

# Erfassung und Bewertung von bauteilspezifischen Einflussfaktoren bei einer experimentellen Modalanalyse an Composite-Druckbehältern

Sebastian John, Georg Mair, André Schoppa, Mariusz Szczepaniak

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Fachbereich 3.2 - Gefahrgut tanks und Unfallmechanik, 12203 Berlin, E-Mail: [sebastian.john@bam.de](mailto:sebastian.john@bam.de)

## Einleitung

Durch den technologischen Fortschritt im Bereich der Materialwissenschaften steigt insbesondere auch die Relevanz für den Einsatz von Leichtbauwerkstoffen. Auf Grund ihres Gewichtsvorteils bei gleichzeitig hohem Steifigkeits- und Festigkeitsverhalten ist die Verwendung von faserverstärkten Kunststoffverbunden (FKV) im Druckbehälterbau bereits als Stand der Technik anzusehen. Nichts desto trotz ist insbesondere bei Hybridkonstruktionen das komplexe Degradationsverhalten bisweilen noch nicht ausreichend genau erforscht. Folglich ist eine präzise Abschätzung der Lebensdauer nicht möglich. Aktuelle Forschungen der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) beschäftigen sich daher mit Fragen des Materialverhaltens und -versagens, der Betriebsfestigkeit sowie der Festlegung von Prüffristen für genannte Druck- und Gefahrgutbehälter. Die hier gezeigten Ergebnisse beziehen sich auf Untersuchungen bezüglich des Alterungsverhaltens sogenannter Typ-III Druckbehälter in Ausführung einer Atemluftflasche. Der Aufbau des Hybridbehälters besteht aus einem inneren Aluminium-Liner, welcher mit einem kohle- bzw. glasfaserverstärkten Kunststoffverbund (CFK/GFK) vollummantelt ist. Maßgeblicher Parameter für die Alterung stellen die im Metall-Liner auftretenden Druckeigenstressungen dar, welche mit der Lastwechselfestigkeit der Behälter korrelieren. Auf Grund innerer und äußerer Einflüsse lässt sich mit zunehmender Betriebsdauer eine Abnahme der Eigenstressungen beobachten [1][2][3]. Reduzierte Eigenstressungen führen zu erhöhten Beanspruchungsamplituden, welche sich wiederum negativ auf die Anzahl der ertragbaren Lastwechsel auswirken [4][5]. Um den Eigenstressungszustand im Rahmen von Betriebsfestigkeitsanalysen ermitteln zu können, kommen bisweilen hauptsächlich zerstörende Prüfverfahren zum Einsatz [6]. Mit Hilfe eines Messverfahrens auf Basis einer experimentellen Modalanalyse (EMA) sollen jedoch künftig Eigenstressungen in Typ-III Druckbehältern auch zerstörungsfrei erfasst und bezüglich ihres Alterungsprozesses überwacht werden können [8]. Um darüber hinaus auch Eigenstressungszustände verschiedener Behälter vergleichen zu können, werden in dieser Arbeit zusätzliche bauteilspezifische Einflussfaktoren mittels einer numerischen Parameterstudie untersucht. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen auch zur Beurteilung der Sensitivität des Messverfahrens beitragen.

## Problem- und Zielstellung

Wie schon in vorausgegangenen Arbeiten gezeigt, stützt sich die Eigenstressungsermittlung mittels EMA auf die Analyse modaler Parameter, da das dynamische Verhalten einer Struktur unmittelbar durch das Auftreten einer Vorspannung beeinflusst wird [7][8][9]. Darüber hinaus existie-

ren jedoch zahlreiche weitere Einflussfaktoren, welche die Masse- und Steifigkeitsverteilung innerhalb der Struktur - und folglich auch das dynamische Verhalten - maßgeblich beeinflussen. Dies erschwert eine isolierte Analyse der Eigenstressungseffekte beim Vergleich mehrerer Prüfbjekte untereinander. Durch das Zusammenspiel numerischer Berechnungsmethoden und experimenteller Untersuchungen soll der Einfluss der jeweiligen Parameter auf das Übertragungsverhalten der Struktur untersucht werden. Abbildung 1 zeigt schematisch den gewählten Lösungsansatz.

