

# Zerstörungsfreie Prüfung von Composite-Druckgefäßen mit konventioneller und hochfrequenter Wirbelstromtechnik

Ralf CASPERSON<sup>1</sup>, Rainer POHL<sup>1</sup>, Sebastian LOHDE<sup>1</sup>, Melih AYDOĞDU<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

<sup>2</sup> Beuth-Hochschule für Technik, Berlin

Kontakt E-Mail: ralf.casperson@bam.de

**Kurzfassung.** Composite-Druckgefäße für den Gefahrguttransport sowie für Wasserstoff- und Erdgasfahrzeuge bestehen aus einem lasttragenden Composite und einer gasdichten, metallischen oder polymeren Barrierschicht (Liner). Zur Untersuchung des Alterungsverhaltens solcher Composite-Druckgefäße wurde in der BAM das interdisziplinäre Themenfeldprojekt COD-AGE durchgeführt. Ziel des Projektes war die Entwicklung von Methoden und Modellen zur Beschreibung und Bestimmung des Alterungsverhaltens von Carbonfaser-Compositen am Beispiel von Druckgefäßen, um eine bessere Vorhersage der Alterung und der sicheren Gebrauchsdauer zu ermöglichen. Ein Schwerpunkt in diesem Projekt war die Bereitstellung geeigneter ZfP-Methoden. Dabei ging es sowohl um versuchsbegleitende Prüfungen, als auch um die mögliche Entwicklung von Prüfeinrichtungen für den späteren praktischen Gebrauch.

In dem Vortrag werden Prüfergebnisse der alterungsbegleitenden Wirbelstromprüfung an Composite-Druckgefäßen vorgestellt.

In Alterungsversuchen wurden Druckgefäße aus einem ca. 4 mm dicken Aluminiumliner und ca. 8 mm dicker CFK-Ummantelung untersucht. Typisches Einsatzgebiet solcher Druckgefäße sind Atemschutzgeräte der Feuerwehr. Die Druckgefäße wurden sowohl mit konventioneller Wirbelstromtechnik von außen und von innen als auch mit hochfrequenter Wirbelstromtechnik von außen geprüft. Es konnten sowohl Beschädigungen des metallischen Liners, als auch Strukturen des CFK-Geflechts nachgewiesen werden. Eine besondere mechanische Herausforderung bestand in der Prüfung der Innenseite der Liner, da hier eine zylindrische Fläche mit einem Innendurchmesser von 150 mm durch einen Zugang von nur 15 mm Durchmesser geprüft werden muss.

## Einführung

Druckgefäße aus Stahl für den Gefahrguttransport, Wasserstoff- und Erdgastanks im Fahrzeugbau oder für Atemschutzgeräte der Feuerwehr werden aufgrund der enormen Gewichtseinsparung zunehmend durch Composite-Druckgefäße ersetzt. Diese Composite-Druckgefäße bestehen aus einer gasdichten Barrierschicht, dem sog. Liner, umwickelt mit einer lasttragenden Schicht aus kohlefaserverstärktem Kunststoff (CFK). Um das CFK herum befindet sich oft eine weitere Schicht aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) zum Schutz des CFK. (Abbildung 1)



Abbildung 1: Aufbau eines Composite-Druckgefäßes aus einem metallischen Liner (silbern), lasttragendem CFK (schwarz) und schützendem GFK (gelb).

Bei Druckgefäßen aus Stahl lässt sich das Alterungsverhalten und somit deren Lebensdauer mit Hilfe von Lastwechselversuchen über die Wöhlerkurve gut vorhersagen. Das Alterungsverhalten von Composite-Druckgefäßen ist dagegen nur unzureichend bekannt. Ein direkter Zusammenhang zwischen Lastwechseln und Lebensdauer besteht hier nicht, da Composite-Druckgefäße im Gegensatz zu Stahlgefäßen auch bei konstanter Last altern.

In der BAM wurde das interdisziplinäre Themenfeldprojekt COD-AGE durchgeführt, mit dem Ziel, Methoden und Modelle zur Beschreibung und Bestimmung des Alterungsverhaltens von Composite-Druckgefäßen zu entwickeln, um eine bessere Vorhersage der Alterung und der sicheren Gebrauchsdauer zu ermöglichen [1]. Im Rahmen des Projektes wurden beispielhaft Atemluft-Druckgefäße für die Feuerwehr mit hydraulischen Lastwechseln und Zeitstandslagerung bei erhöhter Temperatur künstlich bis zur Leckage gealtert. Die künstliche Alterung wurde mit diversen Methoden von Dehnungsmessstreifen über faseroptische Sensoren bis hin zur zerstörungsfreien Prüfung mit Wirbelstrom, Ultraschall, Radiografie, Computertomografie und Thermografie begleitet.

