

Wirbelstromprüfung an Composite-Druckgefäßen

Ralf CASPERSON¹, Dorit MUNZKE², Rainer POHL¹,

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

¹ Fachbereich 8.4: Zerstörungsfreie Prüfung, Akustische und elektromagnetische Verfahren

² Fachbereich 8.6: Zerstörungsfreie Prüfung, Faseroptische Sensorik

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 wird in der BAM das interdisziplinäre Themenfeldprojekt COD-AGE durchgeführt [1]. Ziel des Projektes ist die Entwicklung von Methoden und Modellen zur Beschreibung und Bestimmung des Alterungsverhaltens von Carbonfaser-Compositen (CFK) am Beispiel von Druckgefäßen, um eine bessere Vorhersage der Alterung und der sicheren Gebrauchsdauer zu ermöglichen.

Ein Schwerpunkt in diesem Projekt ist die Bereitstellung geeigneter ZfP-Methoden. Dabei geht es sowohl um versuchsbegleitende Prüfungen, als auch um die mögliche Entwicklung von Prüfeinrichtungen für den späteren praktischen Gebrauch. In diesem Vortrag werden Prüfsysteme und Prüfergebnisse der „konventionellen“ Wirbelstromprüfung vorgestellt. In einem ersten Schritt wurden Versuche an bereits geschädigten Druckgefäßen durchgeführt. Dabei wurden Druckgefäße mit den Materialpaarungen Stahl-CFK, Aluminium-CFK und Kunststoff-CFK untersucht. Die Dicken der CFK-Schichten reichten hierbei von ca. 4 mm bis ca. 8 mm. Anfangs wurden die Gefäße mit verschiedenen Sensoren von außen geprüft. Es konnten sowohl Beschädigungen des metallischen Liners, als auch Strukturen des CFK-Geflechts nachgewiesen werden. In einem zweiten Schritt wurden die Gefäße von innen geprüft. Hierbei bestand die besondere Herausforderung in der Prüfung eines Zylinders von 150 mm Durchmesser durch einen Zugang von nur 15 mm Durchmesser.

Mit den bei diesen Vorversuchen optimierten Prüfsystemen wurden dann begleitende Prüfungen bei Alterungsversuchen durchgeführt. In den Alterungsversuchen wurden Druckbehälter mit einem ca. 4 mm dicken Aluminiumliner und ca. 3,5 mm dicker CFK-Ummantelung untersucht. Typisches Einsatzgebiet solcher Flaschen sind Atemschutzgeräte bei der Feuerwehr. Die verschiedenen Prüfsysteme und die mit ihnen erzielten Ergebnisse werden vorgestellt.

1 Einleitung

Druckgefäße aus Stahl oder Aluminium für den Transport gefährlicher Gase werden gemäß den Vorschriften für Gefahrguttransporte der Vereinten Nationen [2] alle 5 oder 10, in Ausnahmefällen sogar nur alle 15 Jahre einer hydraulischen Innendruckprüfung unterzogen. Im Fahrzeugbereich werden metallische Druckgefäße auf eine Lebensdauer von 20 Jahren ausgelegt, wobei davon ausgegangen wird, dass die Lebensdauer des gesamten Fahrzeugs weniger als 20 Jahre beträgt und somit auf eine wiederkehrende Prüfung der Druckgefäße verzichtet werden kann [3] [4]. Grundlage für die Auslegung metallischer Druckgefäße ist die Dauerfestigkeit nach Wöhler, wobei die Zahl der Lastwechsel mit der Anzahl der Befüllungs-/Entleerungszyklen des Druckgefäßes gleichgesetzt werden kann.

Composite-Druckgefäße bieten gegenüber metallischen Druckgefäßen den Vorteil einer enormen Gewichtseinsparung. Composite-Druckgefäße bestehen aus einem sog. Liner aus Metall oder Kunststoff, der die Gasdichtheit sicherstellt aber nur sehr geringen Innendruck aushält. Um diesen Liner wird ein Gewebe aus CFK gewickelt, das die gesamten Zugspannungen aufnimmt und somit die Druckfestigkeit des Gefäßes sicherstellt. Darüber befinden sich oft ein oder mehrere Lagen Glasfaser-Composite (GFK), die das CFK vor mechanischer Beschädigung schützen. Auch die Composite-Druckgefäße werden derzeit ausschließlich einer hydraulischen Innendruckprüfung unterzogen. Anders als bei metallischen Druckgefäßen ist es jedoch nicht möglich, aus der Zahl der Lastwechsel auf die Dauerfestigkeit zu schließen, da Composite-Druckgefäße auch bei konstantem Innendruck altern [3] [4].