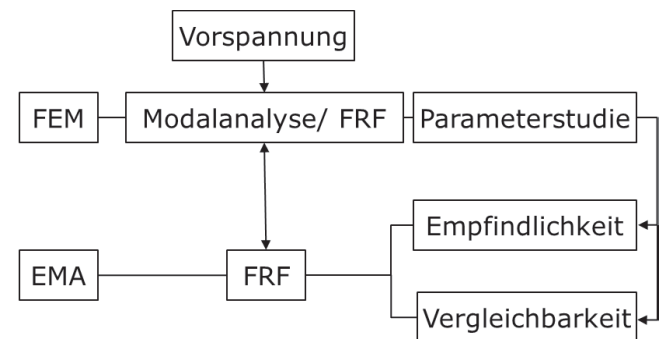


Abbildung 1: Schematische Darstellung des gewählten Lösungsansatzes

Zunächst wird mittels Finite-Elemente-Methode (FEM) der Einfluss der Vorspannung auf das dynamische Verhalten der Struktur ermittelt. Insbesondere wird dafür das Eigenfrequenzverhalten via Modalanalyse sowie das Übertragungsverhalten mittels einer Analyse der Frequency-Response-Function (FRF) untersucht. Durch eine Gegenüberstellung experimenteller und numerischer Ergebnisse können Aussagen bezüglich Zuverlässigkeit und Sensitivität des experimentellen Messverfahrens getroffen werden. Weiterhin werden mit Hilfe einer numerischen Sensitivitätsstudie bauteil- und fertigungsspezifische Einflussfaktoren untersucht, um die Vergleichbarkeit von Messergebnissen unterschiedlicher Probekörper bewerten zu können.

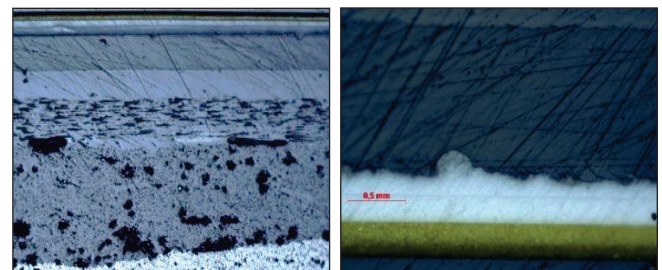


Abbildung 2: Inhomogenität im Lagenaufbau des GFK/CFK-Verbundes; Variable Schichtdicken im Faserverbund

Abbildung 2 zeigt vergrößerte Darstellungen von Schlibbildern des Composite-Verbundes der untersuchten Behälter, welche Auskunft über die Schichtdicke und Beschaffenheit der einzelnen FKV-Lagen geben. Auffällig sind

eine variierende Porosität innerhalb einzelner Lagen sowie der diskontinuierliche Lagenaufbau, welche aus Ungenauigkeiten des Fertigungsprozesses (abweichende Prozessparameter, Materialeigenschaften etc.) resultieren. Durch die Angabe von Fertigungstoleranzen können diese zum Teil eingegrenzt werden. Die Einhaltung der festgelegten Toleranzgrenzen stellt i.d.R. eine sichere Funktionsweise über der angegebenen Lebensdauer sicher. Dennoch können bereits kleinere Abweichungen innerhalb des Toleranzbereiches zu einem veränderten Struktur- und Übertragungsverhalten des Prüfkörpers führen. Ziel ist es, mittels einer Parameterstudie Einflüsse aufgezeigter Material- und Fertigungsabweichungen auf das Übertragungsverhalten abzubilden und diese später, soweit möglich, zu identifizieren und separieren.

Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die in der numerischen Studie berücksichtigten Parameter. Ebenso sind die herstellerbezogenen Angaben bezüglich der Fertigungstoleranzen sowie die in der Studie umgesetzten Parametervariationen aufgeführt. Zunächst wurde der Einfluss einer reduzierten Vorspannung im Liner auf das dynamische Verhalten untersucht. Darauf aufbauend wurden die im Metall sowie im FKV auftretenden Fertigungstoleranzen berücksichtigt. Die angegebenen Fertigungstoleranzen des Aluminium-Liners beziehen sich auf Abweichungen der Wandstärke im zylindrischen Bereich und wurden mittels einer verstärkten Wandung von 0,5 mm im Modell abgebildet. Toleranzangaben betreffend der Dicke des FKV wurden auf Basis der vom Hersteller angegebenen Durchmesser-toleranzen berechnet und durch eine zusätzliche 1 mm starke Epoxidharzschicht im Modell berücksichtigt. Toleranzangaben bezüglich möglicher Winkelabweichungen der Rovings im Wickelprozess konnten nicht ermittelt werden. Auf Grund von Erfahrungswerten wurde hier eine Winkelabweichung von 2° angenommen, welche in allen modellierten FKV-Schichten angepasst wurde.

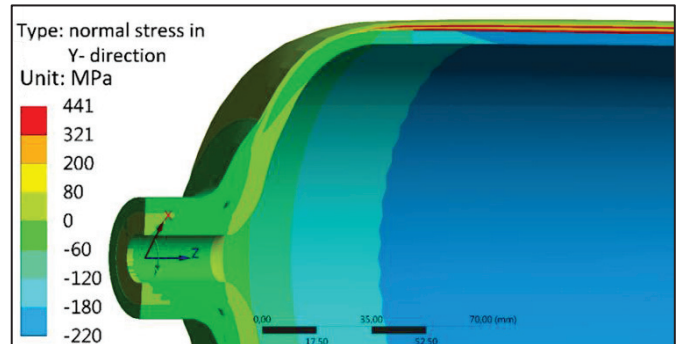
**Tabelle 1:** Parametervariationen innerhalb der numerischen Studie

Parameter	Angegebene Fertigungstoleranz	Parameter-variation
Vorspannung Liner	–	+ 50 MPa
Wandstärke Liner	+/- 0,25 mm	+ 0,5 mm
Dicke FKV	+/- 1 mm	+ 1 mm
Winkelabweichungen im FKV	–	- 2°

**Aufbau des numerischen Berechnungsmodells sowie des experimentellen Versuchsstandes**

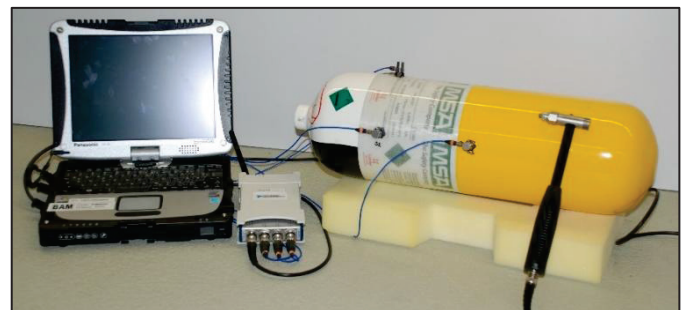
Für die Durchführung der numerischen Berechnungen ist zunächst die Erstellung eines möglichst realitätsnahen FE-Modells erforderlich. Das erstellte Modell besteht aus ca. 70.000 Elementen (Typ SOLID186 & SOLID187 mit quadratischer Ansatzfunktion), Lagenaufbau des Composite-Verbundes sowie Liner wurden möglichst genau und detailliert nachmodelliert. Dazu wurde mit Hilfe zeitaufwändiger Analyseverfahren der Dickenverlauf des Aluminium-Liners sowie der exakte Lagenaufbau der FKV-Armierung bestimmt [7]. Das Modell wurde entsprechend des experimentellen Versuchsaufbaus elastisch gelagert, die Vorspannung