### 1. Wirbelstromprüfung an CFK-Druckgefäßen

CFK besteht aus elektrisch leitfähigen Kohlefasern in einer dielektrischen Harzmatrix. D. h., während CFK in Faserrichtung elektrisch leitfähig ist, besteht quer zur Faserrichtung eine überwiegend kapazitive Kopplung, so dass sich auch in CFK Wirbelströme induzieren lassen [2]. Aufgrund der Frequenzabhängigkeit kapazitiver Ströme sind hierzu jedoch theoretisch

Prüffrequenzen notwendig, die oberhalb des Frequenzbereiches konventioneller Wirbelstromprüfgeräte liegen.

Im Rahmen des COD-AGE-Projektes wurden drei unterschiedliche Wirbelstromprüfeinrichtungen zur zerstörungsfreien, bildgebenden Prüfung von Composite-Druckgefäßen aufgebaut:

1. Konventionelle Wirbelstromprüfeinrichtung zur Prüfung des Liners von außen durch das CFK hindurch bei einer Prüffrequenz von 5 kHz.
2. Konventionelle Wirbelstromprüfeinrichtung zur Prüfung des Liners von innen durch den Ventil Sitz (Boss) bei einer Prüffrequenz von 300 kHz.
3. Hochfrequente Wirbelstromprüfeinrichtung zur Prüfung des CFK von außen bei Prüffrequenzen bis zu 2 GHz.

### 1.1 konventionelle Wirbelstromprüfung metallischer Liner von außen

Aus der Bruchmechanik ist bekannt, dass Risse in zylindrischen Druckgefäßen von innen nach außen wachsen [3]. In ferromagnetischen Linern lassen sich aufgrund der geringen Eindringtiefe der Wirbelströme von außen nur Risse detektieren, die bereits durch den Liner hindurch bis nach außen gewachsen sind und somit zu einer Leckage führen. In nichtferromagnetischen, metallischen Linern (z. B. Aluminium) lassen sich auch tiefere Anrisse, die noch nicht zu einer Leckage führen, gut von außen durch das CFK hindurch detektieren. Bemerkenswert ist, dass sich entgegen der Theorie bereits bei einer Prüffrequenz von nur 5 kHz die CFK-Struktur in den Prüfdaten abbildet. (Abbildung 2)