Im Rahmen des BAM-internen Themenfeldprojektes „COD-AGE“ [1] werden derzeit die noch weitgehend unbekanntenen Alterungsmechanismen erforscht, begleitet durch diverse ZfP-Verfahren wie Computertomographie (CT), Wirbelstromprüfung (ET), Thermografie (TT) und Ultraschallprüfung (UT).

Bei der Wirbelstromprüfung an Composite-Druckgefäßen ergeben sich aufgrund der komplexen Struktur des Prüfobjektes Wirbelstromsignale, die sich in der üblichen XY-Darstellung der Prüfgeräte kaum noch interpretieren lassen. Erst durch eine bildgebende Wirbelstromprüfung mittels mechanisierter Abtastung, ortsgetreuer Datenaufzeichnung und -visualisierung gelingt es, aussagekräftige Prüfergebnisse zu erlangen.

2 Vorversuche

Für erste Untersuchungen wurde ein Composite-Druckgefäß mit einer Leckage, bestehend aus einem 2,7 mm dicken Stahlliner und einer 5 mm dicken CFK-Ummantelung, in zwei Hälften zersägt. Als Leckage konnte mittels Magnetpulverprüfung (MT) von der Innenseite aus ein ca. 30 mm langer Riss im Liner nachgewiesen werden (Abb. 1, links). Im nächsten Schritt wurden verschiedene Wirbelstromsonden erprobt, um den Riss im Liner von außen durch das CFK hindurch mit dem Wirbelstromverfahren nachzuweisen. Die besten Ergebnisse lieferte eine Wirbelstromsonde vom Typ SK-14 TA, die an der BAM zur Detektion verdeckter Korrosionsschäden in Aluminium entwickelt wurde, bei einer Prüffrequenz von 5 kHz (Abb. 1, rechts).

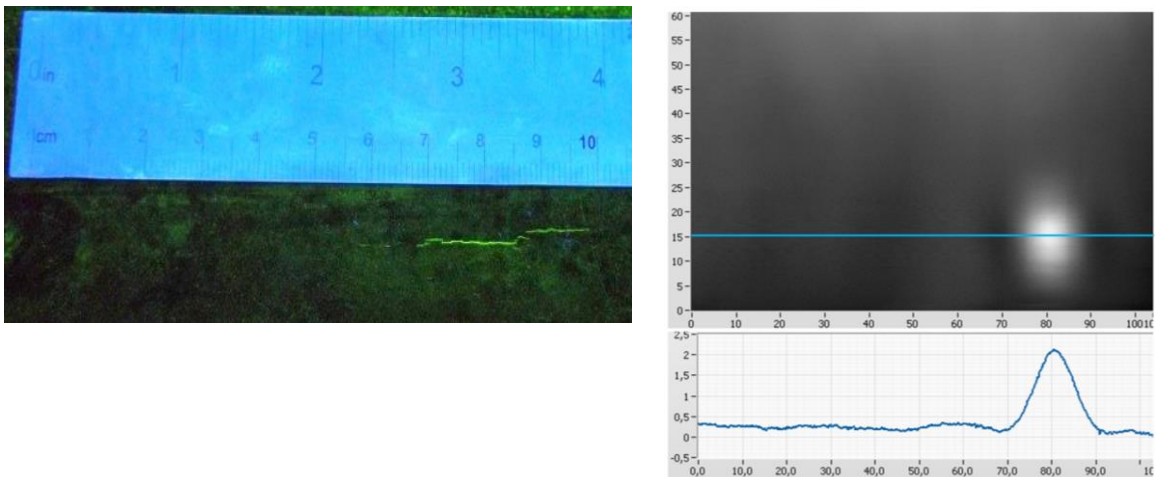


Abb. 1: Nachweis einer Leckage mit MT von der Innenseite (links) und ET von außen durch das CFK hindurch (rechts).

2.1 Außenprüfung

Es wurden zwei komplette Druckgefäße sowohl mit Stahlliner (Abb. 2) als auch mit Aluminiumliner (Abb. 3) von außen mit dem Wirbelstromverfahren geprüft. Das Druckgefäß mit Stahlliner wurde aufgrund einer Leckage ausgesondert, das Druckgefäß mit Aluminiumliner war bis zum Ende der zulässigen Betriebsdauer von 15 Jahren im Einsatz und wurde anschließend hydraulisch mit insgesamt 4444 Lastwechseln bis zur Leckage beansprucht.

