

Maßgeschneiderte Hochfrequenz- Wirbelstromsonden zur Detektion von Kohlenstofffasern

Jonas HUFERT¹, Sebastian JOAS¹, Marc KREUTZBRUCK¹

¹ Institut für Kunststofftechnik, Universität Stuttgart, Stuttgart

Kontakt E-Mail: jonas.hufert@ikt.uni-stuttgart.de

Kurzfassung. Als zerstörungsfreies Prüfverfahren hat sich die Wirbelstromprüfung bereits etabliert, um oberflächennahe Defekte in leitfähigen Werkstoffen kosteneffizient zu detektieren. Zur Prüfung von nur schwach leitfähigen Werkstoffen wie CFK mit einigen kS/m müssen höhere Prüffrequenzen (>1 MHz) verwendet werden, um messbare Wirbelströme im Prüfkörper zu induzieren. Hierdurch wird die Nachweisempfindlichkeit von Kohlenstofffasern gesteigert und im Grenzfall sogar die Detektion von Defekten in Isolatoren durch Nachweis von Verschiebungsströmen möglich. Der Frequenzbereich von Wirbelstromsonden wird jedoch maßgeblich durch deren Resonanzfrequenz limitiert. Um also eine Wirbelstromprüfung an schwach leitfähigen Werkstoffen durchzuführen, müssen hierzu die verwendeten Wirbelstromsonden an die vorherrschenden Prüfgegebenheiten angepasst sein.

In dieser Arbeit wird ein Reverse-Engineering-Ansatz gewählt, um für ein Wirbelstromprüfgerät der Rohmann GmbH Wirbelstromsonden zu konstruieren, die einen Frequenzbereich bis zu 30 MHz besitzen. Zunächst werden kommerzielle Wirbelstromsonden analysiert und auf Basis einer analytisch berechneten Resonanzfrequenz Spulen designt. Die Spulen werden in 3D gedruckte Gehäuse eingebettet und ihre elektrischen Eigenschaften vor dem Einsatz am Wirbelstromprüfgerät mit Hilfe eines Funktionsgenerators und Oszilloskops überprüft. Die experimentelle Charakterisierung der Wirbelstromsonden erfolgt an Prüfkörpern mit aufgeklebten Kohlenstofffaserbündeln, die unterschiedliche Faseranzahlen besitzen. Es konnte gezeigt werden, dass eine auf Empfindlichkeit optimierte Sonde in der Lage ist, zwei Einzelfasern zuverlässig und reproduzierbar nachzuweisen. Die in Versuchen geringste nachweisbare Faseranzahl der zur Verfügung stehenden kommerziellen Sonden liegt hingegen bei 117. Die Werkstoffprüfung an Isolatoren durch die maßgeschneiderten Hochfrequenz Wirbelstromsonden soll zukünftig durch weitere Steigerung der real erreichbaren Resonanzfrequenzen ermöglicht werden und dadurch die Lücke bis zur Mikrowellenprüfung in der GHz-Region schließen.

1. Einleitung

Kunststoffe sind als Werkstoff aus dem Alltag längst nicht mehr wegzudenken. Ihre Werkstoffeigenschaften wie beispielsweise ein niedriger Schmelztemperaturbereich von ca. 160 °C bis über 400 °C für verschiedene Thermoplasten [1] verglichen mit Stahl von ca. 1.500 °C [2] ermöglichen es, Produkte herzustellen, welche kostengünstig, energieeffizient und nachhaltig sind. Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) können den E-Modul von Stahl, der im Bereich von 210 GPa liegt, erreichen und gleichzeitig das Flächengewicht auf



ein Fünftel, was in etwa $1,5 \text{ kg/m}^2$ entspricht reduzieren [3]. Das große Potenzial der faserverstärkten Kunststoffe für den Leichtbau wird dadurch deutlich. In Branchen, in denen neben den bereits genannten Attributen die Qualität und vor allem die Sicherheit eines Produkts eine große Rolle spielt, sind diese durch die Qualitätskontrolle sicherzustellen. Die Qualitätskontrolle umfasst dabei zahlreiche Verfahren, um die Produkte auf eventuelle Fehler zu überprüfen.

Eines dieser Verfahren für elektrisch leitfähige Werkstoffe ist die Wirbelstromprüfung, welche als Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung sowohl bereits in der Produktion zur Qualitätskontrolle der Fertigung [4], aber auch während einer Revision zum Einsatz kommen kann [5].

