

Lebensdauerersuche an Faserverbund- Druckbehältern überwacht mittels Schallemissionsprüfung und optischen Fasern

Eric DUFFNER¹, Georg W. MAIR¹, Dorit MUNZKE¹, René EISERMANN^{1,2}, Mariusz SZCZEPANIAK¹, Marcus SCHUKAR¹

¹ Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), 12205 Berlin

² Technische Universität Berlin, Electrical Engineering and Computer Science,
High Voltage Engineering, 10587 Berlin

Kontakt E-Mail: eric.duffner@bam.de

Kurzfassung. Die meisten Faserverbundbehälter, die in Europa für den Transport gefährlicher Stoffe oder als Speicherbehälter für Wasserstoff oder Erdgas in Fahrzeugen Verwendung finden, werden für eine nicht begrenzte Lebensdauer ausgelegt. In regelmäßigen Abständen sind für diese Druckbehälter wiederkehrende Prüfungen vorgeschrieben, die in der Regel aus visuellen Inspektionen und hydraulischen Innendruckprüfungen bestehen [1]. Die wiederkehrenden Prüfungen sind jedoch weder geeignet, die sichere Betriebsdauer festzulegen noch den Alterungszustand der Druckbehälter zu beurteilen. Aufgrund des weiter steigenden Drucks zur Kosten- und Gewichtsreduktion von Faserverbundbehältern und der damit einhergehenden Ausnutzung der existierenden Sicherheitsmargen gewinnen Methoden zur Beurteilung des Alterungsverhaltens dieser Druckbehälter immer mehr an Bedeutung.

Vor diesem Hintergrund wurde in der BAM das Vorhaben „Alterungsverhalten von Composite-Druckgefäßen mit Carbonfaser-Compositen unter gekoppelten Beanspruchungen (COD-AGE)“ gestartet, um die Alterung von Faserverbundbehältern mittels verschiedener zerstörungsfreier Prüfverfahren zu untersuchen. Die hier vorgestellten Ergebnisse wurden an einem Typ 4 Hybridbehälter mit Kunststoffliner gewonnen, in den im Rahmen des Herstellungsprozesses optische Glasfasern in verschiedenen Schichten integriert wurden. Der Behälter wurde mittels hydraulischem Innendruck und erhöhter Umgebungstemperatur zyklisch bis zum Lebensende belastet. Zwischen den einzelnen Lastsequenzen erfolgte eine an die wiederkehrende Prüfung im Betrieb angelehnte hydraulische Druckbelastung.

Sowohl die hydraulische Alterung als auch die Druckrampen wurden mittels Schallemissionsprüfung (SEP) und verteilter faseroptischer Sensorik mit dem Ziel einer frühzeitigen Versagensvorhersage überwacht. Durch die Schallemissionsanalyse sollte untersucht werden, ob zum Lebensende hin ein signifikanter Anstieg der Schallemissionsaktivität und -intensität, unterteilt in verschiedene Lastbereiche, beobachtet werden kann. Zusätzlich zum kontinuierlichen Monitoring der Zyklisierung sollten die Druckrampen separat untersucht werden, um hier Potenziale für die wiederkehrende Prüfung zu erkennen.



1. Einführung

Im Rahmen des BAM internen Vorhabens COD-AGE „Alterungsverhalten von Composite-Druckgefäßen mit Carbonfaser-Compositen unter gekoppelten Beanspruchungen“ wurden in Hybriddruckbehältern, bestehend aus Carbonfaser-Komposit- (CFK) und Glasfaser-Komposit- (GFK) Umwicklungen, im Herstellungsprozess faseroptische Sensoren in verschiedene Behälterlagen integriert. Während Lebensdauerversuchen sollte die Dehnungsverteilung und -änderung in Dicken-, Umfangs- und Längsrichtung des Behälters bestimmt werden, mit dem Ziel, Rückschlüsse über die Materialdegradation zu erhalten. Diese hydraulischen Alterungsversuche wurden zusätzlich durch Schallemissionsprüfung (SEP) überwacht. Die Zyklisierung wurde in regelmäßigen Abständen durch Druckrampen unterbrochen, die an die wiederkehrende hydraulische Prüfung im Betrieb angelehnt sind [1]. Die Messungen der faseroptischen Sensorik erfolgten ausschließlich in den Druckstufen der hydraulischen Druckrampen, wohingegen mit der SEP zusätzlich auch kontinuierlich die hydraulische Innendruckprüfung überwacht wurde.