mittels thermischer Randbedingungen in den zylindrischen Bereich implementiert. Abbildung 3 zeigt die resultierende Eigenspannungsverteilung im Hybridverbund in Umfangsrichtung, größte Druckeigenspannungen, mit einem Betrag von über 200 MPa, bilden sich dabei im zylindrischen Bereich aus. Bei stark gealterten und bereits ausgesonderten Behältern konnte eine Reduzierung der Eigenspannung um 25% (50 MPa) gemessen werden. Aufbauend auf der Modellbildung werden via Modalanalyse alle Eigenfrequenzen im gewählten Frequenzbereich unter Berücksichtigung verschiedener Eigenspannungszustände bestimmt. Mittels Harmonischer Analyse werden anschließend die zugehörigen FRFs ermittelt.



**Abbildung 3:** Modellierung der Vorspannung im Druckbehälter

Ausgehend von der FE-Simulation erfolgt der experimentelle Aufbau für die EMA. Ziel ist es, auch hier das Übertragungsverhalten der Prüfkörper zu ermitteln. Der Messaufbau, dargestellt in Abbildung 4, wird analog zum Simulationsmodell umgesetzt.



**Abbildung 4:** Aufbau des Versuchsstandes für die experimentelle Modalanalyse

Die Anregung der Behälter erfolgt in Form einer Impulsanregung auf verschiedenen Punkten der Oberfläche mittels Modalhammer. Zur Aufzeichnung der Systemantwort werden drei Beschleunigungsaufnehmer appliziert, auf Schaum wird der Behälter elastisch gelagert. Nach Aufnahme der Messgrößen im Zeitbereich erfolgt zunächst die Überführung von Ein- und Ausgangssignal in den Frequenzbereich ( $E_{i(\omega)}, A_{i(\omega)}$ ) mittels Fast-Fourier-Transformation. Die für die Auswertung erforderliche Übertragungsfunktion ergibt sich nach Gleichung (1).

$$H_{ij(\omega)} = \frac{A_{j(\omega)}}{E_{i(\omega)}} \quad [m/Ns^2] \quad (1)$$

Die final ermittelte Übertragungsfunktion beruht auf einer Vielzahl gemittelter Messwerte. Durch eine Mittelung von ca. 50–60 Einzelmessungen wurden Messungenauigkeiten sowie -rauschen signifikant reduziert. Dennoch ist der auswertbare Messbereich auf eine obere Frequenz von ca. 9000 Hz begrenzt.

### Auswertung und Vergleich numerischer und experimenteller Ergebnisse

Mittels FEM wurde zunächst der Einfluss verschiedener Eigenspannungszustände auf Eigenfrequenzen und Übertragungsverhalten untersucht. Abbildung 5 vergleicht die Ergebnisse zweier verschiedener Vorspannungszustände, wobei Referenzzustand (dunkelblauer Linienzug) und ein um 50 MPa reduzierter Vorspannungszustand (hellblaue Linie) in einem Frequenzbereich von 1000 Hz und 9000 Hz gegenübergestellt werden. Die Graphik veranschaulicht Unterschiede im Übertragungsverhalten und zeigt die, den Resonanzen zugeordnete prozentuale Frequenzverschiebung, dargestellt durch die Punkte im unteren Diagrammbereich. Eine Reduzierung der Vorspannung bewirkt demnach eine Absenkung der Resonanzen um bis zu 2,5%. Dieser Effekt verstärkt sich mit steigender Frequenz, wobei eine erhöhte Empfindlichkeit bei vorspannungssensitiven Moden oberhalb einer Frequenz von 7000 Hz auszumachen ist.

