

Sensitivitätsanalyse des Eigenspannungszustandes in Composite-Druckgefäßen mittels Modalanalyse

Sebastian John¹, Florian Schadow²

¹Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Fachbereich 3.2 - Gefahrgut tanks und Unfallmechanik, 12203 Berlin, E-Mail: sebastian.john@bam.de

²Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Fachbereich 8.4 - Akustische und elektromagnetische Verfahren, 12205 Berlin, E-Mail: florian.schadow@bam.de

Einleitung

Auf Grund ihres Gewichtsvorteils bei gleichzeitig hohem Steifigkeits- und Festigkeitsverhalten kommen bei der Herstellung von Druckgefäßen vermehrt faserverstärkte Kunststoffverbunde (FKV) zum Einsatz. Als Bundesbehörde für die öffentlich technische Sicherheit befasst sich die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) mit Fragen des Materialverhaltens und -versagens, der Betriebsfestigkeit sowie der Festlegung von Prüffristen für genannte Druck- und Gefahrgutbehälter. Innerhalb eines aktuellen Forschungsprojektes werden dabei Untersuchungen zum Alterungsverhalten von Atemluftflaschen aus einem Metall-Composite-Verbund durchgeführt. Die zu untersuchenden Druckbehälter bestehen aus einem Aluminiumbehälter (Liner), vollummantelt mit einem Kohle- und Glasfaserkunststoffverbund. Über die Betriebsfestigkeit solcher Behälter existieren bereits zahlreiche Veröffentlichungen, welche als hauptsächliche Versagensursache meist die Ermüdung des Metallliners aufzeigen [1,2]. Um die Lastwechselfestigkeit des Metalls zu erhöhen, erfolgt deshalb eine fertigungsseitige Einbringung von Druckeigenspannungen mittels Autofrettage [3,4]. Diese wirken zum größten Teil in Umfangsrichtung. Basierend auf der Kesselformel beträgt das Spannungsverhältnis von axialer- zu Umfangsrichtung ca. 1:2 [5]. Auf Grund innerer und äußerer Einflüsse lässt sich mit zunehmender Betriebsdauer eine Abnahme der Eigenspannungen beobachten [6-8], welche bisher jedoch größtenteils nur mittels zerstörender Prüfverfahren gemessen werden können [9]. Eine, hier bereits angewendete Möglichkeit der Vorspannungsmessung bildet dabei die Applikation von Dehnmessstreifen (DMS) auf der, unter Spannung stehenden Struktur. Nach Freischneiden des Bereiches um den DMS kann über die Messung der auftretenden Dehnung Betrag und Richtung der abgebauten Vorspannung ermittelt werden. Für eine alterungsbegleitende Analyse des Eigenspannungszustandes ist jedoch die Anwendung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens maßgeblich. Ziel dieser Arbeit besteht deshalb darin, eine Methode zur zerstörungsfreien Messung von Eigenspannungen zu entwickeln.

Vorüberlegung

Die aus dem Autofrettageprozess resultierenden Vorspannungen spiegeln sich in einem komplexen inneren Kräftegleichgewicht wieder. Dem unter Druck stehenden metallischen Liner steht eine, im Composite wirkenden Zugbeanspruchung gegenüber (siehe Abbildung 2). Als der Eigenspannung zugrunde liegender Parameter soll zunächst die Auswirkung dieser Vorspannkraft F auf das schwingungsmechanische Verhalten der Struktur untersucht werden. Für

eine erste Abschätzung des Frequenzverhaltens wird die Analogie zum Modell einer unter Zug belasteten, beidseitig eingespannten Saite aufgegriffen. In einer reduzierten Betrachtungsweise wird dafür zunächst die unter Zugbeanspruchung stehende Composite-Ummantelung in Form von infinitesimalen Saitenelementen der Länge L und der Masse m abgebildet (siehe Abbildung 1).

