

Gegenüberstellung von Wirbelstromprüfung und aktiver Thermografie an CFK- Versuchskörpern

Rainer POHL¹, Ralf CASPERSON¹, Christiane MAIERHOFER², Jan P. MÜLLER²,
Matthias PELKNER¹

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

¹ Fachbereich 8.4: Zerstörungsfreie Prüfung, Akustische und elektromagnetische Verfahren

² Fachbereich 8.7: Zerstörungsfreie Prüfung, Thermografische Verfahren

Kontakt E-Mail: rainer.pohl@bam.de

Kurzfassung. In vielen Bereichen der Technik haben Konstruktionen unter Einsatz von CFK-Bauteilen und Komponenten die klassischen Metalle abgelöst. Die zerstörungsfreie Prüfung solcher CFK-Bauteile gewinnt somit zunehmend an Bedeutung. Ein mögliches Prüfverfahren ist dabei die Wirbelstromprüfung. Aufgrund der relativ geringen elektrischen Leitfähigkeit von CFK-Komponenten kommt hierbei häufig die sogenannte HF-Wirbelstromprüfung zum Einsatz.

In verschiedenen Untersuchungen der BAM konnten jedoch auch mit Wirbelstromprüfsystemen in niedrigen Frequenzbereichen gute Ergebnisse erzielt werden. Um die Möglichkeiten und Grenzen dieser konventionellen Wirbelstromprüfung auszuloten, wurden Messungen an Versuchskörpern durchgeführt, welche bereits bei der Validierung der Blitz- und Lock-in-Thermografie für neue Verfahrensnormen erfolgreich eingesetzt wurden. Ein Typ dieser Versuchskörper sind Flachproben aus CFK von 6 mm Dicke. In diesen wurden Flachbodenbohrungen mit Durchmessern zwischen 4 mm und 24 mm eingebracht. Die Restwandstärken liegen zwischen 0,06 mm und 3,66 mm. Ein weiterer CFK-Versuchskörper hat die Geometrie eines Stufenkeiles. Bei verschiedenen Stufenkeilen sind Wanddicken zwischen 1,4 mm und 5,4 mm realisiert worden. In diesen wurden künstliche quadratische Delaminationen mit Kantenlängen zwischen 2 mm und 20 mm eingebracht. Die Ergebnisse der Wirbelstromprüfung werden denen der aktiven Thermografie gegenübergestellt.

Zur Nachbildung von Kompositwerkstoffen wurden die flachen Versuchskörper mit geeigneten Versuchskörpern aus Aluminium und Stahl kombiniert. Die Wirbelstromprüfungen wurden mit einem handelsüblichen Prüfgerät im Frequenzbereich zwischen 500 Hz und 3 MHz und entsprechend angepassten Sensoren durchgeführt.

1. Einführung

Die elektrische Leitfähigkeit von CFK (carbonfaserverstärkter Kunststoff) liegt mit ca. 0,01 MS/m um etwa drei Größenordnungen unter der von Aluminium. Deshalb wird hier bei der Wirbelstromprüfung i.A. mit hohen Frequenzen in Bereichen von 1 – 100 MHz gearbeitet [1,2]. Bei Wirbelstromuntersuchungen an Composite-Druckgefäßen [3] wurden jedoch auch bei einer Prüffrequenz von 5 kHz Strukturen dargestellt, die eindeutig dem CFK zuzuordnen waren.





Abb. 1. Prüfaufbau und bildhafte Darstellung des Prüfergebnisses an einem Composite-Druckgefäß.

In Abb. 1 ist der Prüfaufbau und die Ergebnisdarstellung an einem solchen Composite-Druckgefäß im Neuzustand dargestellt. Das Druckgefäß besteht aus einem Aluminiumliner mit einer Wandstärke von 4 mm. Um diesen sind mehrere Lagen CFK und GFK (glasfaserverstärkter Kunststoff) mit einer Gesamtdicke von ca. 4,5 mm gewickelt. Als Prüfergebnis wird die Y-Komponente des Wirbelstromsignales ortsgetreu dargestellt. Gezeigt wird die Mantelfläche in einer Länge von 320 mm für den kompletten Umfang von ca. 470 mm. Als 0°-Markierung wurde ein Aluminiumstreifen aufgeklebt. Dieser zeichnet sich deutlich am unteren Prüffeldrand ab. Strukturen der CFK-Ummantelung sind sowohl als wabenförmiges Muster, als auch als längere bogenförmige Streifen zu erkennen.

Neben Wirbelstromverfahren sind in der Untersuchung von CFK-Materialien mit aktiven thermografischen Verfahren etabliert. Daher wird in dieser Veröffentlichung Lock-In-Thermografie als Vergleich zu der Wirbelstromprüfung herangezogen – am Beispiel von Versuchskörpern mit definierten Fehlstellen.

2. Versuchskörper

Zur Validierung der Blitz- und Lock-in-Thermografie steht eine Vielzahl von Versuchskörpern zur Verfügung. Es wurden zwei ausgewählt, die, in der am Composite-Druckgefäß genutzten Prüfkfiguration, ein deutliches Wirbelstromsignal erzeugen. Der Versuchskörper BAM 8.7-0316 CFK-FLB-160g ALT (nachfolgend Versuchskörper FLB) ist eine flache, quadratische Platte mit ca. 7 mm Dicke und einer Kantenlänge von 200 mm. Er besteht aus 30 Lagen eines mit Epoxidharz vergossenen Kohlefasergewebes mit 160 g/m² und den Lagenorientierungen 0° und 90°. In den Versuchskörper wurden Flachbodenbohrungen der Durchmesser 4 mm, 8 mm, 16 mm und 24 mm eingebracht. Die Restwanddicken betragen zwischen 0,1 mm und 3,6 mm. Anordnung und Restwanddicke der Flachbodenbohrungen sind in der Skizze in Abb. 2 links dargestellt.

