergibt sich ein Materialmodell, das zur numerischen Berechnung der Wirbelstromausbreitung in kohlenstofffaserbasierten Materialien eingesetzt werden kann.

So lassen sich Verläufe der Wirbelstromdichte über die Tiefe der Prüfkörpers erstellen und daraus Prüfparameter ableiten, die für die jeweilige Struktur geeignet sind [8].

2.2 Der Umgang mit geringen elektrischen Leitfähigkeiten in der Simulation

Vor einer Wirbelstromprüfung an einem Material sollte ermittelt werden, ob der Verschiebungsstrom im Vergleich zum Leitungsstrom einen Einfluss auf das Messsignal hat. Sind die Eigenschaften der Matrix von Bedeutung ist vor allem die Permittivität eine entscheidende Größe, welche in die Simulation mit einbezogen werden muss. Da sie grundsätzlich frequenzabhängig ist, sollte sie als Funktion der Frequenz in die Materialdefinition implementiert werden.

Bei der Interaktion zwischen Faser und Matrix sollte zwischen dem jeweiligen Anwendungsfall unterschieden werden. Die Größe des Einflusses einer schlechte Faser-Matrix-Haftung auf das Messsignal, sollte auf der Meso-Ebene modelliert werden. Hingegen ist das Ablösen zwischen zwei Schichten im Laminat (Delamination) auf der Makro-Ebene zu simulieren.

2.3 Modellierung von inhomogenen Leitfähigkeiten

Unter Berücksichtigung der bisherigen Ausführungen lässt sich die Ausbreitung von Wirbelströmen in einem mehrschichtigen, anisotropen Materialmodell simulieren. Allerdings werden so die Leitfähigkeitsunterschiede, welche zur Sichtbarkeit der Fasertextur wie in Abbildung 3b führen, nicht deutlich. Die Möglichkeit, jede Faser einzeln zu modellieren, um über Fasergeometrie und den Abständen zueinander eine korrekte Struktur zu erreichen, ist ungeeignet. Die Elementanzahlen und Rechenzeiten einer solchen Simulation wären unverhältnismäßig und für den industriellen Gebrauch nicht tauglich.

Stattdessen kann der Leitfähigkeitstensor aus Gleichung (2) erweitert und anstelle eines konstanten Wertes für σ eine ortsabhängige, periodische Funktion eingesetzt werden [9].

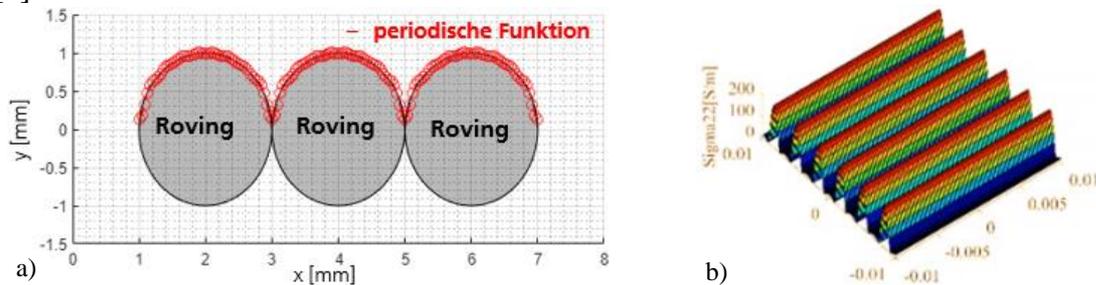


Abbildung 5: Modellierte Funktion der elektrischen Leitfähigkeit a) Querschnitt von Rovings b) auf Schicht erweitert [9]

Die maximal und minimal auftretenden Leitfähigkeiten können durch Messungen abgeschätzt werden, da an verschiedenen Messpunkten meist unterschiedliche Werte aufgenommen werden.

Durch diese Art der Modellierung wird die Elementanzahl drastisch reduziert, was die Rechenzeit deutlich verringert. Des Weiteren können somit auf inhomogene Strukturen ausgelegte Sensoren besser und effizienter optimiert werden.

2.4 Optimieren des Sensordesigns zur Detektion von Defekten

In einer Simulationsumgebung sollten sich die unter 1.4 beschriebenen Defekte modellieren und deren Einfluss auf das Sensorsignal nachvollziehen lassen. Mittels Parameterstudien und Sensitivitätsanalysen können dann Sensoreigenschaften optimiert werden, um das Signal zwischen störfreien und fehlerbehafteten Bereich zu maximieren. Mit den Informationen aus den bisherigen Ausführungen wird im Folgenden beispielhaft das Modell eines biaxialen Laminates aus Kohlenstofffasern mit einem Halbtransmissionssensor simuliert.