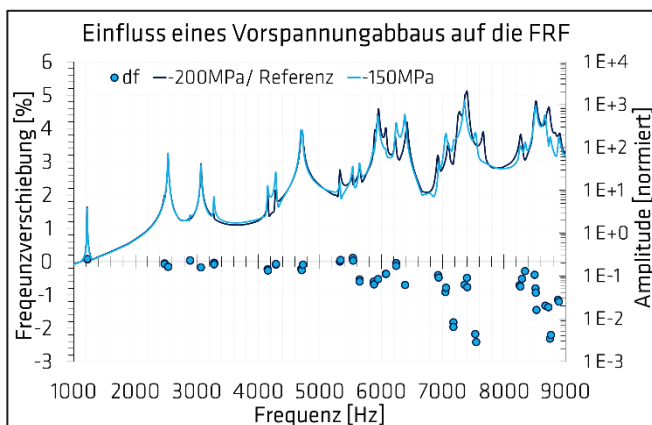


Abbildung 5: Verschiebung der FRF auf Grund einer Reduzierung der Vorspannung

Um den Einfluss einer Vorspannungsreduktion auf die Übertragungsfunktion auch experimentell nachweisen zu können, wurde eine Reihe von Behältern einem künstlichen Alterungsprozess unterzogen. Während diesem wurden die Prüfkörper für eine Dauer von 100 h einer hohen Temperatur- und Drucklast ausgesetzt. Die Behälter wurden im Referenzzustand sowie nach der künstlichen Alterung vermessen und die Ergebnisse gegenübergestellt. Weiterhin wurden die experimentell ermittelten Werte mit Simulationsergebnissen verglichen. Abbildung 6 zeigt eine Gegenüberstellung zwischen den experimentell ermittelten Übertragungsfunktionen eines Behälters (gemessen vor bzw. nach dem Alterungsprozess) und den zuvor berechneten FRFs (vgl. mit Abbildung 5). Referenzzustände sind durch die dunklen Graphen (FEM - dunkelblau, EMA - schwarz), vorspannungsreduzierte Zustände mit heller Farbe (FEM - hellblau, EMA - grau) gekennzeichnet. Experimentell und numerisch ermittelte FRFs stimmen mit zufriedenstellender Genauigkeit überein, die Resonanzen im unteren Frequenzbereich können klar zugeordnet werden. Des Weiteren kann, analog zu den numerisch ermittelten Ergebnis-

sen, auch im Experiment eine negative Frequenzverschiebung der Resonanzen im oberen untersuchten Frequenzbereich in Folge einer Vorspannungsreduktion nachgewiesen werden.