In der bildhaften Darstellung des Prüfergebnisses an dem Composite-Druckgefäß mit Stahlliner (Abb. 2) sind deutlich zwei Anzeigen erkennbar. Aufgrund der geringen Eindringtiefe der Wirbelströme in Stahl und der Kenntnis aus der Bruchmechanik, dass die Risse von innen nach außen wachsen [4], kann es sich bei den Anzeigen nur um durchgängige Risse handeln.

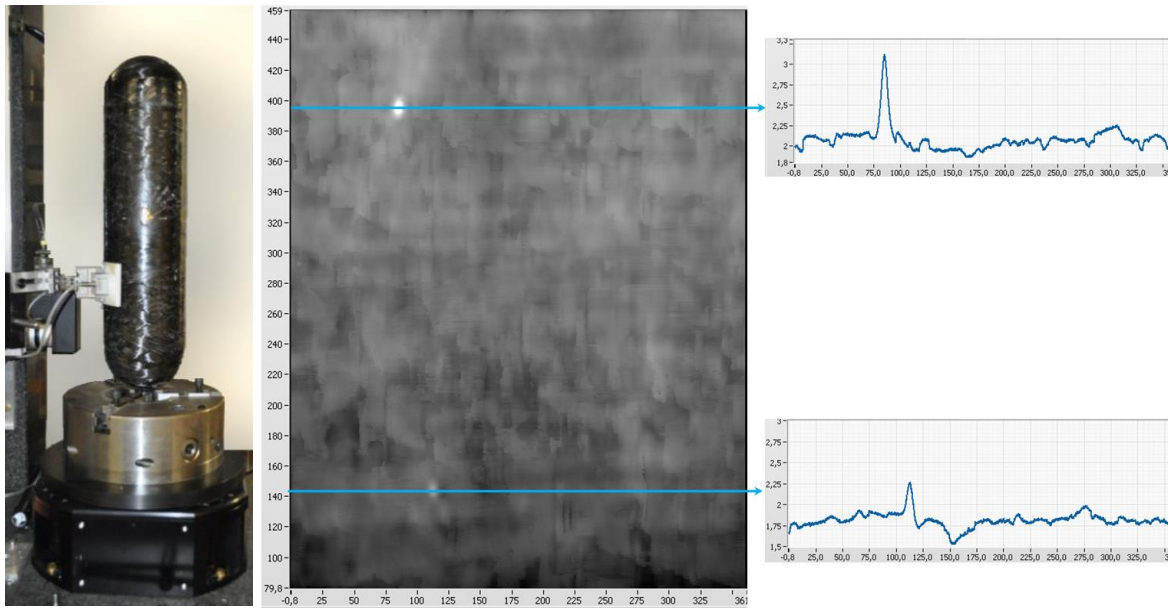


Abb. 2: Mechanisierte Wirbelstromprüfung eines Composite-Druckgefäßes mit Stahlliner (links), bildhaftes Prüfergebnis (Mitte) und ausgewählte Prüfspuren (rechts).

Bei dem Druckgefäß mit Aluminiumliner sind in der bildhaften Darstellung insgesamt drei rissartige Anzeigen erkennbar (Abb. 3). Da die Eindringtiefe der Wirbelströme in Aluminium bei der gewählten Prüffrequenz durch den gesamten Liner hindurch reicht, lassen sich -im Gegensatz zum Stahlliner- auch Anrisse auf der Innenseite des Liners nachweisen. Die unterschiedlichen Amplituden der drei Rissanzeigen legen die Vermutung nahe, dass es sich bei der unteren Anzeige um die Leckage und bei der oberen Anzeige um einen Riss handelt, der fast bis zur Oberfläche durchgewachsen ist. Die mittlere Anzeige stellt wahrscheinlich einen Anriss dar, der noch weit von der Oberfläche entfernt ist. Genauere, ggf. zerstörende Untersuchungen stehen noch aus.