Der Versuchskörper BAM 8.7-0265 CFK-PTFE Stufenprobekörper 1 (nachfolgend Versuchskörper DELAMI) wurde aus Prepreg KUTG 2407 gefertigt. Die äußere Form des Versuchskörpers ist ebenfalls quadratisch mit einer Kantenlänge von 200 mm. Im Querschnitt wurden 5 Stufen der Dicken 1,4 mm, 2,0 mm, 2,5 mm 3,1 mm und 3,7 mm hergestellt. Die Faserorientierungen sind +45°, -45°, 0° und 90°. Zur Erzeugung künstlicher Delaminationen wurden je 2 Lagen quadratischer, 0,1 mm dicker PTFE-Folien der Kantenlängen 2 mm, 3 mm, 4 mm, 8 mm und 16 mm eingearbeitet. Die Restwandstärke von der ebenen Oberfläche zu allen künstlichen Delaminationen beträgt 1 mm. Somit ergeben sich von der stufigen Seite her Restwanddicken von etwa 0,2 mm, 0,8 mm, 1,3 mm 1,9 mm und 2,5 mm. Anordnung und Größen der künstlichen Delaminationen sind in Abb 2. rechts dargestellt.

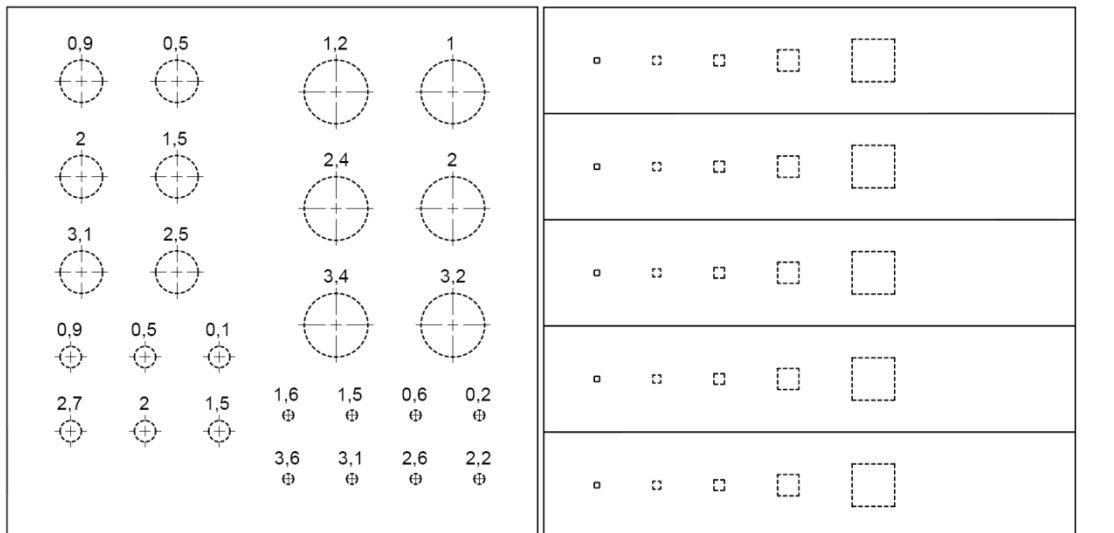


Abb. 2. Anordnung der Vergleichsfehler an den Versuchskörpern FLB (links) mit Angaben der Restwandstärke in Millimeter und DELAMI (rechts).

3. Ergebnisse der Wirbelstromprüfung

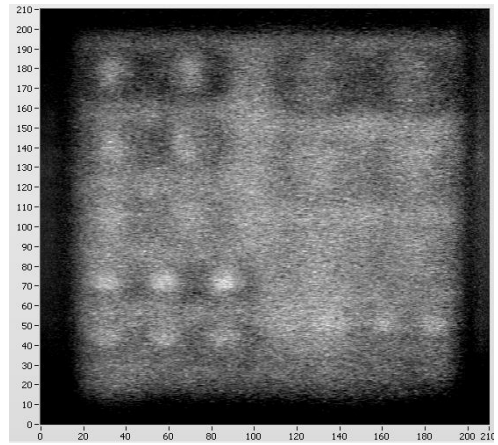
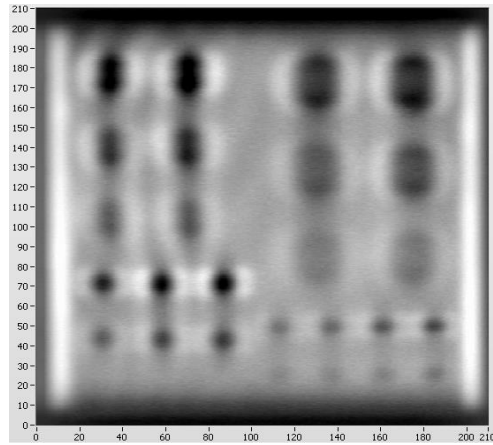
Für die bildhafte Darstellung der Wirbelstromergebnisse wurden die Versuchskörper mechanisiert abgetastet und die Daten ortstreu aufgezeichnet und visualisiert. Die Versuchskörper waren mit einer 0,1 mm dicken Schutzfolie abgedeckt. Die Sensoren wurden schleifend über diese Schutzfolie geführt. Das quadratische Prüffeld hatte eine Kantenlänge von 210 mm. Der Messpunktabstand beträgt 0,5 mm in senkrechter und 0,2 mm in waagerechter Richtung.