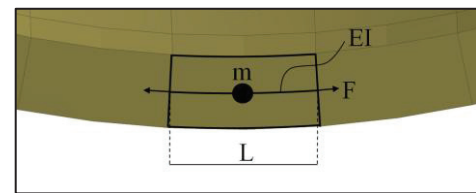


Abbildung 1: Infinitesimales Saitenelement im zylindrischen Bereich der Composite-Armierung

Die ungedämpfte Eigenkreisfrequenz ω_F der gespannten Saite kann nach [10] durch Gleichung (1) beschrieben werden ($k=1, 2, 3, \dots$ k -te Eigenfrequenz).

$$\omega_{F,k} = \frac{k \cdot \pi}{L} \sqrt{\frac{F \cdot L}{m}} \quad [\text{s}^{-1}] \quad (1)$$

Unter Berücksichtigung der Biegesteifigkeit EI erweitert sich diese, nach [11], zum Modell eines biegeelastischen Balkens unter Axiallast nach Gleichung (2).

$$\omega_{BF,k} = \frac{k \cdot \pi}{L} \sqrt{\frac{F \cdot L}{m} + \frac{EI \cdot (k \cdot \pi)^2}{m \cdot L}} \quad [\text{s}^{-1}] \quad (2)$$

Unter Berücksichtigung von $\omega = 2\pi f$ wird ersichtlich, dass eine Erhöhung der Zugkraft im Composite eine Erhöhung der Eigenfrequenz f zur Folge hat. Der damit einhergehende Anstieg der Druckbeanspruchung im metallischen Liner ($-F$) begünstigt jedoch wiederum eine Absenkung der Eigenfrequenz. Auf Grund der gezeigten Widersprüche, ist eine triviale Abschätzung dieser Problemstellung an dieser Stelle nicht möglich. Folglich soll mit Hilfe einer Modalanalyse auf Grundlage eines Finite-Elemente (FE)-Modells das genaue strukturmechanische Verhalten des Behälters in Abhängigkeit von der Vorspannung untersucht, sowie eigenspannungsempfindliche Moden bestimmt werden. Auf Grund der im Behälter dominanten Vorspannungskomponente in Umfangsrichtung ist weiterhin davon auszugehen, dass insbesondere die sich in Umfangsrichtung ausbreitenden Schwingformen beeinflusst werden. Folglich werden weniger die Biegemoden ($n=1$), hauptsächlich jedoch Atemmoden ($n=0$) und Moden höherer Ordnung ($n>1$) betroffen sein.

Durchführung numerischer Berechnungen

Zur Erstellung eines aussagekräftigen FE-Modells ist zunächst eine möglichst genaue Erfassung des Behälterdesigns erforderlich. Dazu wurde mit Hilfe zeitaufwändiger Analyseverfahren der Dickenverlauf des Aluminium-Liners sowie der exakte Lagenaufbau der FKV-Armierung ermittelt. Die Bestandteile, Dicke, Orientierung und Verläufe der einzelnen FKV-Lagen konnten mittels mikroskopischer und Computer-Tomographischer Verfahren ermittelt werden (siehe Abbildung 7). Die Nachbildung des Druckbehälters sowie die numerische Berechnung erfolgt mit Hilfe der kommerziellen Softwarelösung ANSYS. Die zu untersuchenden Eigenspannungen wurden zunächst mit Hilfe von Temperaturrandbedingungen in den zylindrischen Bereich induziert und das Modell elastisch gelagert (siehe Abbildung 2).