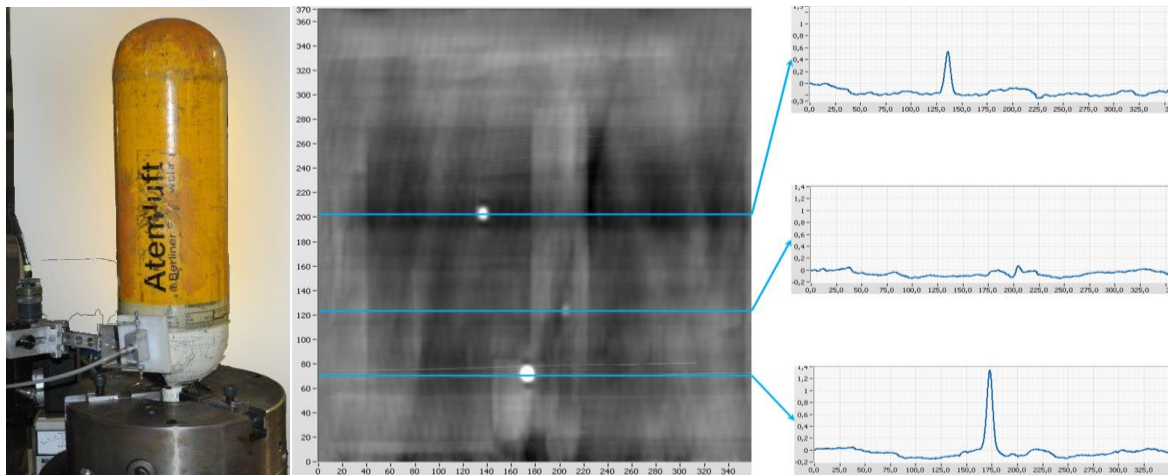


Abb. 3: Mechanisierte Wirbelstromprüfung eines Composite-Druckgefäßes mit Aluminiumliner (links), bildhaftes Prüfergebnis (Mitte) und ausgewählte Prüfspuren (rechts).

Auffällig an beiden Prüfergebnissen ist die gestreifte Untergrundstruktur, die besonders beim Aluminiumliner deutlich ausgeprägt ist (Abb. 3, Mitte). Die großflächigen, rechteckigen Muster sind auf Abhebeeefekte aufgrund von Aufklebern („Atemluft“) zurückzuführen. Für das Streifenmuster bestand die Vermutung, dass sich hier bereits bei einer Prüffrequenz von 5 kHz das CFK-Gelege im Signal abbildet, obwohl zur Wirbelstromprüfung von CFK wegen der kapazitiven Kopplung der Kohlefasern normalerweise Prüffrequenzen im MHz-Bereich erforderlich sind.

Zur Verifizierung wurde ein Druckgefäß aus einem 1 mm dicken Kunststoffliner mit einer 8 mm dicken CFK-Umwicklung geprüft (Abb. 4). Auch hier ist das Streifenmuster deutlich zu erkennen. Da bei diesem Druckgefäß außer dem CFK keine weiteren elektrisch leitfähigen Materialien vorhanden sind, können die sichtbaren Strukturen nur vom CFK-Gelege stammen.

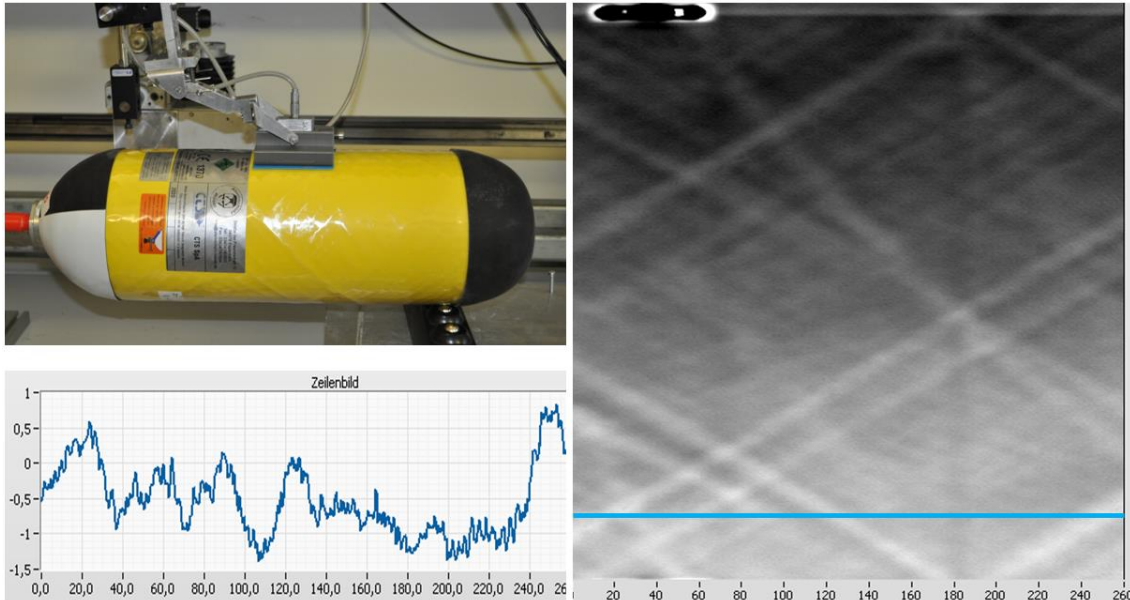


Abb. 4: Mechanisierte Wirbelstromprüfung eines Composite-Druckgefäßes mit Kunststoffliner (oben links), bildhaftes Prüfergebnis (rechts) und ausgewählte Prüfspuren (unten links).