Abb. 3 fasst die Ergebnisse von vier Wirbelstromsensoren am Versuchskörper FLB zusammen. Die Abtastung der Flachbodenbohrungen erfolgte als verdeckte Fehlstellen. Die Prüffrequenz wurde so gewählt, dass ein ausreichender Abstand zur Resonanzfrequenz des jeweiligen Sensors gegeben war (maximal ein Zehntel der Resonanzfrequenz). Das Liftoffsignal wurde wie üblich nach links in die X-Achse gedreht. Zur Bilddarstellung erfolgten angepasste Kontrastanhebungen und Offsetverschiebungen. Es wird je ein Bild aus der X- und eines aus der Y-Komponente des Wirbelstromsignales dargestellt.

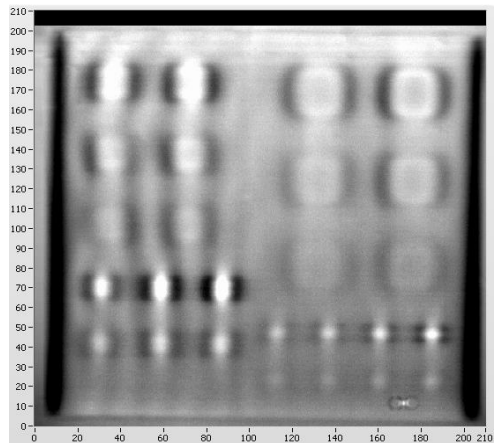
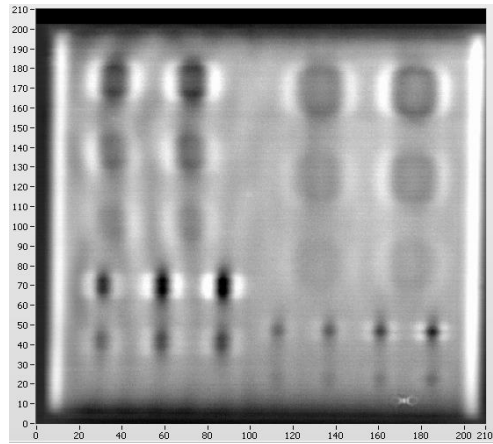
Der Sensor SK 14 TA-2 entspricht in seiner Prüfkonfiguration der aus den Prüfungen an den Composite-Druckgefäßen [3]. Die beiden Sensoren des Typs SK sind für die Detektion verdeckter Fehlstellen optimiert. Mit ihnen gelingt auch am Versuchskörper FLB die Detektion aller Vergleichsfehler, wobei die Phasentrennung zwischen Offset- und Fehlersignal beim Sensor SK 9 TA-2 aufgrund der ausgeprägten Y-Komponente einfacher ist. Die beiden Sensoren des Typs AN sind hochauflösend und bilden die Faserstruktur des Kohlegewebes in beiden Richtungen deutlich ab. Die Detektion der Flachbodenbohrungen ist nur bis zu einer Tiefenlage von etwa 2 mm sicher möglich. Hier ermöglicht der Sensor AN 05 die bessere Trennung vom Liftoffsignal.

An der Position (170 mm, 10 mm) gibt es bei den unteren drei Prüfergebnissen eine ausgeprägte singuläre Anzeige die auch in verschiedenen anderen Prüfungen reproduzierbar war. Es wird ein besonders kleiner metallischer Einschluss vermutet. In der oberen Messung ist diese Anzeige nicht vorhanden, da der Sensor SK 14 TA-3 mit seiner besonders großen Wirkfläche solche kleinen Anzeigen unterdrückt. Eine visuelle Überprüfung des Bereiches ergab jedoch keine Anzeichen eines Defektes.

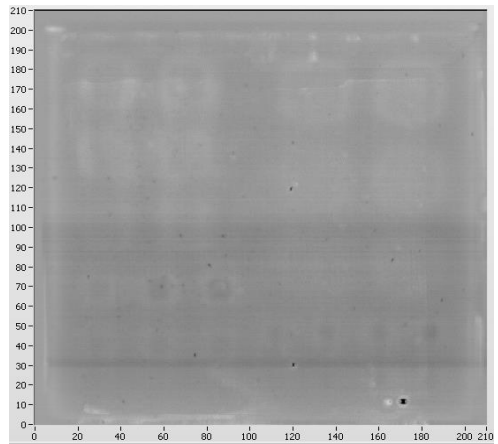
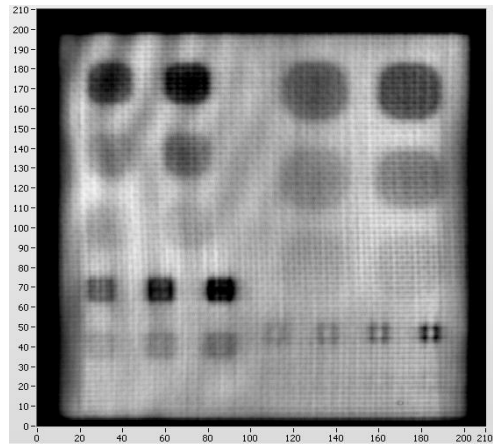
SK 14 TA-3
 $f = 5 \text{ kHz}$