2. Grundlagen der Wirbelstromprüfung von CFK

Die ersten Wirbelstromprüfungen an kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen wurden in den 1970er Jahren durchgeführt [6]. Die Anisotropie des Werkstoffs hat dabei erheblichen Einfluss auf die Ausbreitung von Wirbelströmen im Werkstoff, da die Kohlenstofffasern im Vergleich zum Matrixwerkstoff einen vielfach höheren elektrischen Leitwert besitzen. Dementsprechend sind die Ausbreitungen der Wirbelströme stark von der Faserrichtung abhängig. [7]

Seit 2010 sind hochaufgelöste Analysen mit Wirbelstromsystemen an kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen möglich. Das Abtasten eines auf einem Messtisch positionierten Prüfkörpers mit einer Wirbelstromsonde generiert C-Scans, die bei geeigneter Prüfparameterwahl die Faserverläufe darstellen können. [8] Dadurch ist es möglich Lege- und Lagefehler in kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen zu detektieren [9]. Rotierende Sonden ermöglichen es darüber hinaus Faserorientierungen zu visualisieren ohne den Prüfkörper zu bewegen. Zudem sind damit Faserbrüche, Delaminationen, Impactschäden und Matrixanhäufungen detektierbar. [10] Die nötigen Parameter zu Herstellung dieser Wirbelstromsonden werden selten zur Verfügung gestellt.

2.1 Wirbelstromsonden

Wirbelstromsonden lassen sich unterschiedlich kategorisieren. Zum einen können sie entsprechend der Anordnung der Sende- und Empfangseinheit in Reflexions- und Transmissionssonden unterteilt werden [11]. Zum anderen können sie ihrer Verschaltungsart nach in parametrische, transformatorische oder brückenverschaltete Wirbelstromsonden klassifiziert werden [12]. Die Messwertgewinnung bietet ebenfalls die Möglichkeit Wirbelstromsonden in Absolutsonden, kompensierte Absolutsonden und Differenzsonden zu kategorisieren [11].

Alle Wirbelstromsonden haben gemein, dass sie in der Sendeeinheit aus einem Spulensystem bestehen, um das sogenannte Primärmagnetfeld, dessen Aufgabe es ist, den Prüfkörper zu durchfluten, auszubilden. Reale Spulen bestehen in ihrem Ersatzschaltbild aus der Parallelschaltung einer idealen Induktivität, idealen Kapazität und einem ohmschen Widerstand. Diese aus idealen Bauteilen resultierende reale Spule stellt entsprechend einen Parallelschwingkreis dar. Jeder Parallelschwingkreis besitzt eine charakteristische Resonanzfrequenz, die den Einsatzfrequenzbereich der Wirbelstromsonde nach oben hin limitiert, da bei Spulen induktive Effekte lediglich unterhalb der Resonanzfrequenz den kapazitiven Effekten überwiegen. Die Resonanzfrequenz f_{res} eines Schwingkreises hängt im Wesentlichen von den beiden Faktoren Induktivität L und Kapazität C nach [13] ab. Die Berechnung der Resonanzfrequenz f_{res} erfolgt durch folgende Gleichung unter der Bedingung, dass der ohmsche Leitungswiderstand der Spule sehr klein ist: [13]

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Eine möglichst hohe Resonanzfrequenz hat nicht nur den Vorteil, dass der Bereich der Einsatzfrequenz möglichst groß ist, sondern dass mit steigender Frequenz auch entsprechend dem Faraday'schen Gesetz höhere Wirbelstromdichten induziert werden können [14]. Diese können beide unter gewissen Annahmen analytisch berechnet werden. Für die Induktivität von Zylinderspulen gilt nach [15] folgende Gleichung:

$$L = n^2 \mu_0 \mu_r \frac{\pi}{4} \frac{D_K^2}{1 + 0,45 \frac{D_K}{l}}$$

In dieser Gleichung ist n die Windungszahl, D_K der Spulenkerndurchmesser und l die Spulenlänge. Für die Kapazität von orthozyklisch gewickelten Zylinderspulen mit zwei Lagen gilt nach [13] im ungünstigsten Fall folgende Gleichung:

$$C = \frac{2}{3} \epsilon_0 \frac{n}{2} \pi \left(D_K + d_D \left(1 + \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right) Y$$

In dieser Gleichung ist d_D der Spulendrahtdurchmesser. Zur Berechnung der Kapazität aus physikalisch messbaren Größen werden darüber hinaus noch Hilfsfaktoren nach [13] benötigt. Diese setzen sich zum Hilfsfaktor Y zusammen.

Aus den drei angegebenen Gleichungen ist die Proportionalität der Windungszahl n und des Spulenkerndurchmessers D_K zur Induktivität L und Kapazität C der Spule ersichtlich. Jedoch wird auch der Einfluss auf die Resonanzfrequenz deutlich. Diese verringert sich durch eine Vergrößerung der Windungszahl und des Spulenkerndurchmessers.

3. Versuchsdurchführung

3.1 Prüfstand und Messablauf

Der zur Anwendung kommende Prüfstand besteht aus einem XY-Messtisch, der mit Schrittmotoren verfahren werden kann, dem Wirbelstromprüfgerät PL600 der Rohmann GmbH, Frankenthal, Deutschland, sowie einem Computer zur Initialisierung der Messungen mithilfe der Software LayoutManager der Rohmann GmbH und zur Datenspeicherung mithilfe der Software ScanAnalyzer der Rohmann GmbH. Das Wirbelstromprüfgerät besitzt im Vergleich zur Basisausstattung ein erweitertes Prüffrequenzspektrum, welches bis zu 30 MHz reicht.

