

Eigenspannungsmessung an Composite-Druckbehältern: Bewertung experimenteller Methoden

Sebastian John¹, Daniel Kadoke², Dorit Munzke³, Georg Mair¹

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung,

¹Abteilung 3. - Gefahrgutumschließung, 12203 Berlin, E-Mail: sebastian.john@bam.de

²Fachbereich 8.1 - Sensorik, mess- und prüftechnische Verfahren, 12205 Berlin

³Fachbereich 8.6 - Faseroptische Sensorik, 12203 Berlin

Einleitung

Durch den technologischen Fortschritt im Druckbehälterbau steigt insbesondere auch die Relevanz für den Einsatz von Leichtbauwerkstoffen. Auf Grund ihres Gewichtsvorteils bei gleichzeitig hohem Steifigkeits- und Festigkeitsverhalten ist der Einsatz von Faser-Kunststoff-Verbunden (FKV) bereits als Stand der Technik anzusehen. Nichtsdestotrotz ist insbesondere bei Hybridkonstruktionen das komplexe auftretende Degradationsverhalten bisweilen noch nicht ausreichend genau erforscht. Folglich ist eine genaue Abschätzung der Lebensdauer nur schwer möglich. Aktuelle Forschungen an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) betrachten daher Fragen des Materialverhaltens und -versagens, der Betriebsfestigkeit sowie der Festlegung von Prüfzeiten für genannte Druckbehälter. Die hier gezeigten Ergebnisse beziehen sich auf Untersuchungen an Typ III-Druckbehältern in Ausführung einer Atemluftflasche. Der Aufbau des Hybridbehälters besteht aus einem inneren Aluminiumbehälter, dem Liner, welcher mit einem kohle- und glasfaserverstärktem Kunststoff-Verbund vollummantelt ist. Maßgeblicher Parameter für die Lastwechselfestigkeit stellen die im metallischen Liner auftretenden Druckeigenstressungen dar, die sich direkt auf die Lebensdauer auswirken. Auf Grund von Alterungseffekten im Composite und Liner ist mit zunehmender Betriebsdauer eine Abnahme der Eigenstressungen zu erwarten [1][2][3]. Reduzierte Eigenstressungen führen zu erhöhten Beanspruchungsspitzen sowie einer erhöhten Mittelspannung, was sich wiederum negativ auf die Anzahl ertragbarer Lastwechsel auswirkt [4][5]. Für eine detaillierte Betriebsfestigkeitsanalyse ist es daher unerlässlich, diese Veränderungen zu berücksichtigen. Die Möglichkeiten, den Eigenstressungszustand im Hybridbehälter zuverlässig zu ermitteln, sind bisweilen sehr begrenzt und mitunter nur durch eine zerstörende Prüfung möglich [6]. Mit Hilfe eines Messverfahrens auf Basis einer experimentellen Modalanalyse (EMA) sollen Eigenstressungsänderungen in Typ III-Druckbehältern künftig zerstörungsfrei erfasst und einsatzbegleitend überwacht werden können [7][8].

Eingesetzte Messverfahren

Den eingesetzten Messverfahren liegen unterschiedliche technisch-physikalische Ansätze zu Grunde: Erster Ansatz bildet die Erfassung der (alterungsbedingten) bleibenden Verformung eines Behälters, welche durch Relaxations-, Kriech- oder Kontraktionsprozesse im FKV sowie durch eine plastische Verformung des metallischen Liners verursacht werden können. Unter Kenntnis behälterspezifischer Werkstoffeigenschaften können anschließend Rückschlüsse auf Veränderungen des inneren Spannungsgleichgewichtes