SK 9 TA-2
 $f = 8 \text{ kHz}$



AN 16
 $f = 200 \text{ kHz}$



AN 05
 $f = 500 \text{ kHz}$

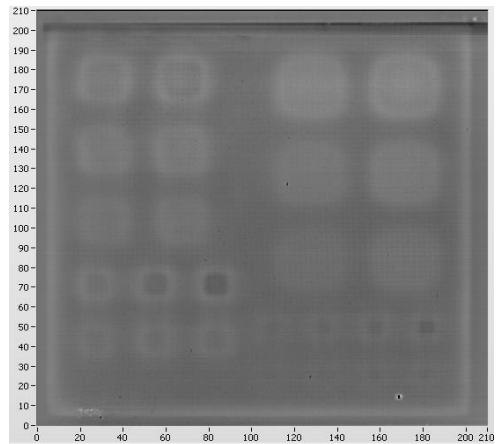
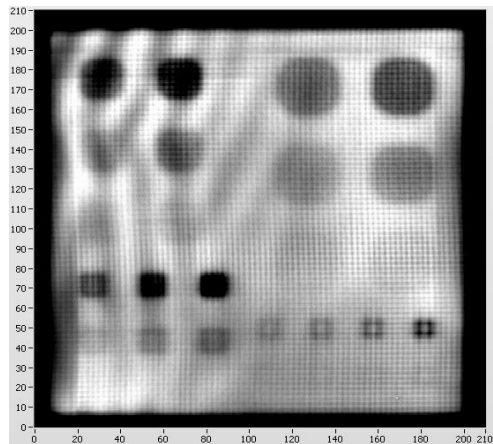


Abb. 3. Zusammenstellung der Wirbelstromprüfergebnisse verschiedener Sensoren am Versuchskörper FLB, links X-Komponente, rechts Y-Komponente

Der Versuchskörper DELAMI konnte mit dem vorhandenen mechanisierten Prüfplatz nur von der glatten Seite her abgetastet werden. Das bedeutet, dass alle Fehlstellen unter einer Wanddicke von 1 mm liegen und sich der Stufenkeil nur als wechselnde Gesamtwanddicke auswirkt. Die Detektion der künstlichen Delaminationen mit konventionellem Wirbelstrom und den vorhanden Sensoren ist schwierig. In Abb. 4 sind ausgewählte Prüfergebnisse zusammengefasst dargestellt. Als sicher zu detektieren können nur die Fehlstellen mit 16 mm Kantenlänge angesehen werden. Die Fehlstellen mit 8 mm Kantenlänge zeichnen sich schwach ab. Mit geeigneten Bildbearbeitungsalgorithmen lassen sich diese Prüfergebnisse wahrscheinlich noch verbessern.

Mit den hochauflösenden Sensoren des Typs AN ist die Faserstruktur an diesem Versuchskörper sehr gut darstellbar. Alle vier Faserorientierungen sind klar erkennbar.

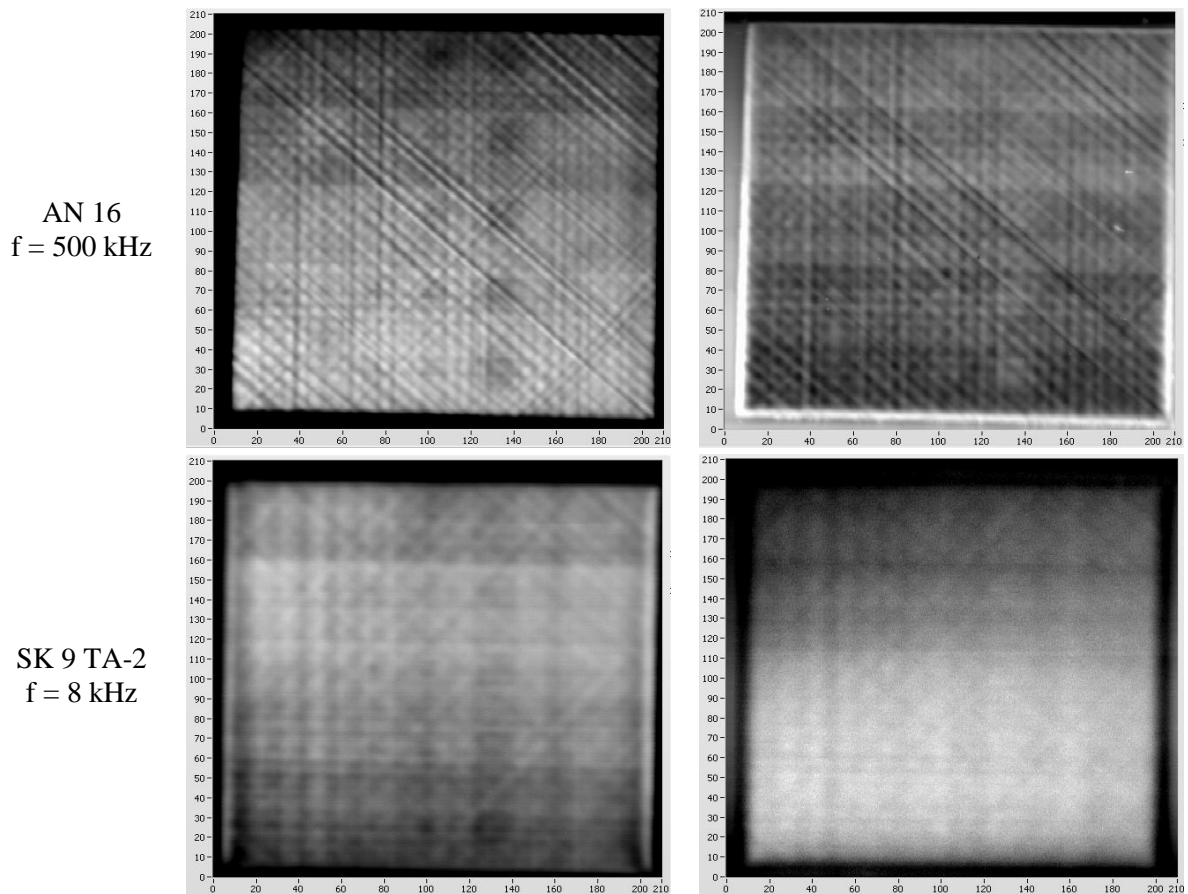


Abb. 4. Zusammenstellung der Wirbelstromprüfergebnisse verschiedener Sensoren am Versuchskörper DELAMI, links X-Komponente, rechts Y-Komponente