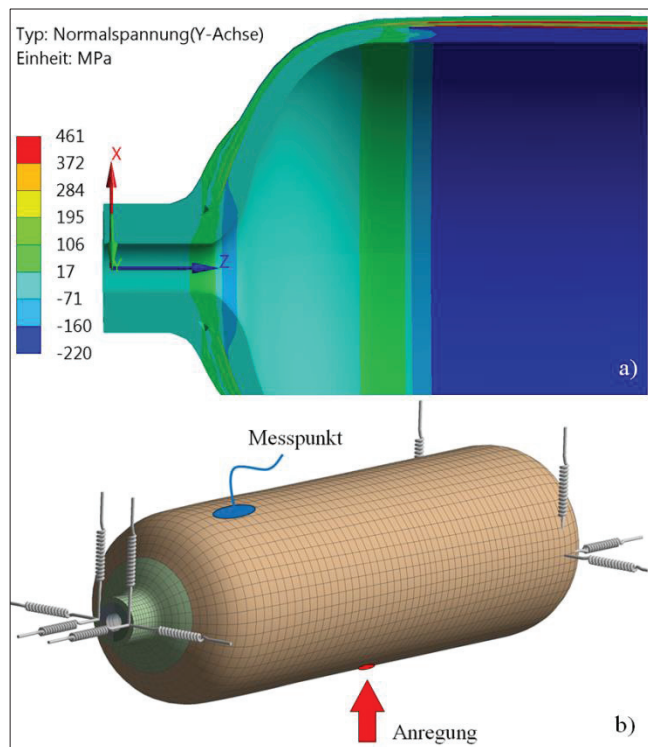


Abbildung 2: a) Modellierung der Vorspannung im Druckbehälter; b) elastische Lagerung des Modells sowie Anregungs- und Messpunkt der harmonischen Analyse

Anschließend wurden eine Modalanalyse sowie eine harmonische Analyse auf Grundlage zweier unterschiedlicher Eigenspannungszustände (Reduzierung der Vorspannung um 50MPa in Umfangsrichtung) durchgeführt und miteinander verglichen. Abbildung 3 zeigt zunächst die Ergebnisse aus der Modalanalyse. Dargestellt werden jeweils die vorspannungsbedingten Eigenfrequenzverschiebungen der ersten 50 ermittelten Schwingformen im Frequenzbereich von 0 bis 7000 Hertz. Es wird ersichtlich, dass eine geringere Vorspannung im Verbund eine Absenkung der Eigenfrequenz zur Folge hat. Außerdem wird deutlich, dass sich die Vorspannungssensitivität für Moden höher Ordnung erhöht. Für einen qualitativen Vergleich des numerischen Modells mit dem Experiment ist eine kontinuierliche Darstellung des strukturellen Übertragungsverhaltens über den gesamten Frequenzbereich unerlässlich. Folglich wird das Übertragungsverhalten des Systems mittels einer harmoni-

schon Analyse ermittelt. Dabei müssen zunächst passende Orte für Anregung und Messung ermittelt werden, um ein möglichst aussagekräftiges Frequenzspektrum in Hinblick auf die eigenspannungssensitiven Moden generieren zu können. Als geeignete Orte für Anregung und Sensor wurden der mittlere bzw. vordere zylindrische Bereich ausgemacht (Abbildung 2b). Abbildung 6 zeigt die Frequenzantwort des Druckbehälters bei unterschiedlichen Vorspannungszuständen. Analog zur Modalanalyse wird auch hier der Einfluss der Vorspannung, mit der Frequenz zunehmend, bei vereinzelt Eigenformen sichtbar.

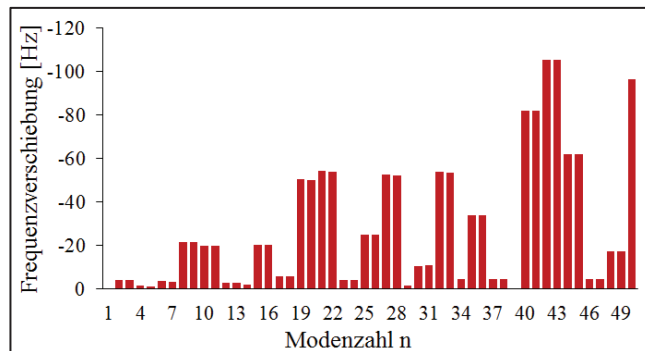


Abbildung 3: Verschiebung der Eigenfrequenzen bei Reduzierung der Vorspannung

Aufbau eines Versuchstandes und Durchführung von Vorversuchen

Aufbauend auf den Vorüberlegungen und den Erkenntnissen aus der FE-Simulation erfolgt der Aufbau eines Versuchstandes zur Durchführung einer experimentellen Modalanalyse. Wie auch schon in der Modellbildung besteht das Ziel darin, innerhalb der Struktur wirkende Spannungszustände auf Grund ihres Schwingungsverhaltens zu erfassen. Der Messaufbau, dargestellt in Abbildung 4, wird analog zum Simulationsmodell umgesetzt.