Zu Beginn jeder Messreihe wird zunächst der Prüfstand gemäß [16] initialisiert. Alle Messungen werden für jede verwendete Wirbelstromsonde identisch durchgeführt. Der XY-Messtisch bewegt hierzu den Prüfkörper mäanderförmig vor der Wirbelstromsonde. Zur Lift-off-Vermeidung finden alle Messungen mit im Schleifkontakt befindlichen Sonden statt. Die Kontrolle des permanenten Schleifkontakts erfolgt visuell.

3.2 Charakterisierung der Nachweisempfindlichkeit

Zur Charakterisierung der Wirbelstromsonden werden Prüfungen an Kohlenstoff-faserbündeln mit definierten Faseranzahlen durchgeführt. Auf diese Weise soll gezeigt werden, bis zu welcher Mindestfaseranzahl an Kohlenstofffasern eine sichere Detektion mit den Wirbelstromsonden möglich ist. Durch die ermittelte Mindestfaseranzahl wird festgelegt, welche Anzahl an Einzelfasern mindestens zur Defekterkennung nötig ist.

Die dafür angefertigten Prüfkörper bestehen aus Polypropylen(PP)-Folie, auf die Kohlenstofffasern mit Kreppband aufgeklebt wurden. Es handelt sich hierbei um Endlosfasern des Typs Sigrafil C T50-4.0/240-T140 der Firma SGL Carbon, Wiesbaden, Deutschland. Der mittlere Faserdurchmesser ist mit 6 µm angegeben. Die Dicke der Folie und des Kreppbands beträgt jeweils ca. 100 µm. Die Prüfkörper bestehend aus drei Folien (grau) sind mit den aufgeklebten Kohlenstofffasern (schwarz) idealisiert in Abbildung 1 dargestellt.

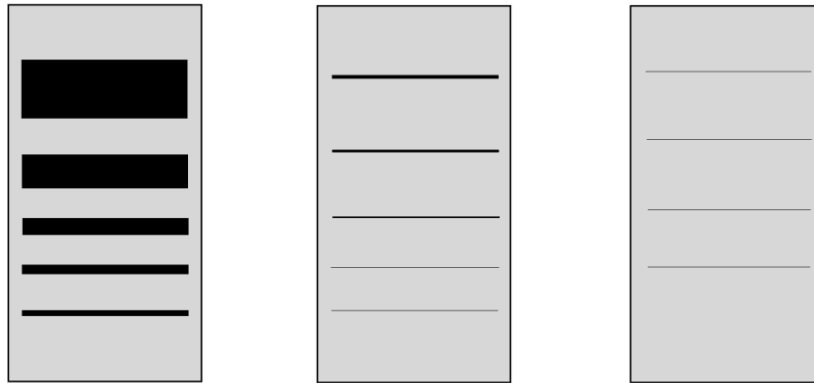


Abb. 1: Prüfkörper zur Nachweisempfindlichkeit

Die Kohlenstofffaserbündel besitzen unterschiedliche Faseranzahlen. Die Faseranzahlen sind entsprechend ihren zugeordneten PP-Folien für alle Faserbündel in Tabelle 1 analog zur Abbildung 1 aufgelistet. Die hervorgehobenen Zahlen repräsentieren die durch CT-Rekonstruktion und Mikroskopie ermittelten mittleren Faseranzahlen. Die übrigen Faseranzahlen sind darauf basierende Schätzungen.

Tabelle 1: Faseranzahlen des Prüfkörpers zur Nachweisempfindlichkeit von Kohlenstofffasern

Faseranzahl PP-Folie 1	Faseranzahl PP-Folie 2	Faseranzahl PP-Folie 3
30034	939	29
15017 ± 756	469	15
7509	235	7
3754	117	2
1877	59	

Zur Vermeidung des Lift-off-Effekts werden alle Prüfkörper von der Folienseite aus mit, wie bereits erwähnt, im Schleifkontakt befindlichen Wirbelstromsonden gescannt. Daraus folgt ein konstanter Lift-off von ca. 100 µm. Die Prüffrequenz wird innerhalb des für die jeweilige Wirbelstromsonde zulässigen Prüffrequenzbereichs variiert, um die optimale Prüffrequenz für ein möglichst hohes Signal-Rausch-Verhältnis (siehe Kapitel 3.4) zu nutzen.

3.3 Messtechnische Analyse der Wirbelstromsonden

Alle gefertigten Wirbelstromsonden werden drei unterschiedlichen Untersuchungen zur Verifikation der Betriebssicherheit und der errechneten elektrischen Eigenschaften unterzogen bevor sie am Wirbelstromprüfgerät Verwendung finden.

Zunächst wird eine rein ohmsche Messung des Widerstands jedes Spulensystems, aufgeteilt in Sendeeinheit und Empfangseinheit, durchgeführt. Hierdurch wird eine schnelle und sichere Überprüfung der Verschaltung der Spulensysteme an den Anschlüssen des Steckers gewährleistet.