gezogen werden. Ein weiterer Ansatz besteht in der Störung des initialen Vorspannungszustandes durch einen Materialabtrag bei gleichzeitiger Messung der resultierenden Strukturverformung. Ein dritter Ansatz basiert auf der Idee, dass eine Veränderung des Vorspannungszustandes eine Veränderung der Struktursteifigkeit bewirkt. Die Erfassung der dafür notwendigen modalen Parameter erfolgt dabei mittels einer EMA. Zur Verifizierung eines erarbeiteten EMA-Messverfahrens wurde im Rahmen eines BAM-internen Projektes ein Prüfprogramm einer künstlichen Alterung an einer Reihe von Typ III-Atemluftbehältern durchgeführt, die mittels unterschiedlicher Lastkollektive sukzessiv beansprucht wurden. Abbildung 1 zeigt die zeitliche Abfolge der unterschiedlichen Lastkollektive sowie die zu Grunde liegenden Parameter. Das abschließende Lastkollektiv bildet dabei eine Lastwechselbeanspruchung bis zum Versagen (LWbV).

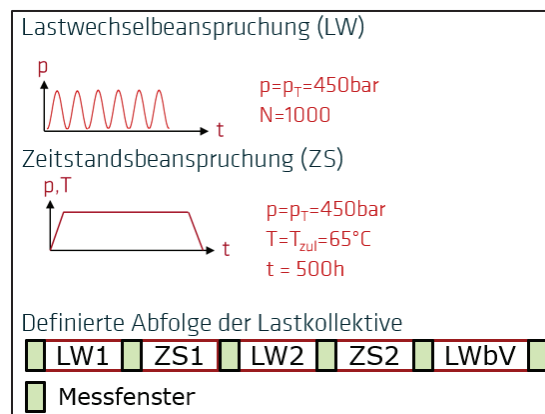


Abbildung 1: Lastkollektive innerhalb des Prüfprogramms der künstlichen Alterung

Beanspruchungsbegleitend wurden die Prüfmuster mittels einer Vielzahl verschiedener Messmethoden erfasst, mit dem Ziel des Vergleiches aller eingesetzten Messmethoden und insbesondere der Bewertung des Messverfahrens der EMA. Die eingesetzten Messverfahren werden fortfolgend kurz vorgestellt:

Bildkorrelationsverfahren (BKV)

Einzelne Behälter aus dem Prüfprogramm wurden mittels eines Bildkorrelationsverfahrens (BKV) vermessen. Hiermit können Dehnungen innerhalb eines definierten Bereiches auf der Oberfläche des Prüfbereiches sichtbar gemacht werden, die Rückschlüsse auf das Verformungs- und Eigenstressungsverhalten der Behälter zulassen. Dafür wurde im zylindrischen Bereich der Behälter ein Messfeld appliziert, welches ein feines und detailliertes Punktemuster beinhaltet (siehe Abbildung 2a). Aus einer Verschiebung der zugehörigen

gen Pixelkoordinaten können folglich die an der Behälteroberfläche auftretenden Dehnungen zerstörungsfrei erfasst werden. Nachteil des Messverfahrens ist der auf die Größe des Messfeldes begrenzte Messbereich. Außerdem werden kleinste, lokale Oberflächeneffekte wie beispielsweise das Ablätzen der äußeren Lackschicht und/oder das anisotrope Werkstoffverhalten der äußeren Faserverbundschichten (siehe Abbildung 2b) erfasst, welche für weiterführende Untersuchungen nicht repräsentativ sind. Genannte Effekte können die Aussagekraft des Verfahrens bezüglich einer Eigenspannungsanalyse somit stark einschränken.

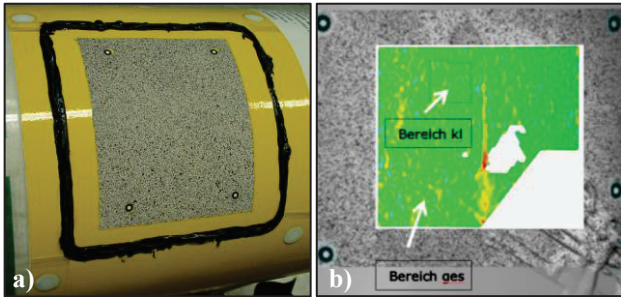


Abbildung 2: a) Appliziertes Messfeld und b) Ergebnisdarstellung beim Bildkorrelationsverfahren

Streifenprojektionsverfahren (SPV)

