Modalanalyse als Werkzeug zur Lebensdauerabschätzung bei Composite-Druckbehältern

Sebastian John[1], Marinus P. Widjaja[2], Georg W. Mair[1]

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
[1]Fachbereich 3.5 – Sicherheit von Gasspeichern, 12203 Berlin,
[2]Fachbereich 8.3 - Radiologische Verfahren, 12205 Berlin,
E-Mail: sebastian.john@bam.de

Einleitung

Im Druckbehälterbau ist der Einsatz von Faser-Kunststoff-Verbunden (FKV) für mobile Anwendungen mittlerweile Stand der Technik. Auf Grund ihres Gewichtsvorteils bei gleichzeitig hoher Steifigkeit und Festigkeit kommen genannte Leichtbaustrukturen unter anderem als Wasserstoffspeicher im Kraftfahrzeug (KFZ) zum Einsatz. Im Vergleich zu den lang und gut erforschten metallischen Werksstoffen ist beim FKV das komplexe auftretende Degradations- und Schädigungsverhalten bisweilen noch nicht ausreichend genau bekannt. Weiterhin sind auf Grund des komplexen mehrlagigen Verbundaufbaus Defekte und Beschädigungen nur schwer und ggf. nur mit erheblichem messtechnischem Aufwand zu detektieren. Genannte Aspekte erschweren eine sicherheitstechnische Beurteilung als auch die Abschätzung einer sicheren Lebensdauer. Forschungen an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) beleuchten daher Fragestellungen des Materialverhaltens und -versagens, der Betriebsfestigkeit sowie der Festlegung von Prüffristen für Druckbehälter aus FKV [1][2][3]. Die hier vorgestellten Untersuchungen beziehen sich auf Typ IV-Gasspeicher, die als Wasserstofftanks in KFZ zur Anwendung kommen. Der Aufbau dieser FKV-Behälter besteht aus einem inneren Polyamid (PA)-Liner, der mit einem kohlefaserverstärkten Kunststoff-Verbund vollummantelt ist. Durch den Einsatz eines Messverfahrens auf Basis einer experimentellen Modalanalyse (EMA) sollen Schädigungs- und Degradationsgrad künftig zerstörungsfrei erfasst und auch einsatzbegleitend überwacht werden können.

Prüfkörper und Versuchsaufbau

Dem eingesetzten Messverfahren der experimentellen Modalanalyse liegen die technisch-physikalischen Ansätze einer Änderung von Steifigkeit, Masse und/ oder Dämpfung zu Grunde, welche beispielsweise durch Degradationsprozesse oder örtliche Schädigungen verursacht werden können. Bei einer globalen Veränderung ist von einer großflächigen Veränderung von Werkstoffeigenschaften zu sprechen, welche einen Großteil der Behälterstruktur bzw. des FKV betreffen. Als Beispiel seien weitreichende Delaminationen und größere Bereiche mit Zwischenfaserbrüchen bzw. Brüche im Matrixwerkstoff zu nennen. Ebenso seien (alterungsbedingte) Degradationserscheinungen wie z.B. eine Zerrüttung des Matrixverbunds genannt. Lokale Schädigungen sind örtlich auf einen kleinen Bereich beschränkt und zudem ggf. durch stärkere strukturelle Schädigungen, wie z.B. Brüche einzelner Fasern oder auch dem Versagen ganzer Laminatschichten, gekennzeichnet.

Zum besseren Verständnis zeigt Abbildung 1 eine graphische Zusammenstellung genannter potenzieller Einflussparameter am Beispiel eines FKV-Druckbehälters.

Abbildung 1: Steifigkeits-, Masse und Dämpfungsänderungen, bedingt durch globale Degradationsprozesse und/ oder lokale Schädigungen.

Untersuchungen zum alterungsbedingten globalen Degradationsverhalten wurden bereits umfassend an der BAM untersucht und beispielsweise in [4][5][6] vorgestellt. Im Rahmen der hier gezeigten Untersuchungen wird sich ausschließlich auf die Detektion und Bewertung lokaler Schädigungen bezogen, die zuvor mittels Impacts in die Behälterstruktur eingebracht wurden.