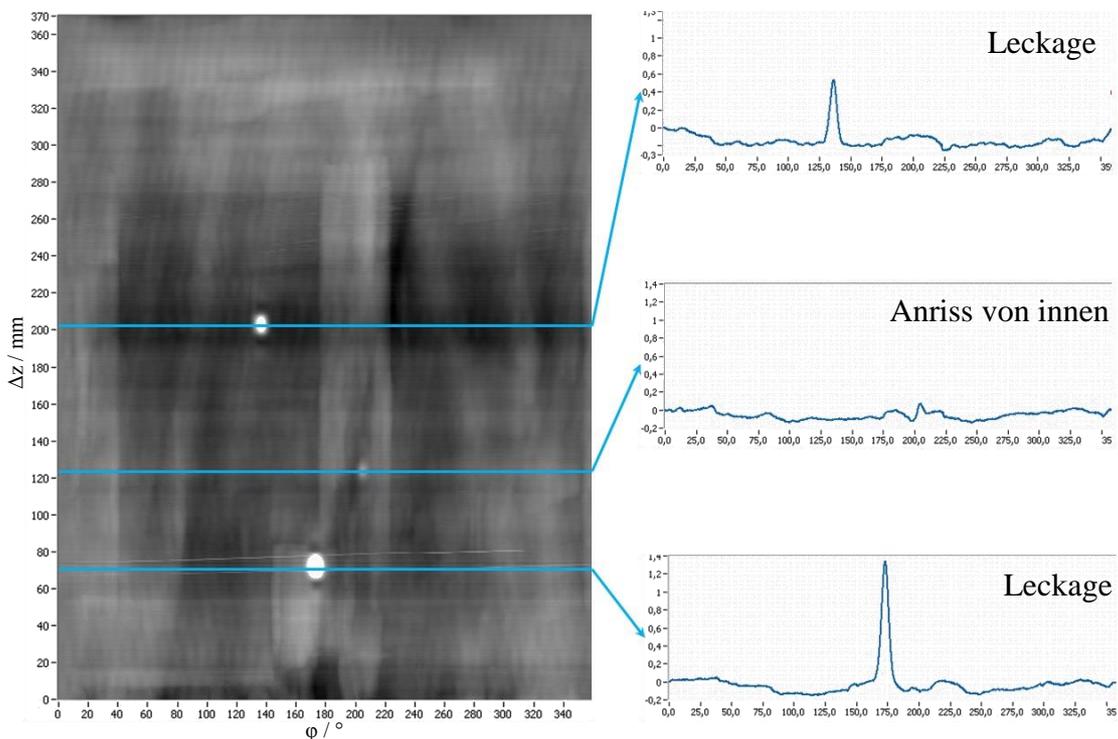


Abbildung 2: Ergebnis der bildgebenden Wirbelstromprüfung des Aluminiumliners eines bis zur Leckage gealterten Composite-Druckgefäßes von außen durch das CFK hindurch bei einer Prüffrequenz von 5 kHz.

Der durch das CFK bedingte Abstand der Wirbelstromsonde zum Liner von ca. 8 mm erfordert relativ große Wirbelstromsonden mit entsprechend hoher Wirkbreite und dementsprechend geringer örtlicher Auflösung.

## 1.2 konventionelle Wirbelstromprüfung metallischer Liner von innen

Um einerseits auch bei Linern aus ferromagnetischem Stahl Anrisse auf der Innenseite detektieren zu können, andererseits die Prüfaussage insgesamt zu verbessern, wurde eine Vorrichtung zur Innenprüfung der Druckgefäße mit dem Wirbelstromprüfverfahren entwickelt und zum Patent angemeldet (Abbildung 3) [4]. Die besondere Herausforderung bei der Prüfung von innen besteht in der beschränkten Zugänglichkeit des Behälterinneren durch den Ventilsitz mit einem Durchmesser von nur ca. 15 mm hindurch.



Abbildung 3: Vorrichtung zur Innenprüfung von Composite-Druckgefäßen

Der minimale Abstand zwischen Wirbelstromsonde und Liner bei der Innenprüfung ermöglicht die Verwendung kleinerer Spulensysteme und somit eine höhere örtliche Auflösung und bessere Bildqualität bei der bildgebenden Wirbelstromprüfung.

Mit der Innenprüfung mit konventionellem Wirbelstrom lassen sich Schäden in metallischen Linern wie Risse und Korrosion bereits in einem frühen Stadium nachweisen (Abbildung 4). Die schwarzen Signale an den Bildrändern werden von einem Magneten verursacht, der von außen als 0°-Markierung am Druckgefäß befestigt wurde.

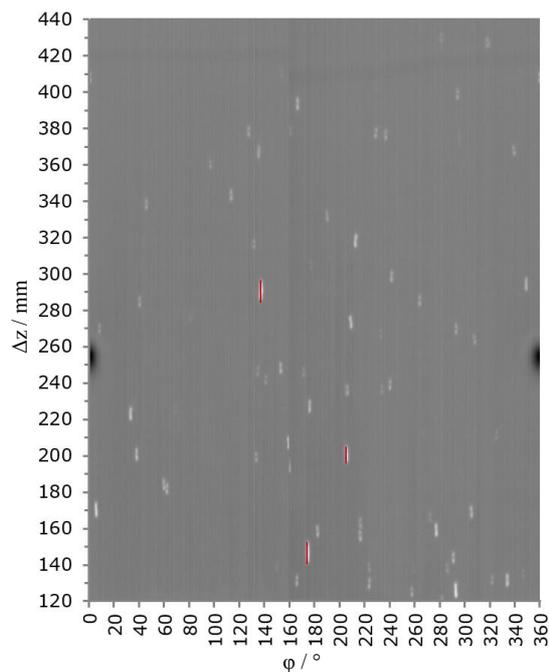


Abbildung 4: Ergebnis der bildgebenden Wirbelstrom-Innenprüfung des Aluminiumliners desselben Composite-Druckgefäßes wie in Abbildung 2 bei einer Prüffrequenz von 300 kHz. Die Anzeigen der Außenprüfung sind rot markiert.