Es wurden weitere Untersuchungen mit konventioneller Wirbelstromprüfung an CFK-Platten mit künstlichen Fehlstellen durchgeführt (P60) [5]. Dabei hat sich herausgestellt, dass sich manche CFK-Vergleichskörper sehr gut bei einer Prüffrequenz von wenigen kHz mit der Wirbelstromprüftechnik prüfen lassen, während das Wirbelstromprüfgerät auf andere CFK-Vergleichskörper in diesem Frequenzbereich keine Reaktion zeigt. Der Unterschied liegt vermutlich darin, dass bei prüfbarem CFK die Fasern der verschiedenen Orientierungsrichtungen galvanisch kontaktieren, während bei nicht prüfbarem CFK die Fasern galvanisch voneinander isoliert und somit nur kapazitiv gekoppelt sind.

Da sich in den Vorversuchen die Zuordnung der Prüfergebnisse zur Lage auf dem Druckgefäß besonders in Umfangsrichtung als problematisch erwiesen hat, wurde beschlossen, alle Druckgefäße mit einer Referenzmarke aus Aluminiumfolie zu versehen. Diese Referenzmarke bildet sich bei der Wirbelstromprüfung deutlich in den Messdaten ab (oben links in Abb. 4, rechts). Die Tatsache, dass das Signal der Referenzmarke eventuelle Defekte überdeckt, der Bereich der Marke somit ungeprüft bleibt, wird dabei in Kauf genommen.

2.2 Innenprüfung

In 2.1 wurde gezeigt, dass sich nach außen hin offene Risse in metallischen Linern -bei Aluminiumlinern auch verdeckte Risse- mit dem Wirbelstromprüfverfahren von außen durch das CFK hindurch nachweisen lassen. Allerdings ist die örtliche Auflösung aufgrund des großen Abstandes zwischen der Wirbelstromsonde und dem Liner begrenzt.

Aufgrund von bruchmechanischen Überlegungen kann davon ausgegangen werden, dass Risse im Liner von innen nach außen wachsen [4]. Um bereits kleine Anrisse frühzeitig detektieren zu können, ist eine Prüfung des Liners von innen unerlässlich. Die größte Herausforderung bei der Druckgefäßinnenprüfung besteht darin, dass das Innere nur über den Ventilsitz zugänglich ist. Für die Wirbelstromprüfung musste ein spezieller Sondenhalter

entwickelt werden, der durch die 15 mm große Öffnung passt und sich an die Zylinderfläche mit einem Innendurchmesser von 180 mm anlegt (Abb. 5). Die Prüfvorrichtung wurde von der BAM zum Patent angemeldet [6].

Da die Referenzmarke (siehe 2.1) von innen nicht sichtbar ist, wird bei der Innenprüfung ein kleiner Permanentmagnet auf der Referenzmarke befestigt, dessen Magnetfeld in den Messdaten der Innenprüfung einen blinden Fleck erzeugt.



Abb. 5: Vorrichtung für die Innenprüfung von Druckgefäßen mit dem Wirbelstromverfahren.

Wird das Druckgefäß aus Abb. 3 von innen geprüft, sind neben den drei Leckagen (rote Pfeile) viele weitere Anzeigen geringerer Amplitude erkennbar (Abb. 6). Dabei handelt es sich vermutlich um Anrisse geringerer Tiefe. Lochkorrosion kann ausgeschlossen werden, da eine Sichtprüfung mit einem Videoskop keinen Befund zeigte.