Wie beim BKV werden auch beim Streifenprojektionsverfahren (SPV) Verformungen an der Oberfläche eines Prüfmusters erfasst. Die Behälter werden dafür an gesetzten Referenzmarken eingemessen und mittels eines Projektors mit einem Muster bestrahlt. Ein dazugehöriges Kamerasystem registriert den Verlauf des projizierten Musters, welches sich entsprechend des Oberflächenverlaufes des Prüfmusters ausrichtet. Mittels SPV können große Bereiche des Prüfmusters erfasst werden. Entsprechend der hiesigen Ausrichtung des Messsystems bezüglich der Behälteroberfläche werden hierbei hauptsächlich Dehnungsänderungen in Umfangsrichtung registriert. Stark reflektierende oder lichtdurchlässige Bereiche verfälschen dabei die Messung und wurden bei der Auswertung vernachlässigt (siehe grauer Bereich in Abbildung 3).

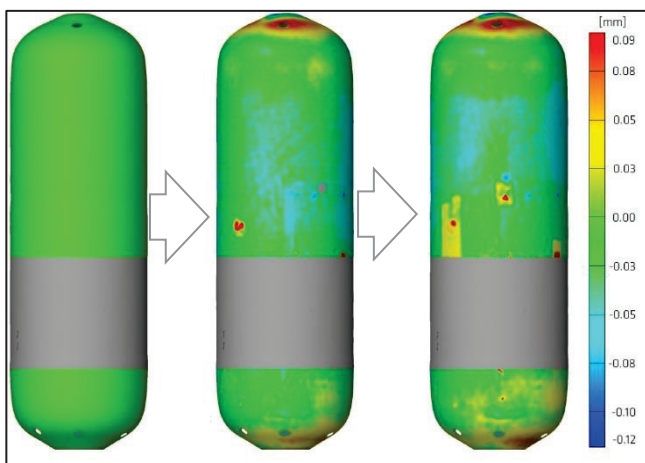


Abbildung 3: Ergebnisdarstellung aus dem SPV eines Behälters bei drei unterschiedlichen Alterungszuständen (Referenzzustand, nach LW1, nach LW1+ZS1)

Oberflächeneffekte wie beispielsweise ein Ablösen der äußeren Lackschicht beeinträchtigen auch hier die Aussagekraft des Verfahrens.

Freischnittverfahren (FV)

Beim Freischnittverfahren (FV) werden zunächst Dehnmessstreifen (DMS) in Rosettenform (siehe Abbildung 4b) auf der Innenfläche des metallischen Liners im zylindrischen Bereich der Behälter appliziert. Der Bereich um den Sensor wird anschließend mittels Trennverfahren (Trennschleifer oder Fräser) aus der unter Vorspannung stehenden Gesamtstruktur herausgeschnitten. Die in Folge der Materialentspannung auftretende Deformation des freigeschnittenen Stückes wird mittels DMS erfasst und kann entsprechend den Gleichungen (1) und (2) in die Hauptdehnungen $\varepsilon_{\varphi,x}$ bzw. Hauptspannungen $\sigma_{\varphi,x}$ umgerechnet werden. Vorteil des Verfahrens bietet eine vergleichsweise genaue Erfassung des initialen Vorspannungszustandes direkt am Liner. Als entscheidender Nachteil ist die Notwendigkeit einer Zerstörung des Prüfobjektes sowie der flächenmäßig sehr kleine Messbereich zu nennen.

$$\varepsilon_{\varphi,x} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + / - \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_{45})^2 + (\varepsilon_{45} - \varepsilon_y)^2} \quad (1)$$

$$\sigma_{\varphi,x} = \frac{E}{2} \left[\frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{1-\nu} + / - \frac{\sqrt{2}}{1+\nu} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_{45})^2 + (\varepsilon_{45} - \varepsilon_y)^2} \right] \quad (2)$$