### 1.3 hochfrequente Wirbelstromprüfung des CFK von außen

CFK besteht aus elektrisch leitenden Kohlefasern in einer dielektrischen Harzmatrix. Aufgrund der kapazitiven Kopplung zwischen den Kohlefasern bzw. Faserbündeln werden Prüffrequenzen oberhalb des Frequenzbereiches konventioneller Wirbelstromprüfgeräte benötigt, um in CFK Wirbelströme ausreichender Stromdichte induzieren zu können. An der BAM wurde daher ein Hochfrequenz-Wirbelstromprüfsystem unter Verwendung eines Vektornetzwerkanalysators mit einem Frequenzbereich von 300 kHz bis 2 GHz aufgebaut.

Bei einer Prüffrequenz von ca. 300 MHz ist die CFK-Struktur deutlich zu erkennen (Abbildung 5). Die dunklen Anzeigen am linken und rechten Bildrand sowie im unteren Bildbereich stammen von aufgeklebten Aluminiumstreifen, die als Referenzmarken für die Positionierung des Druckgefäßes dienen.

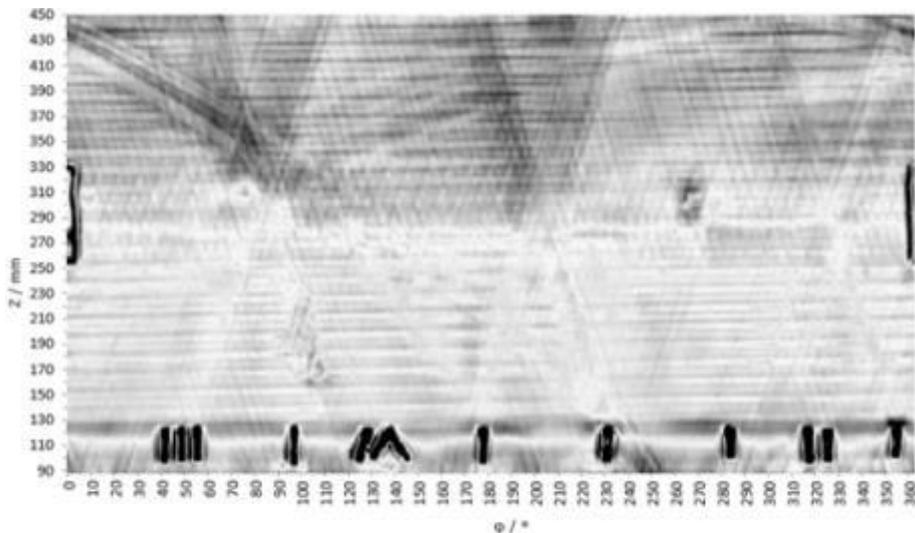


Abbildung 5: hochfrequente Wirbelstromprüfung des CFK bei einer Prüffrequenz von 303 MHz

Mit höheren Prüffrequenzen bis in den GHz-Bereich treten zunehmend flächige Strukturen hervor, die vermutlich auf den dielektrischen Eigenschaften der Harzmatrix beruhen (Abbildung 6).