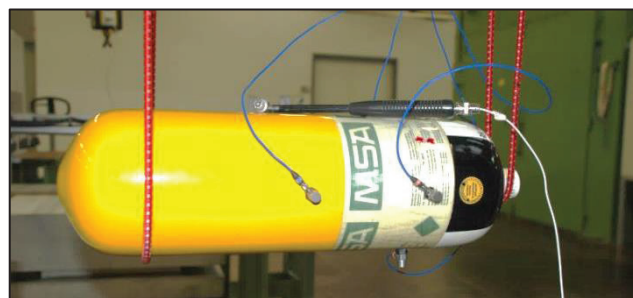


Abbildung 4: Aufbau des Versuchstandes für die experimentelle Modalanalyse

Die Anregung der Behälter erfolgt in Form einer Impulsanregung im mittleren zylindrischen Bereich mittels Modalhammer. Zur Aufzeichnung der Systemantwort werden vier Beschleunigungsaufnehmer appliziert, mit Hilfe von zwei Gummiseilen wird der Behälter elastisch gelagert. Nach Aufnahme der Messgrößen im Zeitbereich erfolgt zunächst die Überführung von Ein- und Ausgangssignal ($E_{i(\omega)}, A_{i(\omega)}$) in den Frequenzbereich mittels Fast-Fourier-Transformation. Die, für die Auswertung erforderliche Übertragungsfunktion berechnet sich anschließend nach Gleichung (3).

$$H_{ij(\omega)} = \frac{A_{i(\omega)}}{E_{j(\omega)}} \quad [\text{m/Ns}^2] \quad (3)$$

Zur genauen Identifikation aller Eigenfrequenzen erfolgt die Berechnung des Phasenverlaufs. Abbildung 5 zeigt die Anregung, Übertragungsfunktion und Phasenverschiebung eines vermessenen Behälters im Frequenzbereich. Dabei wird zunächst ersichtlich, dass das Anregungssignal ab einer Frequenz von $f > 4000$ Hz zunehmend mit Rauschen beaufschlagt ist, welches sich folglich auch in den übrigen Spektren widerspiegelt. Mit Hilfe der Phasenverschiebung lassen sich zuvor nicht eindeutig erkennbare Eigenfrequenzen, wie z.B. die doppelte Eigenfrequenz bei $f = 4000$ Hz, zuordnen.