Die zweite Messung dient der Überprüfung der errechneten Resonanzfrequenz der einzelnen Spulen und des jeweiligen Spulensystems (adaptiert aus [17]). Hierzu wird die zu messende Spule durch einen Funktionsgenerator mit einer Rechteckspannung, deren Frequenz mehrere Potenzen unterhalb der errechneten Resonanzfrequenz liegt, in Schwingung versetzt. Bis zum Abklingen der erzwungenen Schwingung schwingt die Spule mit ihrer Eigenresonanzfrequenz, die mit angeschlossenem Oszilloskop überwacht wird. Die Resonanzfrequenz der Spule mit der niedrigsten Resonanzfrequenz in einer Wirbelstromsonde limitiert den Einsatzbereich der Sonde.

3.4 Quantitatives Bewertungskriterium der Wirbelstromsonden

Um eine Vergleichbarkeit zwischen den unterschiedlichen Wirbelstromsonden zu ermöglichen, muss eine einheitliche Bewertungsrichtlinie festgelegt werden. Dazu ist es zweckmäßig eine quantifizierende Größe zu nutzen. Für diese quantifizierende Größe eignet sich das Signal-Rausch-Verhältnis, englisch Signal-to-Noise-Ratio (SNR), das nach Hidalgo-Gato [18] wie folgt berechnet werden kann:

$$SNR = 20 \log_{10} \left(\frac{|S - N|}{\sigma_{st}} \right)$$

In dieser Gleichung beschreibt S den Maximalwert des Signals, N den Durchschnittswert des Rauschens und σ_{st} die Standardabweichung des Rauschens, was bis auf den Maximalwert des Signals [18] entspricht. Der Wert des Signals muss aufgrund der durchgeführten eindimensionalen Messung im Vergleich zur zweidimensionalen Messung in [18] adaptiert werden. Zur Berechnung des SNR-Werts werden aus diesem Grund die Beträge der Messergebnisse der Wirbelstromprüfung zugrunde gelegt. Für jede Fehlstelle wird aus dem Maximalwert der Fehlstelle und des darauffolgenden Rauschens an defektfreier Stelle der SNR-Wert berechnet.

4. Ergebnisse und Diskussion

4.1 Charakterisierung kommerzieller Wirbelstromsonden

Insgesamt werden vier für die Prüfung von CFK geeignete kommerzielle Wirbelstromsonden untersucht, allerdings wird an dieser Stelle nur auf eine eingegangen. Die Kontaktierung des vierpoligen Steckers kann durch ohmsche Messungen nachvollzogen werden.

Der maximal erzielbare SNR-Wert bei der geringsten nachweisbaren Faseranzahl von 117 Einzelfasern liegt bei knapp über 15 dB bei einer Prüffrequenz von 2 MHz für Wirbelstromsonde „EC-AT-HF“, die in der Hochfrequenzversion des EddyCation-Kits erhältlich ist.

4.2 Konzeptentwicklung

Alle entwickelten Wirbelstromsonden sollen mit dem vorhandenen Prüfstand kompatibel sein, weshalb ausschließlich Reflexions- und Halbtransmissionssonden in Betracht gezogen werden. Es werden insgesamt sieben Wirbelstromsonden ausgelegt, gefertigt, aufgebaut und getestet. Es wird jedoch im Folgenden exemplarisch nur auf die Wirbelstromsonde näher eingegangen, die den höchsten SNR-Wert bei der geringsten nachweisbaren Faseranzahl erreicht hat.

4.3 Auslegung

Hauptkriterium der konstruierten Wirbelstromsonden ist es, die Nachweisempfindlichkeit von Schwankungen in Kohlenstofffaserkonzentrationen zu steigern. Dies kann durch ein rauscharmes Antwortsignal erreicht werden, wofür ein starkes Primärmagnetfeld die Grundlage bildet. Um ein möglichst starkes Primärmagnetfeld zu erzeugen, kann die Anregungsfrequenz hoch gewählt werden. Damit die Wirbelstromsonde jedoch noch induktiv arbeitet, wird für die elektrische Auslegung dieser eine möglichst hohe berechnete Resonanzfrequenz angestrebt.