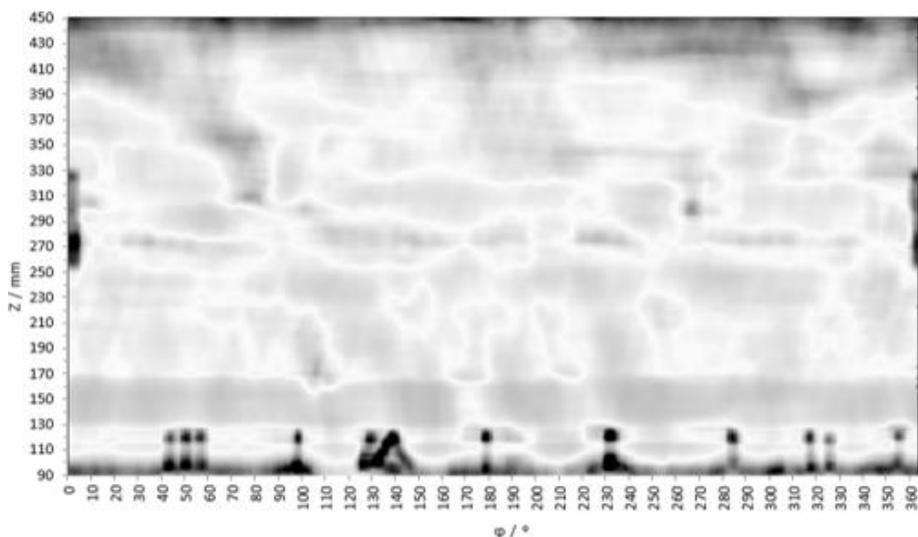


Abbildung 6: hochfrequente Wirbelstromprüfung des CFK bei einer Prüffrequenz von 675 MHz.

Eine alterungsbedingte Degradation des CFK wie z. B. Delamination oder Faserbündelbrüche konnten nicht nachgewiesen werden.

## 2. Verifizierung der Prüfergebnisse

### 2.1 konventionelle Wirbelstromprüfung metallischer Liner

Zur Verifizierung der Prüfergebnisse wurde das Composite-Druckgefäß aus Abbildung 2 und Abbildung 4 zunächst in zwei Hälften zersägt und einer Sicht- und Farbeindringprüfung unterzogen.

Während bei der Sichtprüfung nur ein Teil der Wirbelstromanzeigen verifiziert werden konnte (Abbildung 7), zeigte die Farbeindringprüfung eine sehr gute Übereinstimmung mit dem Prüfergebnis der konventionellen Wirbelstromprüfung von innen (Abbildung 8).

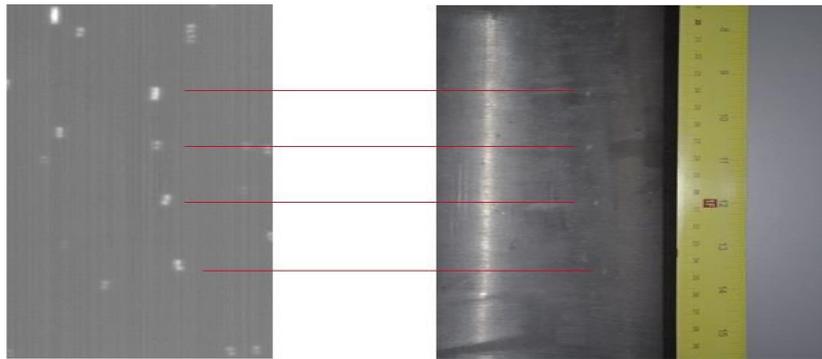


Abbildung 7: Beispielhafter Ausschnitt der Wirbelstrom-Innenprüfung (links) und Sichtprüfung am aufgesägten Druckgefäß (rechts)

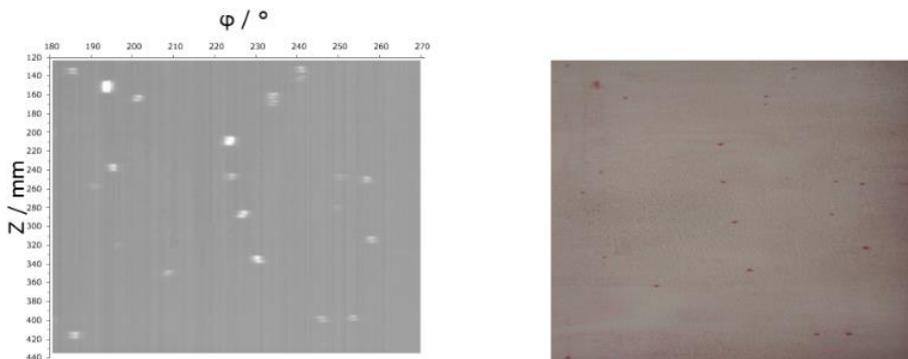


Abbildung 8: Beispielhafter Ausschnitt der Wirbelstrom-Innenprüfung (links) und Farbeindringprüfung am aufgesägten Druckgefäß (rechts)

Im nächsten Schritt wurden von ausgewählten Anzeigen Schliffbilder angefertigt (Abbildung 9). Hierbei wurde die Vermutung bestätigt, dass es sich bei den beiden Wirbelstromanzeigen der Außenprüfung mit der höchsten Amplitude um durchgängige Risse und bei der Anzeige mit der niedrigeren Amplitude um einen Anriss von innen (ca.  $\frac{2}{3}$  der Wandstärke) handelt.