4. Ergebnisse der Aktiven Thermografie

Die Versuchskörper wurden mit frequenzmodulierter und monofrequenter Lock-In Thermografie [4, 5] untersucht. An dieser Stelle wird ein kurzer Überblick über den verwendeten Messaufbau und die Auswertung gegeben. Eine ausführlichere Beschreibung kann im Tagungsbeitrag [6] nachgelesen werden. Für die frequenzmodulierte Messung wird i.A. der Begriff Chirp (englisch für zwitschern) verwendet. Die Messungen erfolgten in Reflexion, das heißt, thermische Anregung und Messung erfolgen von der gleichen Probenoberfläche. Die Infrarotkamera (Fa. Infratec, Image IR 8800) beobachtete die Probenoberfläche im langwelligen Infrarotbereich (LWIR, 8-9,4 μm) zeitaufgelöst mit einer Bildwiederholrate von 2 Hz. Die thermische Anregung erfolgte mittels zweier

Halogenlampen, welche mit Hilfe eines Dimmers von einem Funktionsgenerator angesteuert wurden. Der Funktionsgenerator gab über einen Zeitraum von 1024 s ein frequenzmoduliertes Sinussignal mit einem Frequenzverlauf von 0,01 bis 0,1 Hz aus. Ein Vorteil der frequenzmodulierten Lock-In Thermografie ist das gleichzeitige Erfassen mehrerer Anregungsfrequenzen mit ihren unterschiedlichen Tiefenempfindlichkeiten innerhalb einer Messsequenz. Durch Korrelation mit den Anregungsfrequenzen lassen sich Störgrößen sehr gut unterdrücken.

Für die Auswertung wurden die aufgezeichneten Thermosequenzen mit verschiedenen signalverarbeitungstechnischen Algorithmen bearbeitet und einer Fourier-Transformation unterzogen. Die Fourier-Transformation liefert als Ergebnis ein Amplituden- und ein Phasenbild. Defekte sind grundsätzlich in beiden Bildern detektierbar. Dieser Beitrag beschränkt sich auf die Darstellung der Phasenbilder, da diese für die Prüfung auf kleine Defekte empfindlicher sind.

In Abb. 5 werden ausgewählte Phasenbilder des Versuchskörpers FBB gezeigt. Die Prüfung erfolgte von der Oberfläche her, das heißt die Flachbodenbohrungen wirken als verdeckte Fehlstellen.

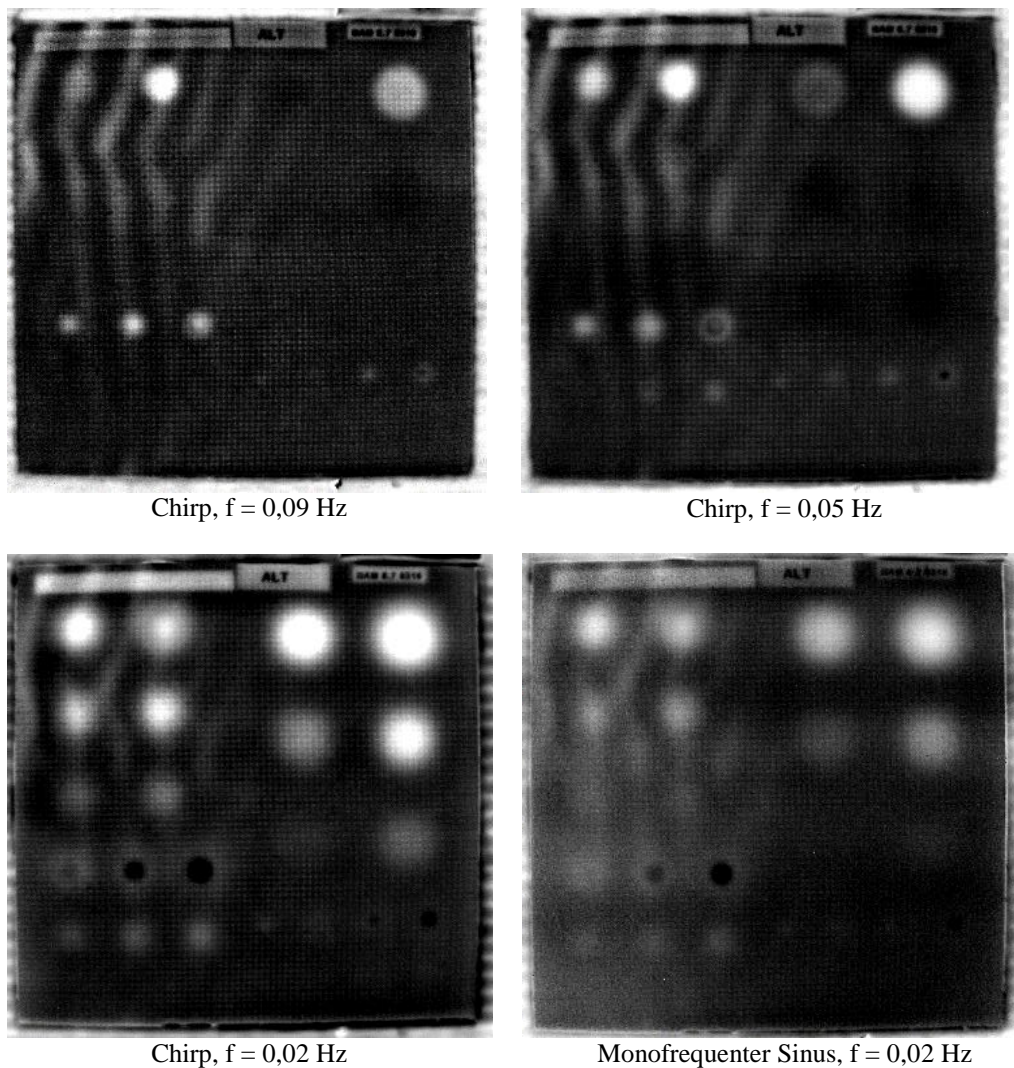


Abb. 5. Phasenbilder des Versuchskörpers FLB bei den Frequenzen $f = 0,09$; $0,03$ und $0,02$ Hz für die frequenzmodulierte Messung (Chirp) und bei Anregung mit einem Sinus konstanter Frequenz.