Als Prüfmuster dienen Modell-Wasserstoffbehälter vom Typ IV mit einem Fassungsvolumen von ca. 16 l. Abbildung 2 zeigt schematisch äußere Abmaße und Aufbau der untersuchten Prüfkörper und gibt zudem die zwei verschiedenen Impact-Orte, im Dombereich bzw. im zylindrischen Bereich in der Behältermitte, an.

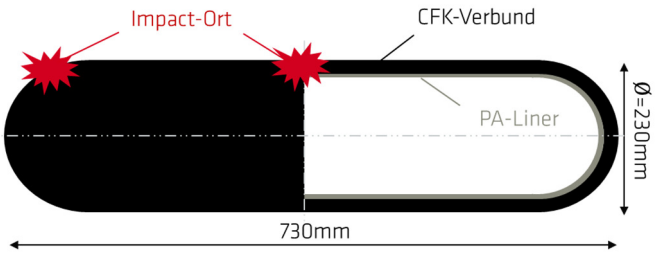

Abbildung 2: Abmaße und Aufbau des verwendeten Prüfmusters.

Bei den durchgeführten Impact-Versuchen wird eine definierte Fallmasse mit halbkugelförmigen Impactor aus einer definierten Höhe auf das unter Innendruck stehende Prüfmuster fallen gelassen. Als Füllmedium kommt Wasserstoff

zum Einsatz. Der Versuchsaufbau wird in Abbildung 3 gezeigt. Auf Grund des hohen Gefährdungspotentials durch das Füllmedium Wasserstoff wurde ein umfassendes Sicherheitskonzept bestehend aus Splitterschutzrahmen, Schutzwall und einem weiträumig abgesicherten Versuchsbereich umgesetzt.

Abbildung 3: Impact-Versuchsaufbau auf dem Testgelände Technische Sicherheit (TTS) der BAM und Schadensbild nach dem Impact.

Durch eine variable Fallmasse werden unterschiedliche Impact-Energien realisiert. Ebenso variiert der Ort des Impacts entsprechend Abbildung 2. Als weiterer variabler Parameter ist der Gasinnendruck zu nennen, der bei den hier dargestellten Versuchen jedoch konstant beim prüfmusterspezifischen maximalen Betriebsdruck von 70 MPa (700bar) liegt. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die Versuchsparameter der mittels EMA ausgewerteten Versuche.

Tabelle 1: Übersicht über die Parameterwahl der mittels EMA analysierten Impact-Versuche.

Prüfmuster	Impact-Ort	Gas-innendruck	Impact-Energie
D-1	Dom	70 MPa	5 kJ
D-2	Dom	70 MPa	15 kJ
Z-1	Zylinder	70 MPa	15 kJ

Abhängig von Impact-Energie und Innendruck variiert der Grad der auftretenden Schädigung, welcher nur schwer makroskopisch zu bewerten ist. Zur Beurteilung der Schädigung werden daher zudem eine computertomographische Untersuchung (CT) sowie eine abschließende Restfestigkeitsermittlung durch einen langsamen Bersttest (SBT – [engl.] Slow Burst Test) durchgeführt.

Zunächst erfolgt jedoch eine zerstörungsfreie Analyse der Prüfmuster mittels EMA. Vermessen werden die Prüfmuster vor sowie nach den Impact-Versuchen. Abbildung 4a zeigt den verwendeten EMA-Messaufbau. Dabei wird der Prüfkörper elastisch in Gummiseilen gelagert. Auf der Behälteroberfläche werden bis zu 8 Beschleunigungsaufnehmer appliziert, zur Anregung wird ein Modalhammer verwendet. Durch die Verwendung multipler Anregungs- und Messpunkte kann ein hinreichend feines Messgitter erzeugt werden (siehe Abbildung 4b), mit dem Ziel, die auftretenden Schwingformen möglichst detailliert abzubilden. Da nur eine begrenzte Anzahl an örtlich festen Sensoren zur Verfügung steht, werden alle übrigen auf der Behälteroberfläche gesetzten (grün dargestellten) Messpunkte als kontinuierlich wechselnde Anregungspunkte abgerastert.