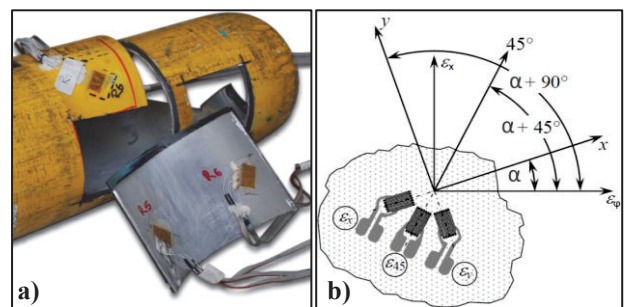


Abbildung 4: a) Applizierte DMS im freigeschnittenen Bereich, b) Aufbau und Koordinaten der DMS-Rosette [9]

Experimentelle Modalanalyse (EMA)

Mit dem Ziel der Ermittlung der modalen Parameter erfolgte die Durchführung einer experimentellen Modalanalyse. Abbildung 5 zeigt den verwendeten Messaufbau. Durch Erfassung des Anregungssignals sowie der Systemantwort mittels Modalhammer bzw. Beschleunigungsaufnehmer erfolgt die Berechnung der charakteristischen Übertragungsfunktion (engl. *Frequency Response Function*, kurz FRF). Dem Auswertungsprozess liegen dabei nur deutlich identifizierbare und auf den Vorspannungszustand empfindliche reagierende Resonanzen innerhalb eines auswertbaren Frequenzbereiches zwischen 50 - 9000 Hz zu Grunde. Ausgewählte Resonanzen wurden bereits in zahlreichen Vorversuchen identifiziert und reagieren auf eine Verminderung des Vorspannungszustandes mit einer negativen Frequenzverschiebung [8]. Ebenso lässt eine Frequenzerhöhung auf eine Vorspannungszunahme schließen. Mittels eines Curve-Fittings basierend auf einer nichtlinearen Regression kleinster Fehlerquadrate wurden die zugehörigen Eigenfrequenzen (f_i) ermittelt und mit einem Referenzzustand ($f_{i,Ref}$) verglichen.

$$\Delta f_{m,\%} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(f_i - f_{i,Ref})}{f_{i,Ref}} \cdot 100 \quad (3)$$

Aus einer Anzahl n berücksichtigter Resonanzen wird anschließend nach Gleichung (3) eine mittlere relative Frequenzabweichung $\Delta f_{m,\%}$ berechnet, die als Bezugsgröße für eine Vorspannungsänderung verwendet wird.

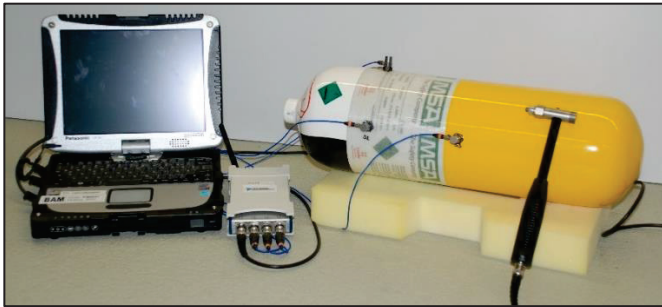


Abbildung 5: Aufbau des Versuchsstandes für die experimentelle Modalanalyse

Darstellung und Vergleich der Ergebnisse

Nach Abschluss der künstlichen Alterung wurden die Messergebnisse der vorgestellten Messverfahren aufbereitet und ausgewertet. Abbildung 6 zeigt exemplarisch zunächst eine Zusammenstellung von Ergebnissen aus den zerstörungsfreien Dehnungsmessverfahren BKV und SPV, womit bleibende Dehnungen an der Behälteroberfläche der Behälter A16, A17, A18 und A19 erfasst wurden. Dargestellt ist eine Umfangsänderung über einen fortschreitenden Beanspruchungszustand. Anzumerken ist, dass nicht alle Alterungszustände mit jedem Messverfahren vermessen wurden. Die dargestellte Entwicklung des Mittelwertes MW berücksichtigt alle, zum gegebenen Alterungszustand gemessenen Werte. Im Rahmen einer Datenanalyse wird der allgemeine Trend eines abnehmenden Umfangs deutlich, wobei betragsmäßig größere Veränderungen mit dem SPV gemessen wurden. Außerdem wird ersichtlich, dass -entgegen des allgemeinen Trends- die durchgeführten Lastwechselbeanspruchungen immer wieder eine zwischenzeitliche Erhöhung des Umfangs zu bewirken scheinen.