Die Flachbodenbohrungen der Durchmesser 24, 16 und 8 mm sind in allen Tiefenlagen detektierbar. Beim Durchmesser 4 mm sind nur die Bohrungen mit den Restwandstärken

von 0,2 bis 1,6 mm zu erkennen. Die bessere Tiefenwirkung für niedrigere Frequenzen ist deutlich sichtbar.

Interessant ist die schon bei hohen Frequenzen auftretende wellenförmige Struktur im linken oberen Bereich des Versuchskörpers. Eine mögliche Ursache hierfür ist ein ungleichmäßiger Abstand der Lagen, welcher möglicherweise bei der Fertigung des Versuchskörpers entstanden ist. Dieser Zwischenraum könnte dann beim Einpressen des Epoxidharzes stärker mit Harz gefüllt worden sein, und hat folglich einen höheren thermischen Widerstand als die Umgebung.

Der Versuchskörper DELAMI wurde von der stufigen Seite her geprüft. Das heißt, für die künstlichen Delaminationen gelten die verschiedenen Restwanddicken zwischen 0,2 mm und 2,5 mm. Ausgewählte Ergebnisse werden in Abb. 6 dargestellt.

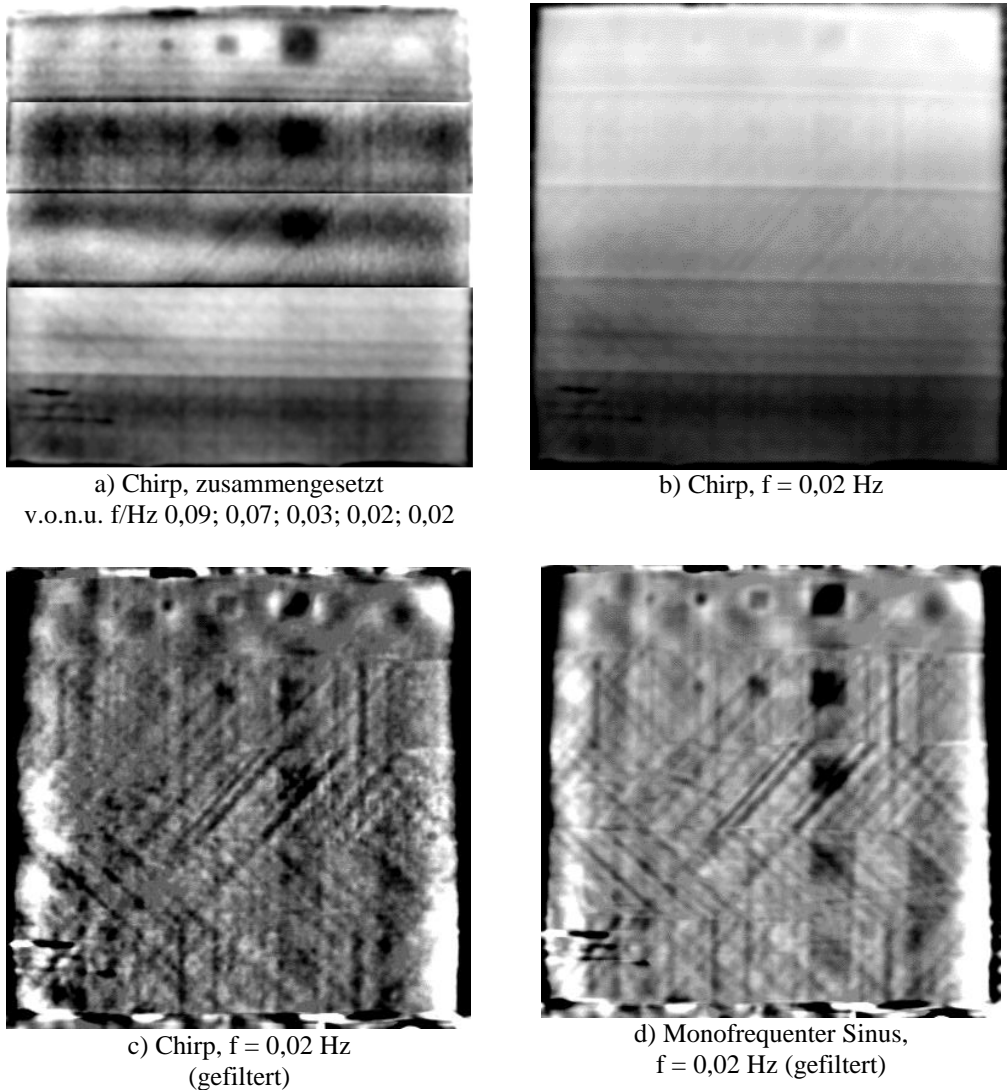


Abb. 6. Phasenbilder des Vergleichskörpers DELAMI

In Teilabbildung a) wurde für jede Stufe eine Frequenz ausgewählt, bei der die Fehlstellen mit optimalem Kontrast sichtbar sind, jeder Bildteil wurde getrennt angesteuert. In Teilabbildung b) wird ein Phasenbild bei einer Frequenz von 0,02 Hz gezeigt. Es ist deutlich sichtbar, dass die Stufengeometrie des Versuchskörpers größere Differenzen im Phasenverlauf erzeugt, als die eigentlichen eingebrachten Fehlstellen. Für Bild c) wurden die Daten aus Bild b) mit speziellen Filtertechniken nachbearbeitet (Details siehe [6]). Durch diese Bearbeitung werden die Fehlstellen in den drei Stufen mit den Überdeckungen