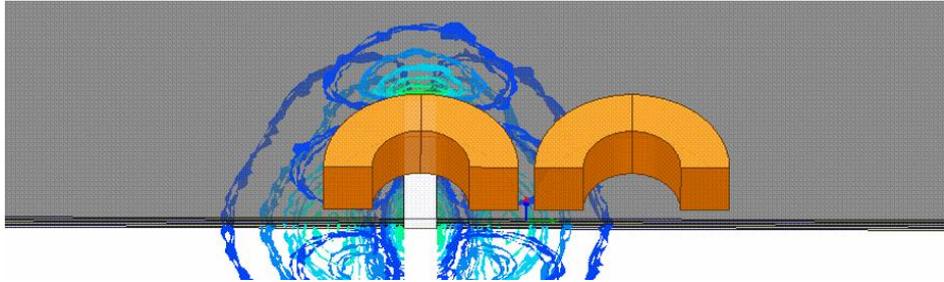


Abbildung 6: Wirbelstromausbreitung in einem biaxialen (0°|90°) CFK-Laminat mit 1mm breiter Gasse und Halbtransmissionssensor

Durch den Aufbau eines halbsymmetrischen Modells kann die Elementanzahl halbiert werden, während die Ergebnisse konstant bleiben. Simuliert wird die induzierte Spannung in der Empfängerspule, die auch in der Praxis gemessen wird [10].

Bei einer klassischen Halbtransmissionsmessung einer Flächenstruktur fährt ein Wirbelstromsensor auf definierten Bahnen das Bauteil ab und nimmt in bestimmten Abständen Messwerte auf. In der Simulation wird das Verfahren invertiert, sodass die Gasse sich unter dem feststehenden Sensor hinweg bewegt, was auch als virtuelles Scannen bezeichnet wird [9].

Als Parameter soll exemplarisch der Abstand zwischen Sende und Empfängerspule variiert werden, wobei sich beide Spulen bei einem Abstand von 0 mm direkt nebeneinander befinden. In Abbildung 7 ist die normierte induzierte Spannung als Funktion der Gassenposition und des Sensorabstandes sowie die Amplitudendifferenzen für jeden Spulenabstand dargestellt.

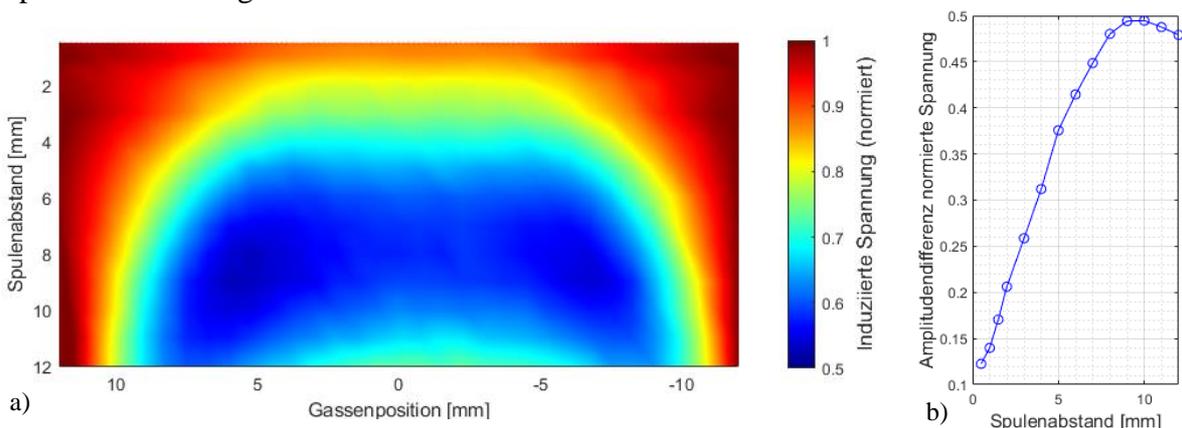


Abbildung 7: Sensorverhalten beim Scannen einer Gasse in Abhängigkeit des Sensorabstandes a) Normierte induzierte Spannung b) Amplitudendifferenzen der normierten Spannung

Liegt die Gasse im Einflussbereich der Sendespule (ca. ± 10 mm) sinkt aufgrund der lokal geringeren elektrischen Leitfähigkeit die induzierte Spannung der Empfängerspule. Ein Spulenabstand von ca. 10 mm sollte demnach optimal sein, um eine Gasse zu erkennen, da die Signaldifferenz für diesen Wert am größten ist.

Zu beachten ist allerdings, dass das nicht-normierte Spannungssignal bei einem Sensorabstand von 10 mm um den Faktor 10 geringer ist, als wenn sich die Spulen direkt nebeneinander befinden. In der Praxis führen die dafür notwendigen Signalverstärkungen zu unerwünschten Effekten, wie u.a. Rauschen. Daher muss bei der Variation von Simulationsparametern immer deren praktische Umsetzung berücksichtigt werden.