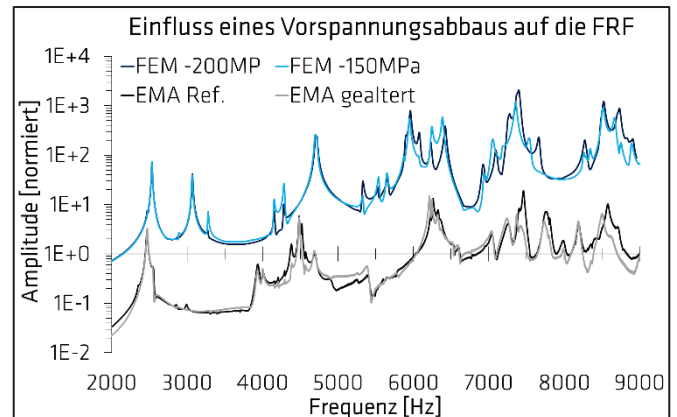


Abbildung 6: Gegenüberstellung numerischer und experimenteller Ergebnisse

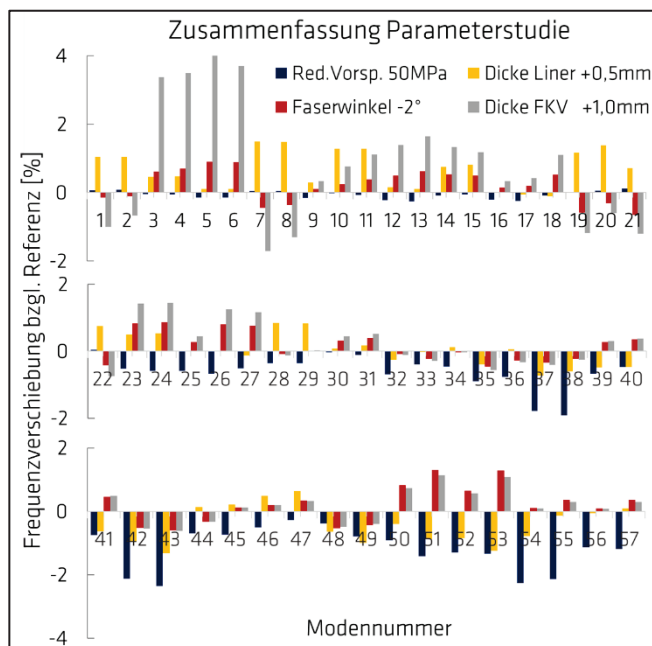
Aufbauend auf den bereits gewonnenen Erkenntnissen, soll fortfolgend der Einfluss von Fertigungstoleranzen auf das dynamische Verhalten untersucht werden. Ziel ist es, zwischen Behältern desselben Fertigungsloses mit geringfügigen strukturellen Unterschieden eine Vergleichbarkeit der Eigenspannungszustände herstellen zu können. Dazu müssen aus Fertigungstoleranzen resultierende Einflüsse zunächst von den zu untersuchenden Vorspannungseffekten separiert werden.

Dies erfolgt im Rahmen einer numerischen Parameterstudie, wobei mittels Modalanalyse insbesondere eine Beeinflussung der Eigenformen untersucht werden soll. Untersucht wurden die Auswirkungen einer um 25% (50 MPa) reduzierten Vorspannung, abweichende Faserorientierungen sowie eine Erhöhung der Wandstärke von Liner bzw. Composite. Ausgehend von der in Tabelle 1 aufgelisteten Parametervariationen wurden alle Eigenformen der Struktur für den jeweiligen Zustand berechnet. Die resultierenden Abweichungen der Eigenfrequenzen bezüglich des Referenzzustandes wurden anschließend ermittelt. Erfasst wurden alle Eigenfrequenzen im Frequenzbereich von 1 Hz bis 9000 Hz. Abbildung 7 zeigt die parameterspezifische prozentuale Abweichung der Eigenfrequenzen bezüglich des Referenzzustandes. Berechnet wurden die ersten 57 Moden.

Beim Betrachten der Abbildung wird zunächst keine systematische Beeinflussung aller Eigenfrequenzen durch einen der untersuchten Parameter ersichtlich. Auffällig ist jedoch, dass die durchgeführten Variationen im FKV (Faserwinkel und Dicke FKV) die Eigenfrequenzen in gleicher Weise zu beeinflussen scheinen. Festzuhalten ist weiterhin, dass Variationen der Composite- bzw. Linerdicke, und die damit verbundene Masseänderung, insbesondere bei Moden im unteren Frequenzbereich zum Tragen kommen. Einflüsse einer veränderten Vorspannung können hingegen besonders im oberen Bereich des untersuchten Frequenzbereichs ausgemacht werden. Ersichtlich wird jedoch auch, dass genannte Eigenspannungseffekte beim Großteil der ermittelten Moden von Einflüssen der übrigen Parameter teils stark überlagert werden. Dies erschwert eine eindeutige Identifikation bzw. Separierung des Vorspannungseinflusses. Lediglich die höchsten 3 Moden innerhalb des untersuchten

Frequenzbereich, zwischen 8500 Hz und 9000 Hz, scheinen maßgeblich von einer Veränderung der Vorspannung beeinflusst zu sein.