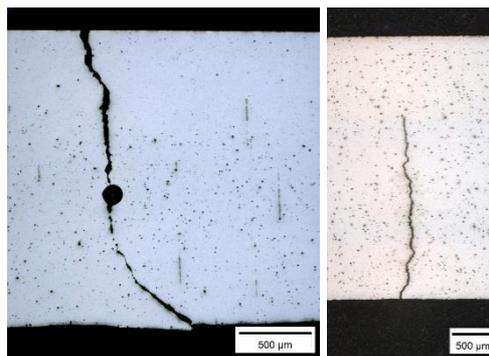


Abbildung 9: Schliffbilder der beiden oberen Anzeigen aus Abbildung 2, Leckage (links), Anriss von innen (rechts)

## 2.2 hochfrequente Wirbelstromprüfung des CFK

In eines der Druckgefäße wurden nachträglich Sägeschnitte verschiedener Orientierung und Tiefe durch das GFK hindurch in das CFK eingebracht. Sägeschnitte quer zur Faserrichtung dienen der Simulation von Faserbündelrissen, Sägeschnitte parallel zu Faserrichtung der Simulation von Faser-Matrix-Ablösungen. (Abbildung 10)

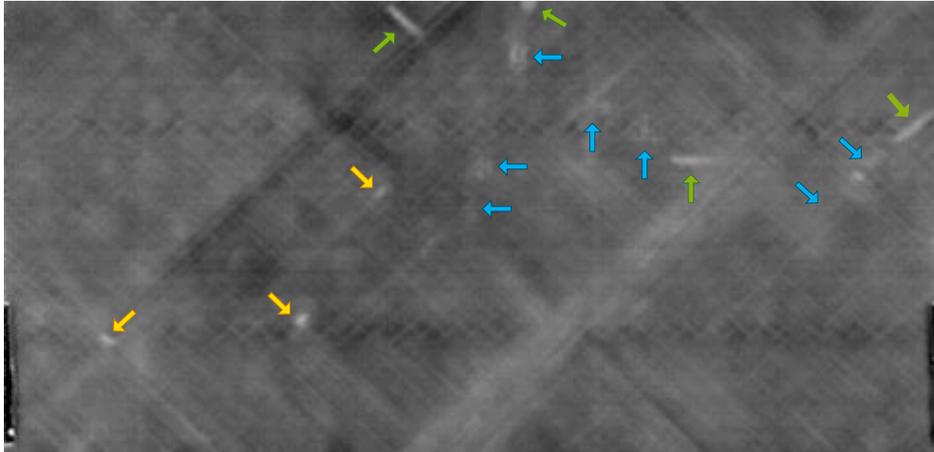


Abbildung 10: Ergebnis der hochfrequenten Wirbelstromprüfung an einem Druckgefäß mit Sägeschnitten unterschiedlicher Tiefe (grün ca. 6 mm, blau ca. 2 mm) bei einer Prüffrequenz von 400 MHz

Im Anschluss an die Prüfung wurde die äußere Schutzschicht aus GFK entfernt, um die Tiefe der Sägeschnitte im CFK bestimmen zu können. Die in Abbildung 10 grün markierten Anzeigen stammen von Sägeschnitten, die ca. 4 bis 5 mm in das CFK hineingehen und somit die Kohlefaserbündel durchtrennen. Die blau markierten Anzeigen stammen von Sägeschnitten, die das CFK nur leicht ankratzen. Hier konnte keine Tiefe bestimmt werden. Daneben gibt es auch Anzeigen an Stellen, an denen keine künstlichen Fehlstellen eingebracht wurden (gelb markiert), deren Ursache noch nicht geklärt werden konnte.

Derzeit laufen an der BAM im Rahmen einer Bachelorarbeit weitere Untersuchungen zum Verhalten der hochfrequenten Wirbelstromprüfung an einzelnen Kohlefaserbündeln. Entgegen der Theorie, dass sich CFK nur deshalb mit dem Wirbelstromverfahren prüfen lässt, da sich durch die kapazitive Kopplung bzw. Berührung benachbarter Fasern Wirbelströme über mehrere Fasern hinweg ausbreiten können [2], gelingt mit der hochfrequenten Wirbelstromprüfung bereits die Detektion einzelner Fasern (Abbildung 11).