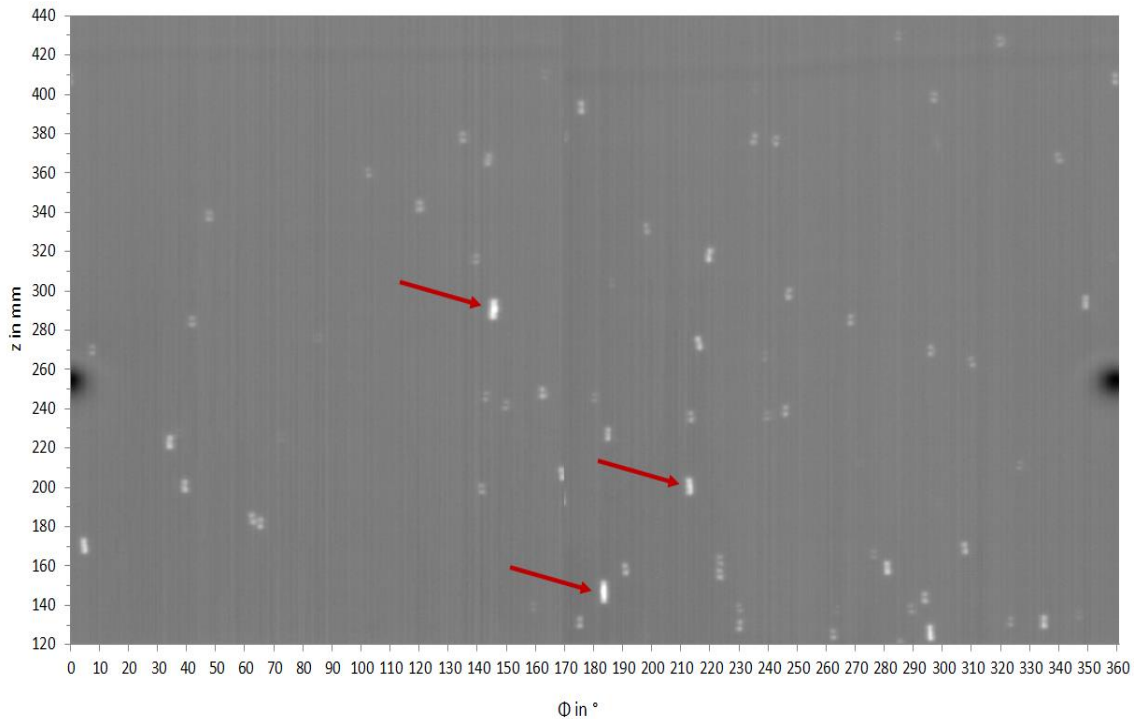


Abb. 6: Innenprüfung des Druckgefäßes aus Abb. 3, Befunde der Außenprüfung mit roten Pfeilen markiert. (Skalierung in Zylinderkoordinaten: Länge z bezogen auf den Ventilsitz über Drehwinkel ϕ .)

2.3 HF-Wirbelstromprüfung

Zur Prüfung von CFK-Strukturen werden i. A. Prüffrequenzen verwendet, die oberhalb des Frequenzbereiches konventioneller Wirbelstromprüfgeräte liegen. Aus diesem Grund wurde ein spezieller Prüfplatz für die hochfrequente Wirbelstromprüfung der Composite-Druckgefäße aufgebaut (Abb. 7, links). Als Prüfgerät dient ein Vektornetzwerkanalyser mit einem Frequenzbereich von 300 kHz bis 2 GHz.

Häufig werden für die Wirbelstromprüfung von CFK richtungsabhängige Differenzsonden eingesetzt, da mit Hilfe eines Rotors der Lagenaufbau des CFKs ermittelt bzw. durch Drehen der Sonde die Prüfeempfindlichkeit gezielt auf eine bestimmte Faserorientierung optimiert werden kann. Hier wurden dagegen richtungsunabhängige, für hohe Frequenzen optimierte Absolutensoren verwendet. Auf diese Weise werden alle Faserorientierungen gleichwertig erfasst (Abb. 7, rechts). Eine richtungsabhängige Auswertung erfolgt ggf. im Anschluss an die bildgebende Wirbelstromprüfung mit entsprechenden Methoden der Bildverarbeitung.