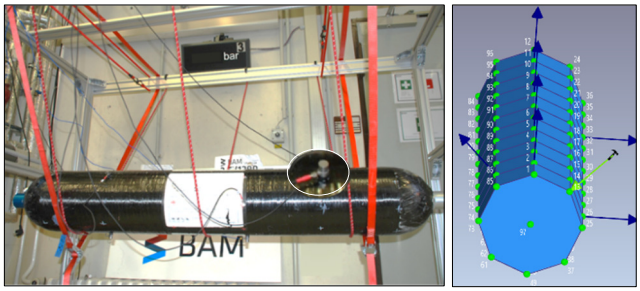

Abbildung 4: a) Elastisch aufgehängter Wasserstoffbehälter mit applizierter Sensorik und **b)** Messgitter, bestehend aus veränderlichen Anregungspunkten (grüne Punkte) und fest applizierten Beschleunigungssensoren (exemplarische Abbildungen).

Durch das Erfassen der Anregungssignale mittels Modalhammer sowie der Systemantworten mittels Beschleunigungsaufnehmern erfolgt die Berechnung der charakteristischen Übertragungsfunktion (FRF – [engl.] Frequency Response Function). Der Auswertung liegt dabei ein Frequenzbereich von 0 Hz – 12.800 Hz zu Grunde. Im Frequenzverlauf auftretende Maxima entsprechen dabei den Resonanzfrequenzen, welchen jeweils einer charakteristischen Schwingform zugeordnet werden können. Durch eine Analyse der lokalen Maxima im Frequenzverlauf können zudem Informationen über die zugehörigen Dämpfungswerte abgeleitet werden.

Ergebnisauswertung mittels EMA

Als erster Auswertungsschritt werden die im ungeschädigten Ausgangszustand (vor Impact) und im geschädigten Zustand (nach Impact) ermittelten FRFs übereinandergelegt und verglichen. Abbildung 5 zeigt die FRFs aller drei untersuchten Behälter im Frequenzbereich von 500 Hz – 11.500 Hz. Ziel ist es, Schädigungsort und Schädigungsgrad zu bestimmen.

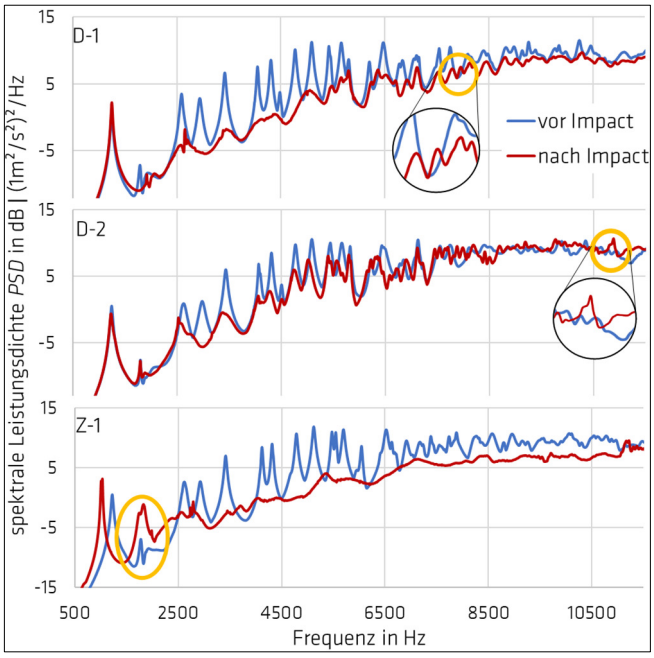

Abbildung 5: Gegenüberstellung der FRFs der 3 untersuchten Prüfmuster im ungeschädigten (blau) und geschädigten (rot) Zustand; ausgewählte Resonanzen mit reduzierter Dämpfung sind orange markiert.