0,2 mm, 0,8 mm und 1,3 mm deutlich sichtbar. Zusätzlich wird die quasi-isotrope Orientierung der Lagen im Versuchskörper verstärkt dargestellt. In Teilabbildung d) ist ein äquivalentes Phasenbild bei einer monofrequenten Anregung von 0,02 Hz dargestellt. Die Messung hatte eine Dauer von 50 min, das entspricht 60 Perioden. Die Delaminationen mit einer Ausdehnung von $16 \times 16 \text{ mm}^2$ sind nun auch bei den größeren Überdeckungen von 1,9 bis 2,5 mm mit schwachem Kontrast sichtbar.

5. Weitere Untersuchungen mit Wirbelstrom

Zur Nachbildung von Kompositwerkstoffen wurden in eine Aluminiumplatte von 2 mm Dicke eine Durchgangsnut und eine verdeckte Vergleichsnut mit je 20 mm Länge eingebracht. Die Restwanddicke beträgt 0,6 mm. In einer Stahlplatte von 1 mm Dicke wurde eine Durchgangsnut von 17 mm Länge, und eine Durchgangsbohrung von 1 mm Durchmesser eingebracht. Auf die Herstellung eines verdeckten Vergleichsfehlers wurde hier verzichtet, da sich dieser mit Wirbelstrom im ferritischen Werkstoff kaum nachweisen ließe.

Abb. 7 zeigt die Ergebnisse der Kombinationen dieser Platten abgedeckt mit dem Versuchskörper FLB. Es wurde eine vergleichbare Prüfkonfiguration wie bei der Prüfung der Composite-Druckgefäße [3] genutzt (Sensor SK 14 TA-3, $f = 5 \text{ kHz}$).

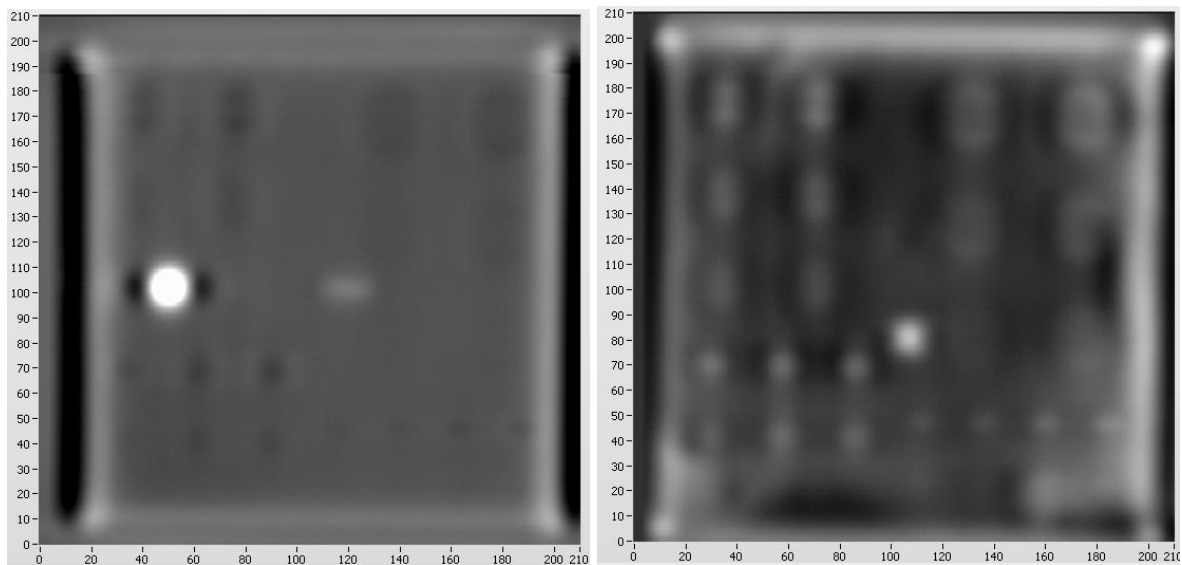


Abb. 7. Darstellung der Wirbelstromprüfergebnisse an den Kombinationen des Versuchskörpers FLB mit einer Aluminiumplatte (links) und einer Stahlplatte (rechts)

Die Signale der Vergleichsnuten an der Aluminiumplatte sind in etwa an den Koordinaten 50 mm, 100 mm und 120 mm, 100 mm, die an der Stahlplatte an den Koordinaten (110 mm, 80 mm) deutlich zu erkennen. An den Koordinaten (110 mm, 120 mm) befindet sich die Durchgangsbohrung in der Stahlplatte. Diese bildet sich nur relativ schwach ab und ist für den großflächig wirkenden Sensor nur schwer zu detektieren.

Auffällig ist, dass bei Paarung CFK-Aluminium die Signale der Vergleichsfehler in der Aluminiumplatte sowohl in der Amplitude, als auch in der Phase von denen im CFK-Versuchskörper zu unterscheiden sind (hell-dunkel). Bei der Kombination Stahl-CFK gibt es nur einen Amplitudenunterschied (hell-hell). Um diese Verhältnisse deutlicher darzustellen sind in Abb. 8 die komplexen Wirbelstromsignale und Linienschriebe entlang der markierten Messspuren für beide Materialpaarungen gegenübergestellt.