Es darf folglich angenommen werden, dass auftretende Frequenzabweichungen innerhalb der ersten 4 Modenpaare zumeist aus abweichenden Schichtdicken des FKV und/oder unterschiedlichen Wandstärken des Liners resultieren. Für genannte Moden ist dabei kein Vorspannungseinfluss auszumachen. Lediglich für die letzten 3 Moden innerhalb des untersuchten Frequenzbereiches wird ein weitestgehend isolierter Vorspannungseinfluss ersichtlich.



**Abbildung 7:** Einfluss der vorgenommenen Parametervariationen auf das Frequenzverhalten der ersten 57 Eigenmoden im Frequenzbereich von 1 Hz–9000 Hz

## Zusammenfassung und Ausblick

Die vorgestellte Arbeit zeigt, wie man mittels einer experimentellen Modalanalyse Veränderungen des Eigenspannungszustandes in Typ-III Druckbehältern zerstörungsfrei ermitteln kann. Durch den Vergleich von numerisch und experimentell ermittelten Ergebnissen konnten eigenspannungsempfindliche Resonanzen ermittelt und Modifizierungen des Eigenspannungszustandes experimentell nachgewiesen werden.

Darauf aufbauend wurde mittels einer numerischen Parameterstudie der Einfluss von Fertigungsparametern auf die Charakteristik des dynamischen Verhalten untersucht. Es konnte ermittelt werden, dass Resonanzabweichungen im niederfrequenten Bereich zumeist durch abweichende Wandstärken von Composite und/oder Liner bedingt sind. In diesem Bereich konnte ein lediglich minimaler Vorspannungseinfluss ausgemacht werden. Am obersten Rand des untersuchten Frequenzbereiches hingegen, zwischen 8500 Hz und 9000 Hz, konnte ein hauptsächlich durch Vorspannungsänderung bedingte Eigenfrequenzverschiebungen beobachtet werden, welche von den übrigen der untersuchten Einflussfaktoren weitestgehend unbeeinflusst blieb.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass ein Vergleich des Eigenspannungszustandes verschiedener Behälter mittels der hier gezeigten experimentellen Modalanalyse auf Grund der Vielzahl an fertigungsbedingten strukturellen Unterschieden nicht ohne weiteres möglich ist. Sind jedoch Masseabweichung und Abweichungen der untersten Resonanzen minimal, so sollte durch eine Analyse und den Vergleich ausgewählter Moden höherer Ordnung eine Vergleichbarkeit hergestellt werden können. Dies soll in Zukunft im Rahmen weiterer Untersuchungen experimentell überprüft werden. Zu berücksichtigen bleibt, dass im Rahmen dieser Arbeit nur eine sehr geringe Anzahl an Parametervariationen abgedeckt werden konnte und somit der Einfluss weiterer Faktoren nicht ausgeschlossen werden kann.

## Literatur

- [1] Schulz, M.; Gregor, C.: Assessment of state of residual stress of hybrid pressure vessels. Proceedings of ASME Pressure Vessels & Piping Conference at Prague, CZ (2009)
- [2] Alegre, M.: Fatigue behaviour of an autofretted 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 autofretted parts. Int. Journal of Pressure Vessel Piping 79 (2002), 113-117
- [4] Mair, G.W.: Beitrag zur Beurteilung der ermüdungsbedingten Ausfallsicherheit von Composite-Druckgefäßen. Technische Überwachung (11/12 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)
- [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 DAGA 2017 (2017), 1277-1280
- [8] John, S.; Mair, G.: Sensitivity analysis of residual stresses in composite pressure vessels via modal analysis. Proceedings of Internoise 2017 (2017), 1996-2998
- [9] Stelzmann, U.; Groth, C.; Müller, G.: FEM für Praktiker - Band 2: Strukturmechanik. Expert-Verlag (2008)