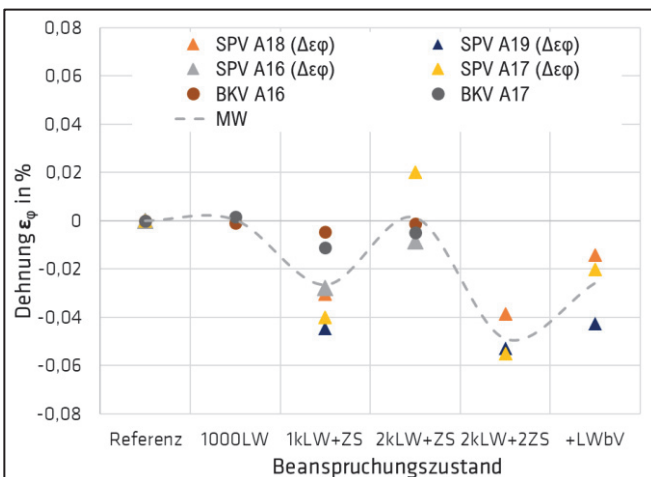


Abbildung 6: Mittels BKV und SPV gemessene Umfangsänderungen bezüglich der Beanspruchungszustände

Nach makroskopischer Untersuchung der Oberflächen der Prüfbjekte konnte festgestellt werden, dass nach einer Lastwechselbeanspruchung eine vergleichsweise hohe Zunahme an Rissen in der Lackschicht zu beobachten war. Eine damit verbundene örtliche Anhebung der Lackschicht innerhalb

betroffener Bereiche sollte bei der Interpretation der Ergebnisse Berücksichtigung finden. Daher sollten die gemessenen zwischenzeitlichen Umfangszunahmen kritisch betrachtet werden. Nach gesamtheitlicher Betrachtung der Hybridstruktur lässt eine Umfangsabnahme entweder auf eine (negative) plastische Verformung des Liners, auf eine Erhöhung der Steifigkeit des FKV und/oder eine Kontraktion des FKV schließen.

Eine Vielzahl an Behältern konnte mittels FV untersucht werden. Auf Grund des bereits angesprochenen Nachteils der Notwendigkeit einer zerstörenden Prüfung ist bei diesem Messverfahren keine kontinuierliche Betrachtung ein und desselben Prüfmusters möglich. Anstelle dessen wird sich bei der Auswertung auf einen gruppenspezifischen Mittelwert der vermessenen Behälter eines identischen Beanspruchungszustandes bezogen. Abbildung 7 zeigt die Messergebnisse aller untersuchten Prüfmuster. Dargestellt wird der Betrag der nach Gleichung (2) berechneten Druckvorspannung in den zwei Hauptspannungsrichtungen σ_x und σ_φ in Längs- bzw. Umfangsrichtung über einem fortschreitenden Beanspruchungszustand. Schwarze und blaue Linien bezeichnen die jeweiligen gruppenspezifischen Mittelwerte. Die zerstörenden Messungen wurden im Gegensatz zu den zuvor gezeigten Dehnungsmessungen nur im Referenzzustand, nach kombinierten Lastwechsel- und Zeitstandsbeanspruchungen sowie nach der Zerstörung der Prüfmuster durchgeführt.