2. Versuchsaufbau

2.1. Prüfmuster

Bei dem untersuchten Prüfmuster handelt es sich um einen Typ 4 Druckbehälter mit Kunststoffliner, der in Fahrzeugen als Erdgasspeicher verwendet wird. Er besitzt einen Auslegungsdruck von 200 bar, einen Prüfdruck von 300 bar und hat ein Volumen von 46 Litern. Der Behälter weist Lagen sowohl aus Carbonfaser-Kompositen (CFK) als auch aus Glasfaser-Kompositen (GFK) auf. In das Prüfmuster wurden während des Wickelprozesses faseroptische Sensoren in verschiedene Umfangs- und Kreuzlagen integriert (Abb. 1). Die Längen der optischen Glasfasern in den Umfangslagen betragen bis zu 42 m, in den Kreuzlagen wurden bis zu 8 m Sensorfaser integriert. Der Druckbehälter wurde projektintern mit der Nummer C02 bezeichnet.

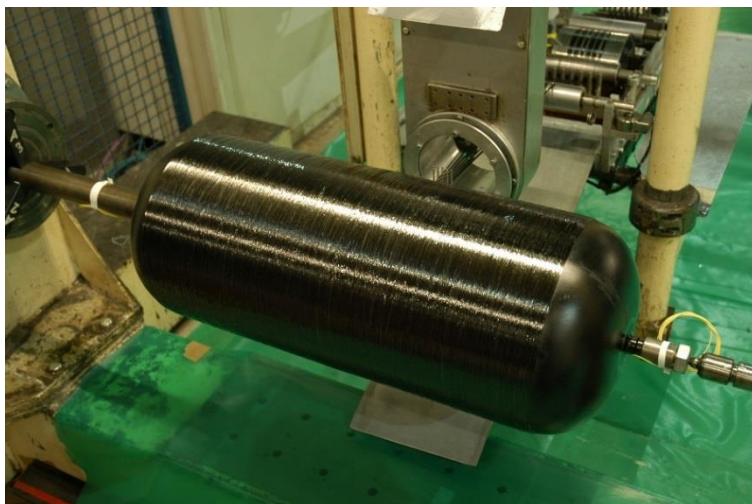


Abb. 1. Integration der faseroptischen Sensoren in eine CFK-Umfangslage während des Wickelprozesses

2.2. Messsetup und -methoden

2.2.1. Schallemissionsprüfung

Für die Schallemissionsprüfung wurde ein Vallen AMSY-6 Schallemissionsmesssystem und Breitband-Schallemissionssensoren vom Typ AE1045S mit einem Frequenzband von 100 bis 1.500 kHz verwendet. Als Vorverstärker dienten externe AEP3-Vorverstärker mit einer Verstärkung von 34 dB. Als Nachweisschwelle für die Aufzeichnung wurden $40 \text{ dB}_{\text{AE}}$ eingestellt. Es wurden jeweils fünf Schallemissionssensoren auf dem Behälter in einer Linie angebracht, die Fixierung erfolgte durch Silicon ohne weitere Hilfsmittel. Der Sensor S1 wurde im Dombereich des Druckanschlusses nahe dem Übergangsbereich zum zylindrischen Bereich angeordnet, die restlichen Sensoren ansteigend im zylindrischen Bereich (Abb. 2). Jeder Sensor ist an einen Kanal im Messgerät angeschlossen, die Kanäle sind mit CH bzw. CHAN bezeichnet, die Nummerierung ist identisch zu den Sensornummern.