Die Faktoren, die für die Resonanzfrequenz eine Rolle spielen wurden bereits in Kapitel 2.1 thematisiert. Darauf aufbauend werden verschiedene Wirbelstromsonden ausgelegt, wobei an dieser Stelle nur auf eine eingegangen wird. Im Fall von dieser Eigenbausonde handelt es sich um eine Absolutsonde, die transformatorisch verschaltet und in Reflexion von einer Werkstückseite aus prüft. Sie besitzt eine zehn Windungen umfassende Sendespule, die auf einen Polyactid (PLA)-Zylinderkern mit einem Durchmesser von 20 mm aufgebracht ist. Das Empfangsspulensystem besteht aus zwei entgegengesetzten Wicklungen, die koaxial zueinander, sowie zur Sendespule auf einem Ferritstab ($\mu_r = 2.300$) mit 5 mm Durchmesser angeordnet sind. Die Empfangsspule umfasst sechs Windungen, die Kompensationsspule zwölf Windungen. Der mittlere Spulenabstand der Empfangsspule zur Kompensationsspule sowie die Windungszahl der Kompensationsspule wird bei der Fertigung, auf die in Kapitel 4.4 eingegangen wird, experimentell durch eine möglichst niedrige induzierte Spannung im Empfangsspulensystem bestimmt. Hierfür wird die Sendespule wenige Kilohertz unterhalb der niedrigsten Resonanzfrequenz der Wirbelstromsonde mit der bei dieser Frequenz maximal zulässigen elektrischen Spannung betrieben.

Die aus der analytischen Berechnung resultierende theoretische Resonanzfrequenz der Eigenbausonde beträgt für die Sendespule 18,3 MHz und für die Empfangsspule ohne die Kompensationswicklung 3,5 MHz.

4.4 Fertigung der Eigenbausonde

Auf Grundlage der im vorherigen Kapitel erarbeiteten Dimensionierung wird die Wirbelstromsonde gefertigt. In Abbildung 2 ist die dreidimensionale Explosionszeichnung der Eigenbausonde abgebildet, deren 3D-gedrucktes Gehäuse dreiteilig ausgeführt ist.

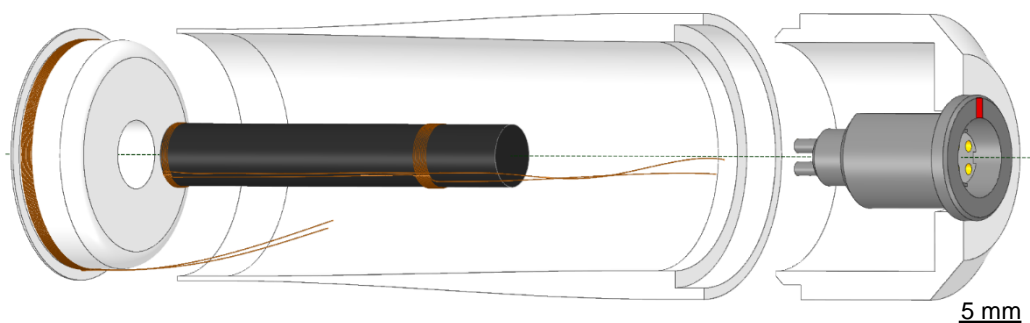


Abb. 2: Explosionszeichnung Eigenbausonde

In Abbildung 2 ist rechts der Gehäusedeckel mit montiertem Stecker abgebildet. Dieser wird mit dem Mittelteil des Gehäuses mit Sekundenklebstoff verklebt. Links ist der Sendespulenkern mit der Durchgangsbohrung für den Ferritstab des Empfangsspulensystems abgebildet.

Sowohl die Sende- als auch die Empfangsspule sind als Linksschrauben gewickelt. Lediglich die in Abbildung 2 dargestellte Kompensationswicklung (Spule rechts um den

schwarzen Ferritstab) ist als Rechtsschraube ausgeführt. Um die Eigenbausonde zu kompensieren, muss die Kompensationswicklung auf dem Ferritstab nach dem Wickeln positionsvariabel ausgeführt werden. Dazu wurde ein dünner Klebestreifen aus PP-Folie mit der Haftseite nach außen um den Ferritstab geklebt, sodass der Klebestreifen axial verschiebbar bleibt. Auf dem Klebestreifen wird die Kompensationswicklung mit zwölf Windungen aufgebracht und nach abgeschlossener Kompensation samt Klebestreifen auf dem Ferritstab dauerhaft fixiert. Der Spulenmittenabstand zwischen Empfangs- und Kompensationsspule beträgt 26,5 mm. Das Vorgehen zur Kompensation wird im Kapitel 4.5 beschrieben.

4.5 Erprobung der Eigenbausonde und Qualitätssicherung

Zur Messung der Resonanzfrequenz wird wie in Kapitel 3.3 beschrieben vorgegangen. Bei der Eigenbausonde ergibt sich für die Sendespule eine Resonanzfrequenz von 10,9 MHz und für das Empfangsspulensystem von 8,8 MHz. Da die niedrigste gemessene Resonanzfrequenz entgegen der Erwartung oberhalb der niedrigsten berechneten Resonanzfrequenz liegt, wird für die Eigenbausonde die niedrigste berechnete Resonanzfrequenz (3,5 MHz) als obere Grenzfrequenz festgelegt.

Zur Kompensation der Empfangsspule wird die entgegengesetzt gewickelte Kompensationsspule bei einer Anregungsfrequenz der Sendespule von 3 MHz auf dem Ferritstab so positioniert, dass die im Empfangsspulensystem induzierte Spannung minimal wird. Die Eigenbausonde weist eine Kompensation um 72 % der induzierten Spannung bezüglich der nichtkompensierten Vergleichssonde bei 3 MHz auf.