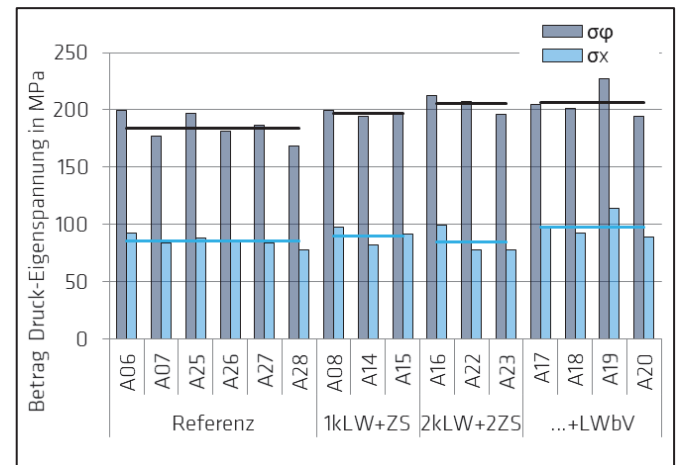


Abbildung 7: Gemessenen Druckeigenstressungen im metallischen Liner bezüglich der Beanspruchungszustände

In Bezug auf Abbildung 7 konnte als Referenzzustand eine gemittelte Eigenstressung von -185 MPa in Umfangs- bzw. -95 MPa in axialer Richtung ermittelt werden. Mit zunehmender Alterung kann eine sukzessive Erhöhung der Eigenstressungszustände von im Mittel $\overline{\Delta\sigma_x} = 5$ MPa bzw. $\overline{\Delta\sigma_\varphi} = 10$ MPa, mit einer Ausnahme von $\overline{\Delta\sigma_x}$ nach dem zweiten kombinierten Lastkollektiv, festgestellt werden. Die Höhe der Eigenstressungszunahme scheint jedoch mit zunehmender Alterung abzunehmen – eine Lastwechselbeanspruchung bis zu Leckage scheint nur noch marginal Einfluss zu nehmen. Aussagen über einen gegensätzlichen Einfluss von Lastwechsel- und Zeitstandsbeanspruchung können auf Grund der vergleichsweise grob gewählten Prüfintervalle nicht getätigt werden.

Mittels EMA konnte nur eine relativ geringe Anzahl von zwei Behältern alterungsbegleitend vermessen werden. Abbildung 8 zeigt die nach Gleichung (3) berechnete mittlere Frequenzabweichung über dem Beanspruchungszustand. Zunächst zeigen die Ergebnisse den Trend einer sukzessiv wachsenden und positiven Frequenzverschiebung auf, was entsprechend der getätigten Voruntersuchungen ebenfalls auf eine Erhöhung des Eigenspannungszustandes schließen lässt. Dabei wird jedoch ersichtlich, dass bei Behälter A18 mit zunehmender Alterung eine deutlich stärkere Erhöhung der Resonanzen auszumachen ist. Bei Behälter A19 ist eine auffallend hohe Frequenzverschiebung nach der ersten Zeitstandsbeanspruchung zu beobachten, die sich bei den darauf folgenden Alterungsstufen jedoch wieder relativiert.

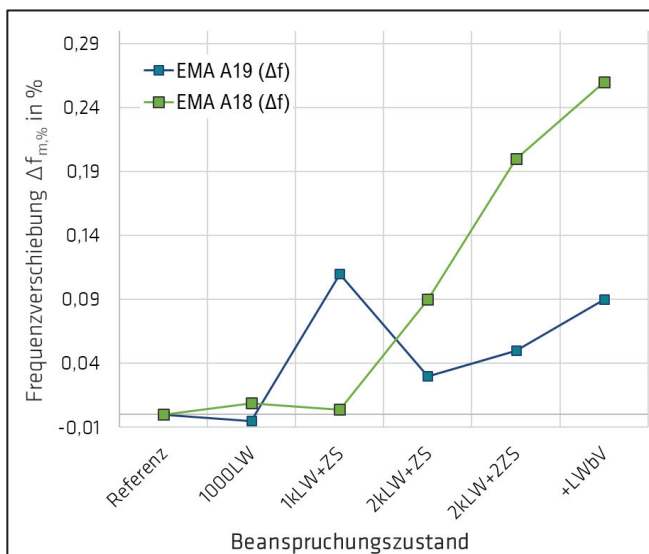


Abbildung 8: Mittels EMA erfasste mittlere Frequenzverschiebung bezüglich der Beanspruchungszustände

Zusammenfassung und Diskussion

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, wie mittels unterschiedlicher Messverfahren der Einfluss einer künstlichen Alterung auf das Eigenspannungsverhalten im Metall-Composite-Verbund bei Typ III-Druckbehältern analysiert werden kann.