Die Frequenzverläufe der geschädigten Behälter weisen im Vergleich zum Referenzzustand im Mittel alle einen abgedämpften Verlauf auf. Zur Detektion des Schadensortes werden jedoch Resonanzen mit möglichst geringer Dämpfung gesucht, da davon ausgegangen werden kann, dass eine lokale Schädigung eine Verminderung der lokalen Steifigkeit und Dämpfung am Schädigungsort begünstigt (vgl. Abbildung 1). Entsprechende Resonanzen sind in Abbildung 5 orange gekennzeichnet. Beim Vergleich der Graphen wird offensichtlich, dass ausschließlich bei der Schädigung des Behälters Z-1 im zylindrischen Bereich eine deutliche Frequenzverschiebung der ersten Resonanz auftritt. Solch fundamentale Auffälligkeiten deuten zumeist auf eine Masseveränderung bzw. -verschiebung hin und lassen in diesem Fall auf eine massive Schädigung schließen. Zudem ist aus geometrischen Gesichtspunkten davon auszugehen, dass Schädigungen im zentralen Bereich der Struktur das fundamentale Schwingungsverhalten der Struktur vergleichsweise stark beeinflussen. Ebenso sei diesbezüglich auf einen verschiedenen Laminataufbau im zylindrischen Bereich und Dombereich verwiesen. Die aufgezeigten Unterschiede beim charakteristischen Schwingungsverhalten lassen somit bereits an dieser Stelle auf unterschiedliche Schädigungsorte schließen.

Zur genauen Lokalisierung der Schädigung werden im Folgenden die den Resonanzen mit geringster Dämpfung zugehörigen Schwingformen analysiert, dargestellt in Abbildung 6. Der innerhalb der Schwingform mit maximaler Amplitude schwingende Bereich (lokales Maximum und Minimum) entspricht dabei dem Ort der Schädigung. Ein Direkter Vergleich zwischen protokollierten Impact-Ort und messtechnisch erfasster Schwingform bestätigt dabei eine korrekte Detektion der betroffenen Stellen.

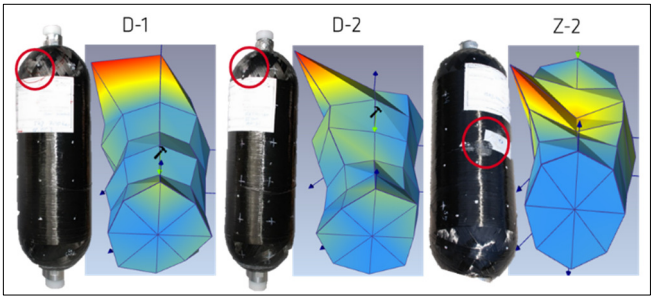

Abbildung 6: Lokalisierung das Schädigungsortes durch die Analyse von Schwingformen auffälliger Resonanzen.

Der Schädigungsgrad ist aus der Schwingformanalyse nur bedingt interpretierbar. Zwar bedeutet eine vergleichsweise hohe Amplitude auch eine vergleichsweise hohe Materialschwächung bzw. Schädigung, was durch die dargestellte Colour-Map gezeigt wird. Jedoch lässt die begrenzte Netzauflösung keine hinreichend genaue Beurteilung zu.

Rückschlüsse auf den Schädigungsgrad liefert eine globale Betrachtung der FRFs. Mit abnehmender Impact-Energie scheint die globale Dämpfung des Frequenzverlaufs (verglichen mit den Referenzmessungen) zuzunehmen. Daraus ergibt sich die These, dass sich induzierte Impact-Energien geringer Intensität in der Behälterstruktur weitläufiger verteilen, was globale Fehlstellen in der Polymer-Matrix, wie z.B. weitläufige Delaminationen, Zwischenfaserbrüche und das Ausweiten von Porosität, begünstigt. Dies wiederum erhöht folglich die globale Dämpfung der Struktur (vgl. Abbildung 1). Im Umkehrschluss lässt eine über den gesamten Frequenzbereich nur moderat gedämpfte FRF in Kombination mit vereinzelt erhöhten Resonanzamplituden eine lokal begrenzte Überbeanspruchung vermuten, woraus sich schlussendlich ein kritischeres Schädigungsmaß ableiten lässt. Als behälterspezifische repräsentative Größe für die globale Dämpfung dient hier das Dämpfungsverhältnis DV_{global}, welches das Verhältnis aller aufsummierten Funktionswerte (PSD) von geschädigter zu ungeschädigter FRF im Frequenzbereich von 0 Hz – 12.800 Hz beschreibt und nach Gleichung (1) berechnet wird. Die ermittelten Werte sind in Tabelle 2 aufgeführt.

$$DV_{global} = \frac{\sum PSD_{Referenz}}{\sum PSD_{Impact}} \quad [-] \qquad (1)$$