4.6 Ermittlung der Nachweisempfindlichkeit

Durch die Prüfung der Nachweisempfindlichkeit von Kohlenstofffasern soll die jeweilige Sonde näher charakterisiert werden. Hauptaugenmerk liegt dabei vor allem auf dem SNR-Wert der geringsten nachweisbaren Faseranzahl der Sonde. Die geringste nachweisbare Faseranzahl der kommerziellen Wirbelstromsonde beträgt 117 Fasern. Im Gegensatz dazu ist es mit der Eigenbausonde möglich zwei Einzelfasern sicher zu detektieren. Entscheidend ist jedoch dabei die Wahl der Prüffrequenz, da die erzielbaren SNR-Werte deutlich von dieser abhängig sind. Generell ist festzustellen, dass für die beiden exemplarisch verglichenen Wirbelstromsonden hohe Prüffrequenzen höhere SNR-Werte erzielen. Die Eigenbausonde wurde zudem auch oberhalb der festgelegten Maximalfrequenz betrieben, da die gemessenen Resonanzfrequenzen der einzelnen Spulen oberhalb der niedrigsten berechneten Resonanzfrequenz lagen. Allerdings konnte gezeigt werden, dass dieser Frequenzbereich kleinere SNR-Werte als der festgelegte Frequenzbereich liefert. In Tabelle 2 sind die SNR-Werte bei für die jeweilige Sonde optimaler Prüffrequenz dargestellt.

Tabelle 2: Nachweisempfindlichkeit bezüglich der optimalen Prüffrequenz

Wirbelstromsonde	Geringste nachweisbare Faseranzahl	Prüffrequenz	SNR-Wert
kommerzielle Wirbelstromsonde	117	2 MHz	15,1 dB
Eigenbausonde	2	2,5 MHz	13,9 dB

Zum Vergleich der kommerziellen und der konstruierten Wirbelstromsonde sind in Abbildung 3 die Beträge der induzierten Spannungen über der Bahnposition während des Linien-Scans des Prüfkörpers PP-Folie 2 mit 939 Fasern bis 59 Fasern (markiert durch Kästchen) dargestellt. Es sind jeweils deutlich fünf Maxima zu erkennen, wobei beim Maximum von 59 Fasern (rechts oben) der SNR-Wert aufgrund der ungenügenden

Abgrenzung zwischen Signal und Rauschen nicht verlässlich für die kommerzielle Wirbelstromsonde berechnet werden konnte. Aus diesem Grund wird die minimal nachweisbare Faseranzahl auf 117 für die kommerzielle Wirbelstromsonde festgelegt. Die Eigenbausonde hingegen weist fünf deutlich separierbare Maxima mit dadurch höherem SNR-Wert auf.