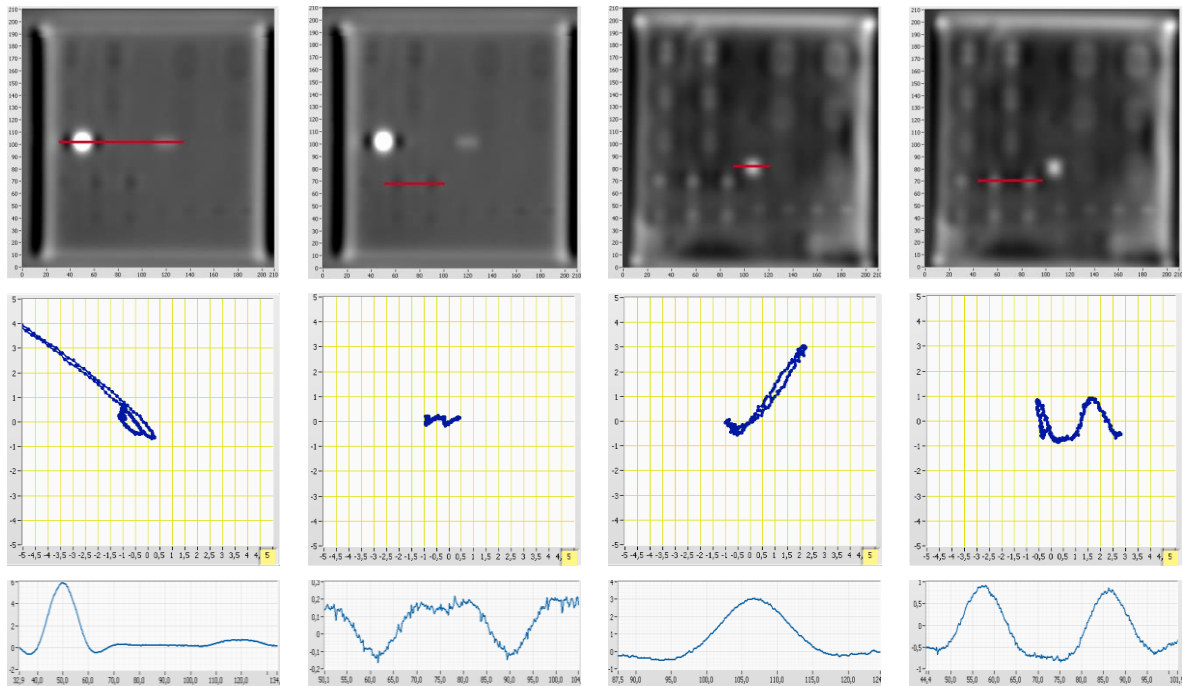


Abb. 8. Darstellung der Wirbelstromprüfergebnisse an den Kombinationen des Versuchskörpers FLB mit einer Aluminiumplatte (links) und einer Stahlplatte (rechts); oben: bildhafte Darstellung der Y-Komponente, Mitte: komplexe Darstellung, unten: Linienscan der Y-Komponente entlang der markierten Prüfpur.

6. Fazit

Es konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, mit der Wirbelstromprüfung auch in Frequenzbereichen von einigen Kilohertz an CFK schon aussagekräftige Prüfergebnisse zu erzielen. Diese sind qualitativ durchaus ähnlich denen der aktiven Thermografie. Dies hängt im Einzelfall natürlich immer vom konstruktiven Aufbau sowohl der CFK-Struktur (CFK-Dichte, Kontakt zwischen den einzelnen Fasern, usw.) als auch der Gesamtkomponente (Dicke, Zugänglichkeit, usw.) ab. Sehr gut lassen sich mit hochauflösenden Sensoren die Faserrichtungen in Oberflächennähe darstellen. Die Prüfung auf Delaminationen ist mit konventioneller Wirbelstromprüftechnik eher schwierig. Für die Detektion von Delaminationen hat sich die Lock-In-Thermografie als geeignet erwiesen. Die thermografische Prüfmethode ist weniger empfindlich auf die Faserorientierung in tieferen Lagen.

Bei der Prüfung von Verbundwerkstoffen aus CFK und Metall können sich je nach Materialpaarung unterschiedliche Prüfverhältnisse ergeben. Weiterführende Versuche hierzu werden demnächst durchgeführt.

Mit beiden Verfahren wurden wellenförmige Signalstrukturen am Versuchskörper FLB detektiert, die vermutlich auf nicht geplante Unregelmäßigkeiten bei seiner Fertigung zurückzuführen sind.

7. Referenzen

- [1] G. Mook, „Wirbelstromprüfung von CFK“, Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg, Available: http://www.uni-magdeburg.de/iwfzfp/Download/Publ/2015_Kassel_CFK.pdf , [Zugriff am 02. März 2017]
- [2] M. Kreuzbruck, P. Fey, W. Essig, M. Rahammer, S. Joas, T. Erb, I. Solodov, „Faserkunststoffe – Hochleistungswerkstoffe in Leichtbausystemen als eine neue Herausforderung für die ZfP“, ZfP-Zeitung 151, Oktober 2016, S39 – 47
- [3] R. Casperson, D. Munzke, R. Pohl, „Wirbelstromprüfung an Composite-Druckgefäßen“, DGZfP Jahrestagung, Mai 2017
- [4] G. Busse, D. Wu and W. Karpen, J. Appl. Phys. 71 (8), 3962 (1992).
- [5] R. Mulaveesalaa and S. Tuli, Appl. Phys. Lett. 89 (19), 191913 (2006).
- [6] J. P. Müller, S. Götschel, M. Weiser, C. Maierhofer, „Thermografie mit optimierter Anregung für die quantitative Untersuchung von Delaminationen in kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen“, DGZfP-Jahrestagung, Beitrag Mi, 1.A.4, Mai 2017