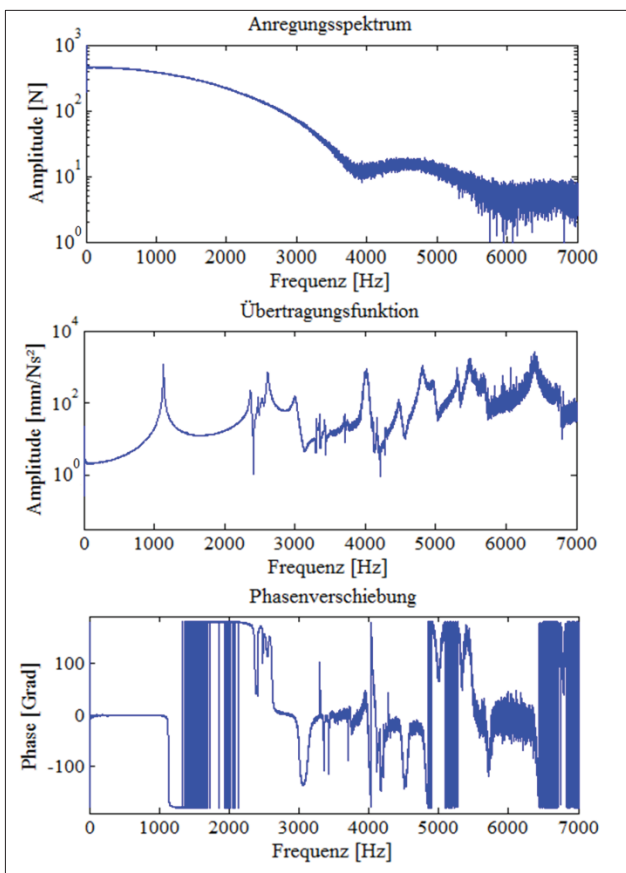


Abbildung 5: Frequenzspektren von Anregung, Übertragungsfunktion und Phasenverschiebung

Auswertung und Vergleich der Ergebnisse

Um die, aus Berechnung und Experiment gewonnen Ergebnisse möglichst gut bewerten zu können, empfiehlt sich eine direkte Gegenüberstellung der Übertragungsfunktionen. Abbildung 6 zeigt die, für eine hohe (SIM190MPa) sowie niedrige Eigenspannung (SIM140MPa) berechneten Spektren im Vergleich zur experimentell ermittelte Übertragungsfunktion (Messg.A15). Generell lässt sich eine hinreichend genaue Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment feststellen. Nach Abgleich mit der FE-Analyse konnten innerhalb des dargestellten Frequenzbereiches zwei Moden bei $f = 4800$ Hz ($m=2/n=4$ -Mode) und $f = 5500$ Hz ($m=3/n=4$ -Mode) identifiziert werden, welche sich für eine experimentelle Messung der Eigenspannungs-

zustände gut eignen. Laut der Simulationsergebnisse besteht eine vergleichbar hohe Sensitivität dieser Moden auf die Vorspannung. Die zwei aufgezeigten Schwingformen lassen sich auch im experimentell ermittelten Frequenzspektrum zuordnen, allerdings mit einem leichten Frequenz-Offset. Eine Zuordnung von Moden höherer Ordnung für $f > 6000$ Hz gestaltet sich hingegen als schwierig. Neben der zunehmenden Dichte an Moden bei hohen Frequenzen bewirkt der steigende Einfluss der Dämpfung eine Überlagerung der Resonanzen [12]. Des Weiteren kommen behälterspezifische Einflüsse aus der Fertigung, wie z.B. geringfügige Abweichungen im Lagenaufbau oder Fehler in Composite (siehe Abbildung 7) im hochfrequenten Bereich deutlicher zum Tragen.

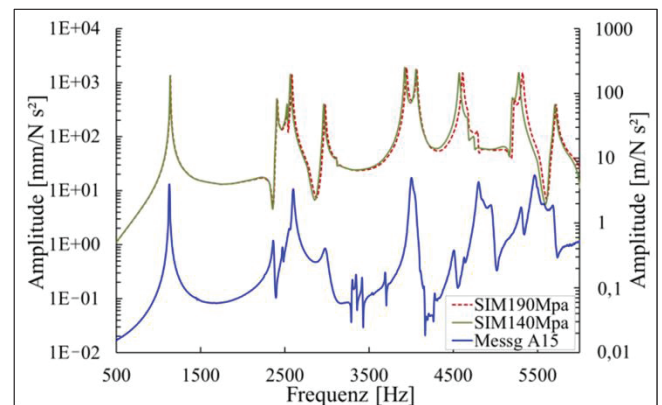


Abbildung 6: Vergleich des numerisch und experimentell ermittelten Übertragungsverhaltens

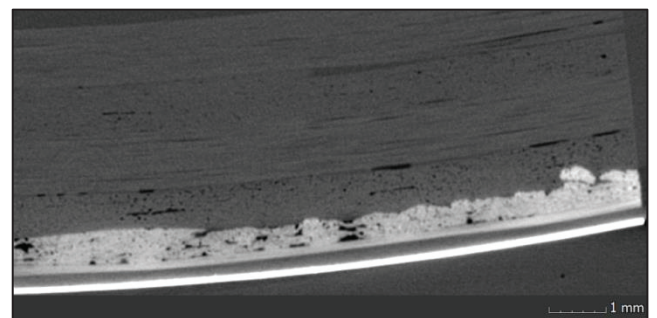


Abbildung 7: Inhomogenität im Lagenaufbau des GFK/CFK-Verbundes der zu untersuchenden Behälters