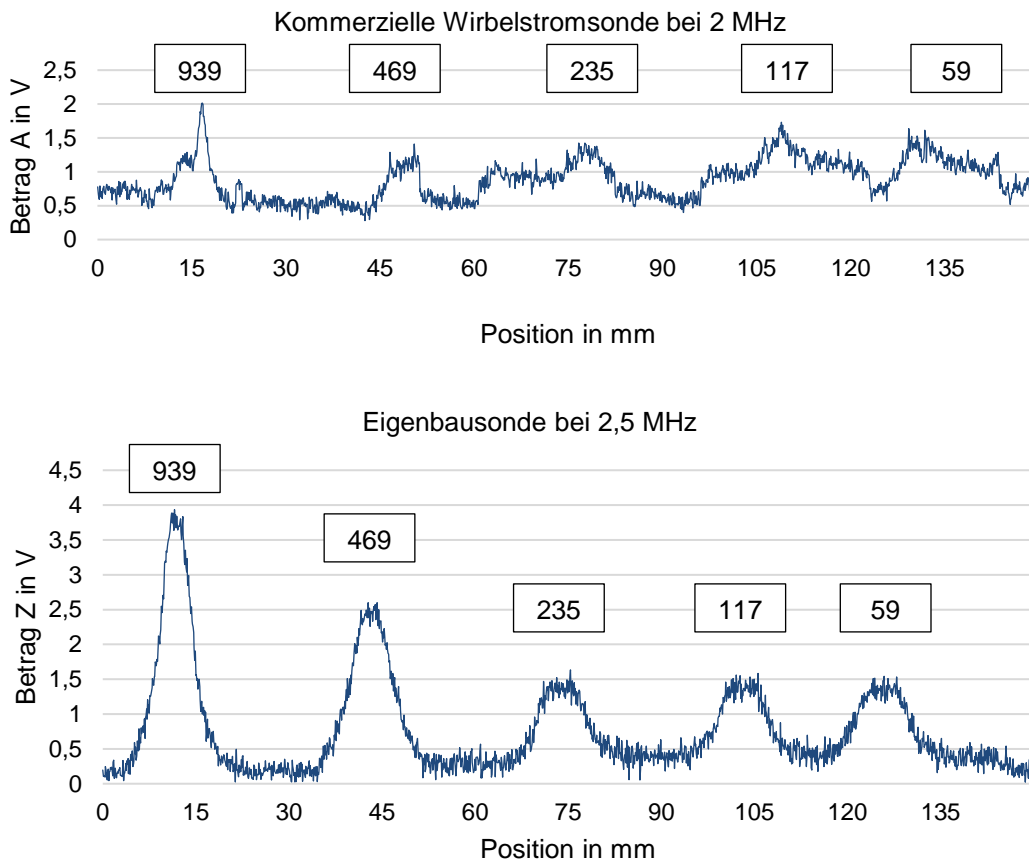


Abb. 3: Linien-Scan Vergleich kommerzielle Wirbelstromsonde (oben) und Eigenbausonde (unten)

In Abbildung 4 ist der Prüfkörper PP-Folie 3 mit 29 Fasern bis zwei Fasern (markiert durch Kästchen) von der Eigenbausonde bei einer Frequenz von 2,5 MHz abgetastet worden. Es sind deutlich vier Maxima zu erkennen. Das hohe Potenzial der Eigenbausonde zum Nachweis geringer Faseranzahlen wird hierdurch deutlich.

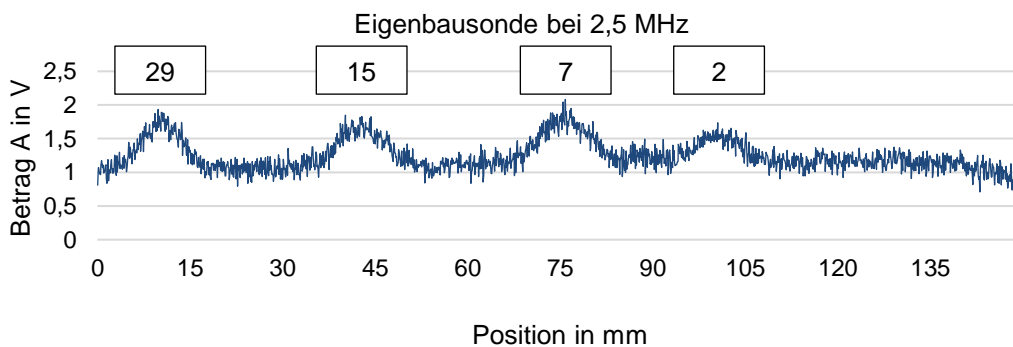


Abb. 4: Linien-Scan Eigenbausonde für 29 bis zwei Kohlenstofffasern

Ebenfalls ist in Abbildung 4 der große Wirkungsbereich der Eigenbausonde ersichtlich. Die zwei Einzelfasern besitzen eine Breite von insgesamt ca. 15 μm wobei die Eigenbausonde eine deutlich breitere Fehlstelle im Linien-Scan von ca. 13 mm vermuten lässt. Hier besteht noch Optimierungsbedarf, da zwar Einzelfasern verlässlich detektiert werden können, allerdings keine realistische Quantifizierung der Faseranzahl auf Basis der Wirbelstromprüfung durchgeführt werden kann.

5. Fazit und Ausblick

Es konnte erfolgreich gezeigt werden, dass mit weit verbreiteten Werkzeugen wie beispielsweise FDM-3D-Drucker, Oszilloskop und Funktionsgenerator Wirbelstromsonden kostengünstig hergestellt werden können, die den Anwendungsbereich bereits vorhandener Wirbelstromprüfgeräte signifikant erweitern. Durch die Auslegung und Fertigung eigener Wirbelstromsonden ist es möglich diese individuell auf den Prüfzweck anzupassen. Mithilfe der Ermittlung der Nachweisempfindlichkeit von Kohlenstofffasern konnte bestätigt werden, dass die hergestellte Wirbelstromsonde teilweise kommerziell verfügbare Wirbelstromsonden bezüglich der Empfindlichkeit für Kohlenstofffasern signifikant übertreffen. Die Eigenbausonde kann bis zu zwei Einzelfasern mit einem SNR-Wert von 13,9 dB bei einer Prüffrequenz von 2,5 MHz zuverlässig und reproduzierbar detektieren. Im Gegensatz dazu beträgt die geringste nachweisbare Faseranzahl der kommerziell verfügbaren Wirbelstromsonden 117 Einzelfasern. Dieser Wert wurde mit der Wirbelstromsonde EC-AT-HF bei einer Prüffrequenz von 2 MHz mit einem SNR-Wert von 15,1 dB gemessen. Es konnte bewiesen werden, dass mit der kompensierten Eigenbausonde der Nachweis einzelner Kohlenstofffasern zuverlässig möglich ist. Potenziell könnten dadurch auch einzelne Faserbrüche detektiert werden.