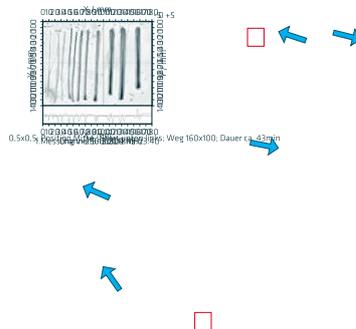


Abbildung 11: Ergebnis der hochfrequenten Wirbelstromprüfung an einzelnen Kohlefaserbündeln zwischen zwei Lagen Klebefolie bei einer Prüffrequenz von 300 MHz, Einzelfasern blau, mikroskopisch aufgenommene Bereiche (Abbildung 12) rot markiert

Neben den Kohlefasern sind im Prüfergebnis an Stellen, an denen mit bloßem Auge nichts zu erkennen ist, einige kleine Flecken zu sehen. Erst unter dem Mikroskop zeigt sich, dass es sich auch hierbei um einzelne, kurze Kohlefasern handelt (Abbildung 12). Der Durchmesser der Kohlefasern beträgt laut Datenblatt [5] 7 µm.

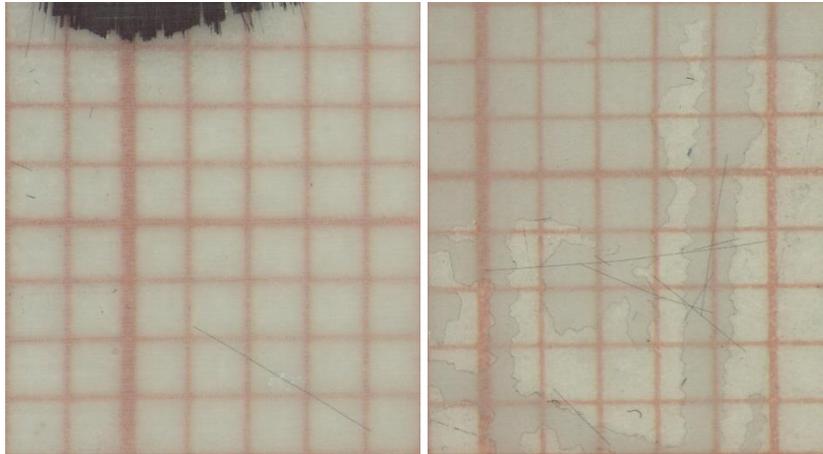


Abbildung 12: Mikroskopische Aufnahmen zweier exemplarischer Stellen hinterlegt mit mm-Papier, an denen im Prüfergebnis (Abbildung 11) kleine Flecken zu sehen sind.

## Referenzen

- [1] G. Mair, „Auch unter Druck lange zuverlässig,“ Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), [Online]. Available: <https://www.bam.de/Content/DE/Projekte/laufend/Material/projekt-composite-druckgefaesse.html>. [Zugriff am 26. März 2019].
- [2] R. Lange und G. Mook, „Structural analysis of CFRP using eddy current methods,“ *NDT&E International*, Nr. Volume 27, Number 5, pp. 241-248, 1994.
- [3] G. W. Mair, F. Scherer and E. Duffner, "Concept of interactive determination of safe service life for composite cylinders by destructive tests parallel to operation," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 120, pp. 36-46, 2014.
- [4] R. Casperson, A. Knöppchen und R. Pohl, „Messeinrichtung, Messstand und Verfahren zur zerstörungsfreien Innenprüfung von zylindrischen Prüfkörpern, insbesondere Composite-Druckgasflaschen, mittels Wirbelstrom“. Deutschland Patent DE 10 2017 100 643 A1, 2017.
- [5] TEIJIN Carbon Europe GmbH, „Tenax® Filamentgarn,“ 27. Juni 2018. [Online]. Available: [https://www.tejincarbon.com/fileadmin/PDF/Datenbl%C3%A4tter\\_dt/Filament-Produktprogramm\\_\\_EU\\_\\_v27\\_2018-06-27\\_DT.pdf](https://www.tejincarbon.com/fileadmin/PDF/Datenbl%C3%A4tter_dt/Filament-Produktprogramm__EU__v27_2018-06-27_DT.pdf). [Zugriff am 28. März 2019].