Vergleich der EMA-Ergebnisse mit Restfestigkeit und CT

Zur Bewertung des tatsächlichen Schädigungsgrades werden die zuvor impaktierten Behälter einer Restfestigkeitsuntersuchung mittels SBT unterzogen. Als Maß der Restfestigkeit dient der maximal ertragbare hydraulisch aufgebrachte Innendruck, bevor es in der Regel zu einem vollkommenen Strukturversagen in Form eines Berstens kommt. Die Durchführung des SBT erfolgte mit einer linearen Druckanstiegsrate von 3,5 MPa/ min. Die ermittelten Restfestigkeiten sind im Verhältnis zum mittleren Berstdruck ungeschädigter Behälter in Tabelle 2 angegeben und werden dem zuvor ermittelten schädigungsbedingten Dämpfungsverhältnis gegenübergestellt.

Tabelle 2: Vergleich von Restfestigkeit und Dämpfungsverhältnis, nach Restfestigkeit geordnet.

Prüf-muster	Impact-Ort	Impact-Energie	Rest-festigkeit	DV_{global}
D-1	Dom	5 kJ	95 %	2,0
Z-1	Zylinder	15 kJ	89 %	1,9
D-2	Dom	15 kJ	62 %	1,2

Beim Vergleich der Werte wird offensichtlich, dass – unter Berücksichtigung des Impact-Orts – eine höhere Impact-Energie in der Regel zu einer geringeren Restfestigkeit führt. Wie zuvor beschrieben bewirken zudem geringere Impact-Energien eine höhere globale Dämpfung. Eine alleinige Bewertung des Schädigungsgrades auf Basis der ermittelten Dämpfungswerte scheint jedoch auch hier noch zu ungenau, da bei den unterschiedlichen Schädigungsorten Dom und Zylinder ein unterschiedliches Schädigungsverhalten zu erwarten ist. Deutlich wird dies beim Vergleich der FRFs des im zylindrischen Bereich geschädigten Behälter Z-1. Hier steht eine deutlich erhöhte Amplitude im Bereich der ersten Resonanzen im Frequenzbereich bis 2.500 Hz einem stark gedämpften Verhalten im oberen Frequenzbereich gegenüber. Dies zeigt, dass der ermittelte Dämpfungsgrad entscheidend vom berücksichtigten Frequenzbereich unter Berücksichtigung des Schädigungsortes abhängig ist. Schädigungsort und

Dämpfung sollten deshalb stets gemeinsam betrachtet werden. Dennoch kann ein Zusammenhang zwischen induzierter Impact-Energie, des verursachten Schädigungsgrades (Restfestigkeit) und der Auswirkung auf das globale Dämpfungsverhalten gezeigt werden.

Abschließend werden die mittels CT ermittelten Schadensbilder in Abbildung 7 gegenübergestellt. Die Impact-Zonen sind weiß umrandet. Bei der Analyse der Aufnahmen werden die in Abbildung 1 vorgestellten unterschiedlichen Schädigungsausmaße offensichtlich. Eine deutliche Schädigung kann nur bei Behälter Z-1, der mit maximaler Energie von 15 kJ geschädigt wurde, ausfindig gemacht werden. Hier sind weitläufige Delaminationen im zylindrischen Bereich ersichtlich. Die mittels EMA ermittelten hohen Dämpfungswerte sowie die vergleichsweise hohe Restfestigkeit bestätigen eine globale, großflächige Schädigung. Zudem liegen weitere kleine Bereiche mit Fehlstellen vor, bei denen es sich vereinzelt auch um Bereiche mit Faserbrüchen handeln könnte (siehe rote Pfeile). Bei den beiden im Dombereich geschädigten Behältern D-1 und D-2 sind lediglich bei Behälter D-2, ebenfalls mit der höheren Energie von 15 kJ geschädigt, in geringem Maße Delaminationen und Beschädigungen im Matrixwerkstoff sichtbar. Auf Grund der im Vergleich ermittelten sehr geringen Restfestigkeit sind dunkle Fehlstellen (roter Pfeil) hier ggf. als Regionen mit Faserbrüchen zu werten. Das volle Ausmaß der vermuteten hohen Strukturschwächung wird auf dem CT-Schadensbild jedoch nicht ersichtlich. Bei Behälter D-1 sind bis auf die üblichen fertigungsbedingten lokalen Lufteinschlüsse und der Porosität im Matrix-Werkstoff keine Fehlstellen offensichtlich.