Eventuell kann mit den gewonnenen Erkenntnissen in Zukunft ermöglicht werden, Hochfrequenz-Wirbelstromprüfungen an kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen mit dem Ziel der Detektion einzelner Faserbrüche durchzuführen. Hierdurch könnte der Ausschuss bei der Fertigung und das verfrühte Ausscheiden von Produkten im Betrieb verringert werden.

Referenzen

- [1] ABTS, G. Kunststoff-Wissen für Einsteiger. In: G. ABTS, Hg. *Kunststoff-Wissen für Einsteiger*. 3., aktualisierte und erweiterte Auflage. München: Hanser, 2016. ISBN 978-3-446-45041-7.
- [2] FISCHER, U. *Tabellenbuch Metall*. 43., neu bearb. und erw. Aufl. Haan-Gruiten: Verl. Europa-Lehrmittel Nourney Vollmer, 2005. Europa-Fachbuchreihe für Metallberufe. ISBN 3-8085-1673-9.
- [3] BONTEN, C. *Kunststofftechnik. Einführung und Grundlagen*. 3., aktualisierte Auflage. München: Hanser, 2020. Hanser eLibrary. ISBN 978-3-446-46471-1.
- [4] HEUER, H., M. SCHULZE, M. POOCH und e. AL. Process Monitoring for Resins, Carbon Fiber Fabrics, Preforms and Consolidated CFRPS by HF Radio Wave Techniques [online]. *20th International Conference on Composite Materials*, 2015. Verfügbar unter: <http://publica.fraunhofer.de/starweb/servlet.starweb?path=epub0.web&search=N-370496>
- [5] KYRGIASOZGLOU, A. und T. THEODOULIDIS. Simulation and experiments on the eddy current method to detect fatigue cracks in welds [online]. *1st ICWINDT 2018*, 2018, 2018. Verfügbar unter: <https://www.researchgate.net/publication/328432458>
- [6] OWSTON, C.N. Eddy current methods for the examination of carbon fibre reinforced epoxy resins. *Materials Evaluation*, 1976, 34, S. 237-244.
- [7] PARK, J.B., T.K. HWANG, H.G. KIM und Y.D. DOH. Experimental and numerical study of the electrical anisotropy in unidirectional carbon-fiber-reinforced polymer composites [online]. *Smart Materials and Structures*, 2007, 16(1), S. 57-66. ISSN 0964-1726. Verfügbar unter: doi:10.1088/0964-1726/16/1/006

- [8] SCHULZE, M.H., H. HEUER, M. KÜTTNER und N. MEYENDORF. High-resolution eddy current sensor system for quality assessment of carbon fiber materials [online]. *Microsystem Technologies*, 2010, 16(5), S. 791-797. ISSN 0946-7076. Verfügbar unter: doi:10.1007/s00542-010-1047-3
- [9] MOOK, G. und R. LANGE. *Wirbelstromprüfung von Hochleistungswerkstoffen*, 22. Mai 1995. 62. Jahrestagung der DGZfP.
- [10] MOOK, G., R. LANGE und O. KOESER. Non-destructive characterisation of carbon-fibre-reinforced plastics by means of eddy-currents [online]. *Composites Science and Technology*, 2001, 61(6), S. 865-873. ISSN 02663538. Verfügbar unter: doi:10.1016/S0266-3538(00)00164-0
- [11] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. DIN EN ISO 12718:2019, *Zerstörungsfreie Prüfung – Wirbelstromprüfung – Terminologie*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [12] ROHMANN GMBH. *Sensor Katalog* [online] [Zugriff am: 27. Februar 2021]. Verfügbar unter: <https://www.rohmann.co.jp/wp-content/uploads/2016/07/ProbeCatalog.pdf>
- [13] ALBACH, M. *Induktivitäten in der Leistungselektronik. Spulen, Trafos und ihre parasitären Eigenschaften*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017. ISBN 978-3-658-15081-5.
- [14] MAXWELL, J.C. VIII. A dynamical theory of the electromagnetic field [online]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1865, 155, S. 459-512. ISSN 0261-0523. Verfügbar unter: doi:10.1098/rstl.1865.0008
- [15] ZINKE, O. und H. SEITHER. *Widerstände, Kondensatoren, Spulen und ihre Werkstoffe*. Zweite, neubearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1982. ISBN 9783642509810.
- [16] ROHMANN GMBH. *Handbuch Elotest PL600 "Advanced Inspection" Rel. 2.2*, 11. November 2018.
- [17] LENAERTS, B. und R. PUERS. *Omnidirectional Inductive Powering for Biomedical Implants*. s.l.: Springer Netherlands, 2009. Analog Circuits and Signal Processing. ISBN 1402090749.
- [18] HIDALGO-GATO, R., J.R. ANDRÉS, J.M. LÓPEZ-HIGUERA und F.J. MADRUGA. Quantification by Signal to Noise Ratio of Active Infrared Thermography Data Processing Techniques [online]. *Optics and Photonics Journal*, 2013, 03(04), S. 20-26. ISSN 2160-8881 [Zugriff am: 18. März 2021]. Verfügbar unter: doi:10.4236/opj.2013.34A004