Ergebnisse aus Messreihen

Aufbauend auf den gewonnen Erkenntnissen werden im Folgenden drei weitere Behälter des gleichen Typs analog zu den bereits durchgeführten Vorversuchen auf ihre modalen Parameter hin untersucht. Hierbei soll im direkten Vergleich eine Aussage über die jeweilig induzierte Vorspannung gegeben werden. Abbildung 8 gibt einen Überblick über das ermittelte Übertragungsspektrum der vermessenen Behälter. Es kann gezeigt werden, dass alle drei Behälter ein zueinander ähnliches Spektrum aufweisen und die Frequenz der ermittelten Resonanzen nur im geringen Maße von einander abweichen. Abbildung 9 zeigt einen Ausschnitt des Spektrums, in dem die relevanten Bereiche vergrößert dargestellt sind. Zwischen den Resonanzfrequenzen von A13 und A21 kann eine Abweichung von bis zu 40 Hertz ermittelt werden. In Bezug auf die Simulationsergebnisse (vgl. Abbildung 6) kann somit vermutet werden, dass Behälter A21 die geringsten Eigenspannungen besitzt,

gefolgt von A11 und A13. Im weiteren Verlauf soll dies Anhand eines Beanspruchungstests verifiziert werden. Dafür werden die Behälter in FB 3.2 der BAM auf einer speziell für Prüfaufgaben konzipierten hydraulischen Impulsprüfanlage unter Lastwechselbeanspruchung bis zum Versagen beansprucht. In Voruntersuchungen gewonnene Ergebnisse belegen eine Korrelation zwischen Lastwechselfestigkeit und Eigenspannung. Die Ergebnisse der Lastwechselprüfung sind in Tabelle 1 aufgelistet und den experimentell ermittelten Resonanzfrequenzen gegenübergestellt. Folglich besaß Behälter A21 die geringste Restfestigkeit, gefolgt von A11 und A13. Zusammenfassend kann somit festgestellt werden, dass die ermittelten Restfestigkeiten der Behälter mit den Ergebnissen aus der experimentellen Modalanalyse korrelieren.

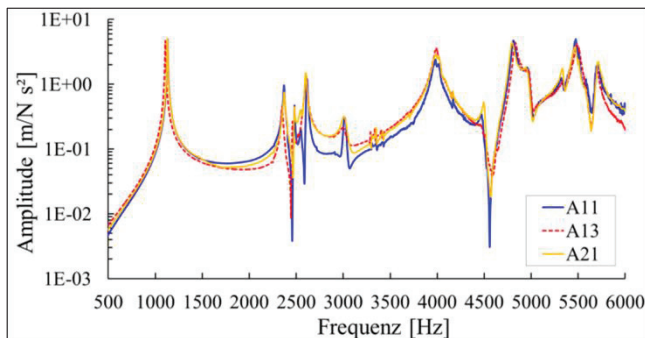


Abbildung 8: Experimentell ermitteltes Übertragungsspektrum der Druckbehälter A11, A13 und A21

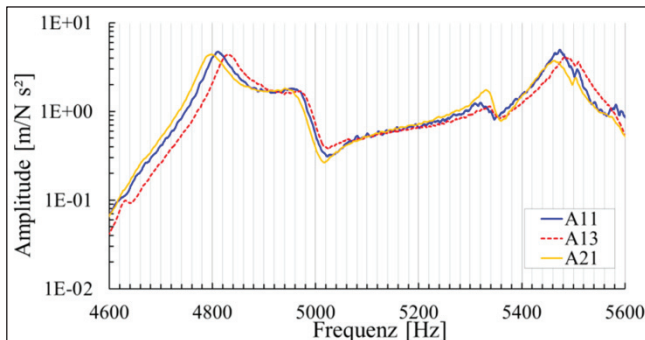


Abbildung 9: Versatz der behälterspezifischen Eigenfrequenzen im zu untersuchenden Frequenzbereich