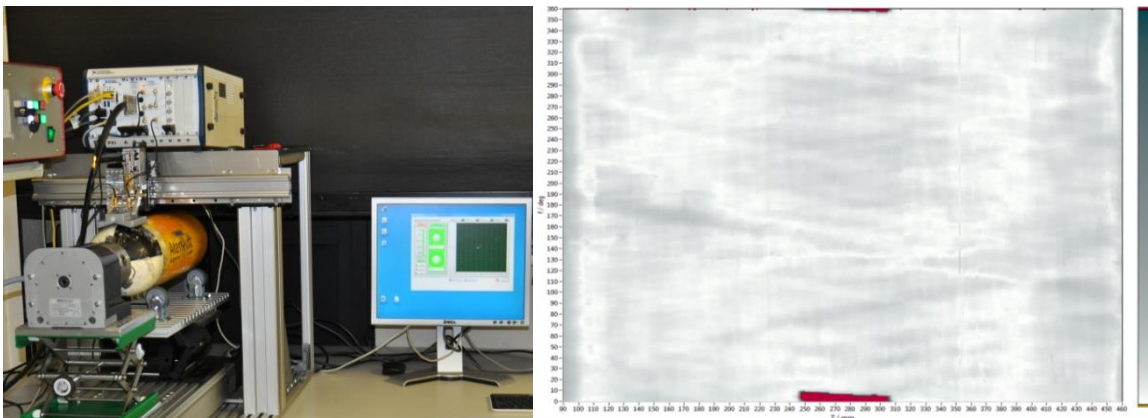


Abb. 7: Prüfplatz für die HF-Wirbelstromprüfung (links) und exemplarisches Prüfergebn bei einer Prüffrequenz von 666 MHz (rechts).

3 Wirbelstromprüfung bei Alterungsversuchen

Im Rahmen des BAM-internen COD-AGE-Projektes [1] werden fabrikneue Composite-Druckgefäße mit hydraulischen Lastwechseln und Zeitstandslagerung bei erhöhtem konstanten Innendruck künstlich gealtert. Zu Beginn sowie nach einer bestimmten Anzahl an Lastwechseln bzw. Zeitstandsdauer werden die Druckgefäße mit diversen ZfP-Methoden untersucht, u. A. mit Wirbelstrom (dieses Dokument) und Ultraschall (Mi.1.8.4) [7].

Die hier gezeigten Ergebnisse der bildgebenden Wirbelstromprüfung (Abb. 8) stammen von einem Composite-Druckgefäß bestehend aus einem 4 mm dicken Aluminiumliner, einer ca. 3,5 mm dicken CFK-Ummantelung und einer ca. 1 mm dicken GFK-Schicht, das nach 5434 Lastwechseln eine Leckage aufwies.

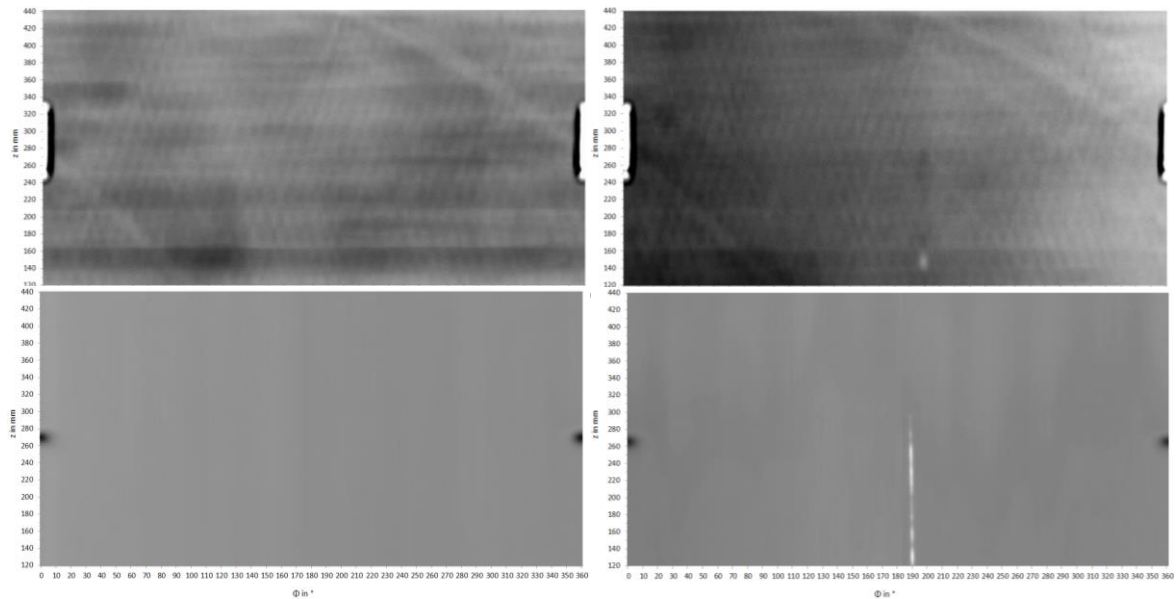


Abb. 8: Bildgebende Wirbelstromprüfung an einem Composite-Druckgefäß vor (links) und nach Lastwechseln bis zur Leckage (rechts), Prüfung von außen (oben) und innen (unten).