Mittels Bildkorrelations- und Streifenprojektionsverfahren wurde der Trend einer Dehnungsabnahme in Umfangsrichtung beobachtet. Die Messergebnisse liefern weiterhin Anzeichen dafür, dass eine zwischenzeitliche Lastwechselbeanspruchung zu einer Kompensation vorausgegangener Zeiteffekte bzw. zu einer Dehnungszunahme führen könnte. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus dem Freischnittverfahren, die eine alterungsbedingte Eigenspannungserhöhung nachwies, lässt dies den Schluss zu, dass die gezeigte Umfangsabnahme womöglich durch eine Versteifung oder eine Kontraktion des FKV in Umfangsrichtung bedingt ist.

Ergebnisse aus der experimentellen Modalanalyse bestätigen den Trend einer Erhöhung des Eigenspannungszustandes. Diese Entwicklung scheint jedoch, entgegen der Erkenntnisse aus den übrigen Messverfahren, mit zunehmenden Beanspruchungsgrad stärker zuzunehmen. Als schwierig gestaltet sich eine detaillierte Interpretation des teils gegensätzlichen Verlaufs beider Messreihen bezüglich einer ersten Zeitstandsbeanspruchung. Im Vergleich zum Streifenprojek-

tionsverfahren ist ein belastungsspezifisches Verhalten daher nur bedingt auszumachen. Eine Beeinflussung werkstofflich und mikromechanisch bedingter Störeinflüsse scheint dabei nicht ausgeschlossen und wurde bereits in einer früheren Veröffentlichung diskutiert [10].

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass durch die Auswertung und Verknüpfung der Messergebnisse aller vorgestellten Analyseverfahren eine Eigenspannungszunahme in Folge der angewendeten Lastkollektive nachgewiesen werden konnte. Auch mittels experimenteller Modalanalyse konnte der Trend dieser Entwicklung sichtbar gemacht werden. Wie bei den übrigen angewendeten zerstörungsfreien Messverfahren auch bedarf es jedoch weiterer Forschung sowie der Vermessung einer höheren Anzahl an Prüfobjekten, um fundierte Aussagen bezüglich der Genauigkeit und Empfindlichkeit dieses Messverfahrens treffen zu können.

Literatur

- [1] Schulz, M.; Gregor, C.: Assessment of state of residual stress of hybrid pressure vessels. Proceedings of ASME Pressure Vessels & Piping Conference (2009), 581-589
- [2] Alegre, M.: Fatigue behaviour of an autofrettaged high pressure vessel for the food industry. Engineering Failure Analysis Vol. 14 (2007), 396-407
- [3] Thumser, R.; Bergmann, J.W.; Vormwald, M.: Residual stress fields and fatigue analysis of autofrettaged parts. Int J Pressure Vessel Piping 79 (2002), 113-117
- [4] Mair, G.W.: Beitrag zur Beurteilung der ermüdungsbedingten Ausfallsicherheit von Composite-Druckgefäßen. Technische Überwachung (Nov./Dez.2008), 49
- [5] 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
- [6] Rossini, N. S.; Dassisti, M.; Benyounis, K. Y. und Olabi, A. G.: Methods of measuring residual stresses in components. Materials and Design 35 (2012), 572-588
- [7] John, S.; Schadow, F.: Sensitivitätsanalyse des Eigenspannungszustandes in Composite-Druckgefäßen mittels Modalanalyse. Tagungsband der DAGA2017 (2017), 1277-1280
- [8] John, S.; Mair, G.: Sensitivity analysis of residual stresses in composite pressure vessels via modal analysis. Proceedings of Internoise Conference (2017), 1996-2998
- [9] Eberle, K., Wagner, J.W.: Versuchstechnik -Vorlesung für Studium der Luft- und Raumfahrttechnik. Institut für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtkonstruktionen, Universität Stuttgart (2010)
- [10] 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