Tabelle 1: Gegenüberstellung von Resonanzfrequenzen (RF) und ermittelter Rest-Lastwechselfestigkeit

Behälter	RF1[Hz]	RF2 [Hz]	Lastwechsel
A21	4796	5428	2667
A11	4804	5435	3217
A13	4815	5440	3633

Zusammenfassung und Ausblick

In der vorgestellten Veröffentlichung wurde gezeigt, wie durch die Anwendung einer experimentellen Modalanalyse Abweichungen des Eigenspannungszustandes bei Composite-Druckgefäßen mit metallischem Liner detektiert werden können. Durch den Vergleich von experimentell und numerisch ermittelten Übertragungsfunktionen wurden zunächst eigenspannungssensitive und somit, für das Messverfahren geeignete Schwingformen identifiziert. Darauf aufbauend wurden im praktischen Versuch drei Behälter mit der entwickelten Methode auf ihre Eigenspannung untersucht und anschließend in einer Lastwechselprüfung ihre Restfestig-

keit bestimmt. Es konnte gezeigt werden, dass die Ergebnisse aus experimenteller Modalanalyse und Lastwechselprüfung miteinander korrelieren. Zukünftig soll die Zuverlässigkeit des Messverfahrens durch die Vermessung einer größeren Anzahl von Behältern überprüft werden. Um die Aussagekraft der Messergebnisse zu verifizieren, wird an den bereits vermessenen Behältern ebenfalls ein Verfahren zur direkten Eigenspannungsmessung (Freischneideverfahren unter Verwendung von Dehnmessstreifen) Anwendung finden. Des Weiteren soll die Messgenauigkeit der experimentellen Modalanalyse erhöht werden. Durch eine Optimierung der Anregung sowie des Signalverarbeitungsprozesses sollen insbesondere die Sicherstellung der Reproduzierbarkeit sowie eine Minimierung des Signalrauschens im oberen Frequenzbereich erreicht werden.

Literatur

- [1] Mair, GW.: Beitrag zur Beurteilung der ermüdungsbedingten Ausfallsicherheit von Composite-Druckgefäßen. Tech. Überwachung (Nov./Dez.2008), 49
- [2] Mair, GW.; Hoffmann, M.: Assessment of the residual strength thresholds of composite pressure receptacles – a criteria for hydraulic load cycle testing. MP- Mater. Test. (2013); 55(2)
- [3] Seeger, T.; Schön, M.; Bergmann, J. W. und Vormwald, M.: Autofrettage I –Dauerfestigkeitssteigerung durch Autofrettage. Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen, Vorhaben Nr. 478, Heft 550 (1994)
- [4] Schön, M.; Seeger, T.: Dauerfestigkeitsberechnung und Bemessung autofrettierter innendruckbeanspruchter Bauteile. Mat.-wiss. u. Werkstofftech. Vol. 26 (1995), 347-356
- [5] Knappstein, G.: Statik, insbesondere Schnittprinzip. Harri Deutsch, 2008
- [6] 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)
- [7] Alegre, M.: Fatigue behaviour of an autofrettaged high pressure vessel for the food industry. Engineering Failure Analysis Vol. 14 (2007), 396–407
- [8] 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
- [9] 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
- [10] Hoptner, M.; Slavik, M.: Die alte Ausweichzahl und der neue Ausweichfaktor zur Berechnung von Druckgliedern aus Beton. Wiss. Zeitschrift-Hochschule für Verkehrswesen Friedrich List, Dresden 32.5 (1985): 855-861.
- [11] Gasch, R.; Knothe, K.; Liebich, R.: Strukturdynamik: Diskrete Systeme und Kontinua, Springer-Verlag (2012)
- [12] Stache, M.; Guettler, M.; Marburg, S.: A precise non-destructive damage identification technique of long and slender structures based on modal data. Journal of Sound and Vibration 365(2016), 89–101