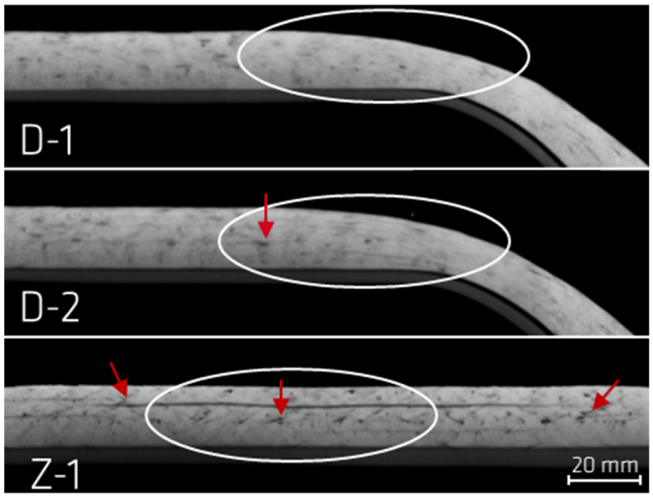

Abbildung 7: Mittels CT erfasste Schadensbilder der zuvor durch Impact geschädigten Behälter.

Zusammenfassung und Ausblick

Die vorgestellten Untersuchungen zeigen das Potential der EMA zur zerstörungsfreien Ermittlung von Ort und Intensität einer lokal eingebrachten Schädigung auf. Mittels der Darstellung und Analyse von Schwingformen konnte der Ort der Impact-Schädigung ausfindig gemacht werden. Die Intensität der Schädigung lässt sich durch eine Analyse des globalen Dämpfungsverhaltens gut abschätzen. Alternativ durchgeführten Restfestigkeitsermittlungen bestätigen diese Erkenntnis. Zudem konnte gezeigt werden, dass mittels EMA bereits geringe Schädigungen detektierbar sind, die bei makroskopischer Betrachtung und sogar mit Hilfe einer CT-Analyse nicht ersichtlich waren.

Auf Grund der geringen Stichprobenzahl der untersuchten Prüfmuster konnte insbesondere die Aussagekraft des Ansatzes zum globalen Dämpfungsverhalten zur Bewertung des Schädigungsgrades noch nicht in zufriedenstellendem Maße verifiziert werden. Ziel ist es daher, künftig weiter Prüfmuster mit unterschiedlichen Schädigungsgrad und -ort zu untersuchen.

Danksagung

Die vorgestellten Untersuchungen werden im Rahmen des Forschungsvorhabens „Delfin“ durch das Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur (BMVI) (No. 03B10104D) gefördert. Die Autoren bedanken sich beim BMVI, dem Projektträger Jülich (PtJ) und der Now GmbH für die finanzielle Unterstützung.

Literatur

[1] Mair, G.: Sicherheitsbewertung von Composite-Druckgasbehältern. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2016, URL: https://doi.org/10.1007/978-3-662-48132-5_4

[2] Mair, G.W.; Hoffmann, M.: Assessment of the residual strength thresholds of composite pressure receptacles – a criteria for hydraulic load cycle testing. MP-Materials Testing (2013), 55(2), 121-129

[3] Mair, G.W.: Beitrag zur Beurteilung der ermüdungsbedingten Ausfallsicherheit von Composite-Druckgefäßen. Technische Überwachung (2008), 49

[4] John, S.: Beitrag Zur Analyse des Eigenspannungsverhaltens von Composite-Hochdruckspeichern mit metallischem Liner. Dissertation, Technische Universität Berlin, 2020, URL: http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-1044

[5] John, S.; Mair, G.; Schoppa, A.; Szczepaniak, M.: Erfassung und Bewertung von bauteilspezifischen Einflussfaktoren bei einer experimentellen Modalanalyse an Composite Druckbehältern. Tagungsband der DAGA2018 (2018), 91-94

[6] John, S.; Mair, G.: Sensitivity analysis of residual stresses in composite pressure vessels via modal analysis. Proceedings of Internoise Conference (2017), 1996-2998