3 Zusammenfassung der Simulationsmethoden und Ausblick

Mithilfe von Simulationsmodellen können viele Problemstellungen der Wirbelstromprüfung an CFK erfasst und Lösungen gefunden werden. Einige Voraussetzungen und Herangehensweisen sind in folgender Liste zusammengefasst:

- Materialparameter, wie die anisotrope elektrische Leitfähigkeit und evtl. Permittivität müssen so genau wie möglich bestimmt werden
- Bevor ein Simulationsmodell eines einfachen Faserlaminates auf ein komplexes Bauteil erweitert wird, sollte es durch Messungen validiert werden
- Zur Umsetzung der Inhomogenität reduziert die Verwendung ortsabhängiger periodischer Funktionen für die elektrische Leitfähigkeit die Elementanzahl erheblich statt der Modellierung jeder einzelnen Faser
- Wenn es die Geometrie des Prüfobjektes erlaubt, sollten vereinfachte symmetrische Modellaufbauten für Elementreduzierungen genutzt werden
- Genau wie ein Sensor sollte ein Simulationsmodell für einen bestimmten Anwendungsfall ausgelegt sein. Statt der Anpassung eines validierten Modells an signifikante Änderungen der Bauteilgeometrie oder Art der zu untersuchenden Defekte ein neues Modell erstellt werden.
- Die Variation von Simulationsparametern sollte immer unter Berücksichtigung der praktischen Umsetzbarkeit erfolgen

In diesem Beispiel wurde exemplarisch die Variation des Spulenabstandes zur Maximierung des Signals infolge des Auftretens einer Gasse in der Struktur durchgeführt. Des Weiteren können Spulendurchmesser, Prüffrequenz oder Liftoff ebenso parametrisiert werden.

Neben der Optimierung von Sensordesign und Prüfparametern können Simulationen auch für weitere Aufgaben eingesetzt werden. Aus den modellierten Signalverläufen können mathematische Vorschriften entwickelt werden, die aus realen Signalverläufen die exakte Position und Breite einer Gasse bestimmen.

Referenzen

- [1] MERSCH, J.: Entwicklung eines zerstörungsfreien Verfahrens für die Qualitätssicherung imprägnierter Carbonfasergarne für Carbonbetonanwendungen. Dresden, Technische Universität Dresden, Diplomarbeit, 2017, Dresden: 2017.
- [2] MATVIEIEVA, N.; SCHULZE, M.; MIZUKAMI, K.; KHARABET, I.; HEUER, H.: Determination of Indication Depths at High Frequency Eddy Current Testing of CFRP, (2018).
- [3] ZHAO, Q.; ZHANG, K.; ZHU, S.; XU, H.; CAO, D.; ZHAO, L.; ZHANG, R.; YIN, W.: Review on the Electrical Resistance/Conductivity of Carbon Fiber Reinforced Polymer. Applied Sciences 9(2019)11, S. 2390.
- [4] MOOK, G.; LANGE, R.; KOESER, O.: Non-destructive characterisation of carbon-fibre-reinforced plastics by means of eddy-currents. Composites Science and Technology (2001), S. 865–873.
- [5] JOAS, S.: Zur Hochfrequenz-Wirbelstromprüfung kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe. Stuttgart, Institut für Kunststofftechnik der Universität Stuttgart, 2021, Stuttgart: 2021.
- [6] Norm 20339:2017 August 2017. Zerstörungsfreie Prüfung – Technische Ausrüstung für die Wirbelstromprüfung – Kenngrößen von Sensorarrays und deren Verifizierung.
- [7] CHENG, J.; JI, H.; QIU, J.; TAKAGI, T.; UCHIMOTO, T.; HU, N.: Novel electromagnetic modeling approach of carbon fiber-reinforced polymer laminate for calculation of eddy currents and eddy current testing signals. Journal of Composite Materials 49(2015)5, S. 617–631.
- [8] XU, X.; DAL, T.; LUO, J.; YAN, Y.; QIU, J.: Propagation characteristics of electromagnetic field penetrated into laminated CFRPs using eddy current testing with pancake coil. Composite Structures 303(2023), S. 116378.
- [9] YI, Q.; WILCOX, P.; HUGHES, R.: Modelling and evaluation of carbon fibre composite structures using high-frequency eddy current imaging. Composites 248(2023).
- [10] STROPPE, H.; SCHIEBOLD, K.: Wirbelstrom-Materialprüfung, Wuppertal: Castell-Verlag, 2012. - ISBN 978-3-934255-49-4.