Die schon in den Vorversuchen verwendeten Referenzmarken zeichnen sich in allen Prüfungen deutlich ab. Die Leckage stellt sich in der Außenprüfung als heller Fleck (Durchbruch bis zur Oberfläche) mit nachfolgendem dunklen Schatten (verdeckter Riss) im unteren, mittleren Bereich dar (Abb. 8, oben rechts). An gleicher Position ist bei der Innenprüfung (Abb. 8, unten rechts) eine lange, rissartige Anzeige als weißer Streifen zu erkennen. Auffällig ist auch, dass bei der Außenprüfung das Streifenmuster beim gealterten Druckgefäß (Abb. 8, oben rechts) im Vergleich zum fabrikneuen Gefäß (Abb. 8, oben links) schwächer geworden ist. Inwiefern diese Änderungen im Streifenmuster auf Alterungserscheinungen des CFK zurückzuführen sind, wird in weiteren Prüfungen untersucht werden müssen.

Ein Vergleich der Innenprüfung an fabrikneuen, künstlich gealterten Druckgefäßen (Abb. 8) mit im realen Betrieb gealterten Composite-Druckgefäßen (Abb. 6 und andere) zeigt vollkommen verschiedene Schadensbilder. Im realen Betrieb bilden sich auf der Innenseite viele kleine Anrisse, von denen einer oder zwei bis zur Leckage nach außen wachsen. Die Anrisse können wie in Abb. 6 gleichmäßig über das ganze Gefäß verteilt sein oder sich in Rissnestern konzentrieren. Die künstlich gealterten Druckgefäße zeigen dagegen nur einen einzigen, aber dafür deutlich ausgebildeten langen Riss.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Es konnte gezeigt werden, dass sich mit der konventionellen Wirbelstromprüfung Leckagen in Composite-Druckgefäßen mit metallischem Liner sowohl von außen durch das CFK hindurch als auch von innen gut detektieren lassen. Eine Detektion kleiner Anrisse gelingt jedoch nur mit der Innenprüfung. Ferner gibt es Hinweise darauf, dass sich mit der konventionellen Wirbelstromprüfung von außen auch Alterungserscheinungen im CFK nachweisen lassen. Bei der HF-Wirbelstromprüfung steht ein Vergleich der Signale zwischen fabrikneuem und gealtertem Zustand desselben Druckgefäßes noch aus.

Bisher wurden zwei Composite-Druckgefäße im fabrikneuen Zustand und nach Auftreten einer Leckage mit der konventionellen Wirbelstromprüfung geprüft. In einem zweiten Versuchsdurchlauf sollen mehrere Composite-Druckgefäße nicht mehr gleich bis zur Leckage, sondern in mehreren Stufen gealtert werden. Die diversen ZfP-Verfahren sollen diesmal sowohl im Neuzustand als auch nach jeder Alterungsstufe angewendet werden. Hierbei wird auch die HF-Wirbelstromprüfung zum Einsatz kommen. Inwiefern die Signale aus den CFK-Strukturen zu Aussagen über deren Alterungszustand genutzt werden können, werden die weiteren Untersuchungen zeigen.

5 Literaturverzeichnis

- [1] B. Becker, „Auch unter Druck lange zuverlässig,“ Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), [Online]. Available: <https://www.bam.de/Content/DE/Projekte/Material/composite-druckgefasse.html>. [Zugriff am 21. Februar 2017].
- [2] United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), "UN Recommendations on the Transport of Dangerous Goods - Model Regulations," vol. 2, Genf, 2015, pp. 211-239.
- [3] G. W. Mair, „Die betriebsbegleitende Prüfung als Methode der Sicherheitsüberwachung und interaktiven Lebensdauerfestlegung an Composite-Druckbehältern,“ *Technische Überwachung*, Bd. 50, Nr. 7/8, pp. 46-49, 2009.
- [4] 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.
- [5] R. Pohl, R. Casperson, C. Maierhofer, J. P. Müller und M. Pelkner, „Gegenüberstellung von Wirbelstromprüfung und aktiver Thermografie an CFK-Versuchskörpern,“ *DGZfP Jahrestagung 2017*, Mai 2017.
- [6] R. Casperson, A. Knöppchen und R. Pohl, „Messeinrichtung, Messstand und Verfahren zur zerstörungsfreien Innenprüfung von zylindrischen Prüfkörpern, insbesondere Composite-Druckgasflaschen, mittels Wirbelstrom“. Deutschland Patent 102017100643.5, 2017.
- [7] M. Schulz und D. Brackrock, „Komposit-Druckbehälter-Innenprüfung mit UT Phased-Array,“ *DGZfP-Jahrestagung 2017*, Mai 2017.