Abb. 2. Typ 4 – CfK-/GfK-Hybridbehälter mit faseroptischer Sensorik und Schallemissionssensoren

2.2.2. Faseroptische Sensorik

Verteilte faseroptische Dehnungsmessungen wurden mit einem optischen Rückstreureflektometer durchgeführt. Das Prinzip des optischen Rückstreureflektometers (OBR; OBR 4600, LUNA Inc.) beruht auf der Bestimmung der ortsspezifischen Rayleigh-Rückstreuung entlang der Faser mittels eines durchstimmbaren Wellenlängen-Interferometers. Sowohl die Faserlänge als auch der Brechungsindex der optischen Glasfaser (lokale Variation der Rayleigh-Streuzentren) reagieren sensitiv auf sich ändernde äußere Parameter wie Temperatur und Dehnung. Daraus resultiert eine direkte Abhängigkeit der faserintrinsischen Rayleigh-Streuung von den genannten Parametern. Die ebenfalls temperatur- und dehnungsabhängige Frequenzverschiebung des detektierten im Vergleich zum eingekoppelten Signal gewährleistet so eine verteilte kontinuierliche Temperatur- und Dehnungsmessung. Das hier zum Einsatz kommende OBR-Gerät erlaubt eine Dehnungsauflösung von $1 \mu\text{m/m}$ [3] bei einer Ortsauflösung im sub-Zentimeterbereich über die gesamte Länge der Sensorfaser [4]. Die Detektion und Lokalisation von Materialdegradation beruht auf der durch Schädigungen im Material verursachten Dehnungsänderung [5].

In Abb. 3 ist der Versuchsaufbau für Messungen mit faseroptischer Sensorik schematisch dargestellt. Die Standard-Glasfaser am Messgerät (OBR) ist über eine Kupplung mit der Eingangsfaser am Switch verbunden. Jede Ausgangsfaser am Switch ist über eine Kupplung mit einer Sensorfaser des Druckgasbehälters verbunden. Durch die Verwendung

eines Switches können alle Sensorfasern nacheinander vermessen werden. Das Messgerät wird über einen Laptop gesteuert. Automatisierte Messungen sind ebenfalls möglich, sofern ein Triggersignal der Prüfanlage, in dem sich das Prüfobjekt befindet, zur Verfügung steht und über dieses die Messsoftware gesteuert wird.

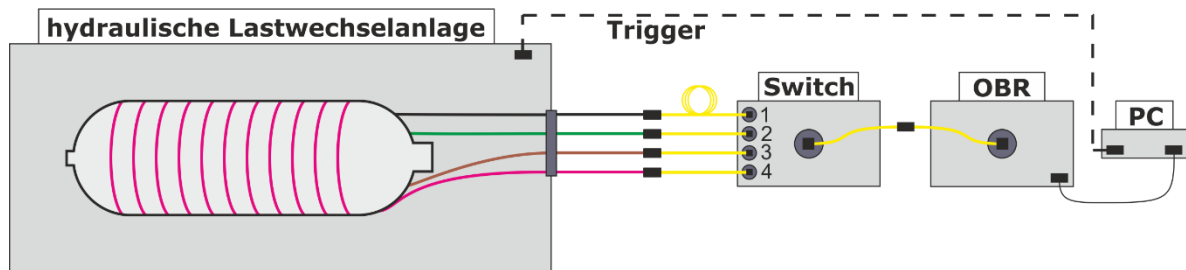


Abb. 3. Versuchsaufbau für Messungen mit faseroptischer Sensorik

2.3. Versuchsdurchführung

Der Behälter C02 wurde hydraulisch bis zum Lebensende zyklert. Die ersten 135.000 Lastwechsel wurden bei Raumtemperatur und in einem Druckbereich von 20 bis 260 bar durchgeführt. Die folgenden knapp 120.000 Lastwechsel erfolgten bis zu einem Druck von 300 bar, wobei die letzten ca. 23.000 Lastwechsel davon zusätzlich bei einer Umgebungstemperatur von 65 °C stattfanden, um das Behälterversagen zu beschleunigen. Bis zum Versagen wurde der Behälter somit mit insgesamt 252.730 Lastwechseln belastet. Zu Beginn der Zyklierung bei 65 °C und danach jeweils alle 5.000 Zyklen wurde der Behälter einer Druckprüfung unterzogen. Der Innendruck wurde während der Druckrampen kontinuierlich bis auf 330 bar erhöht und anschließend gestuft bis auf 20 bar abgelassen (Abb. 4).

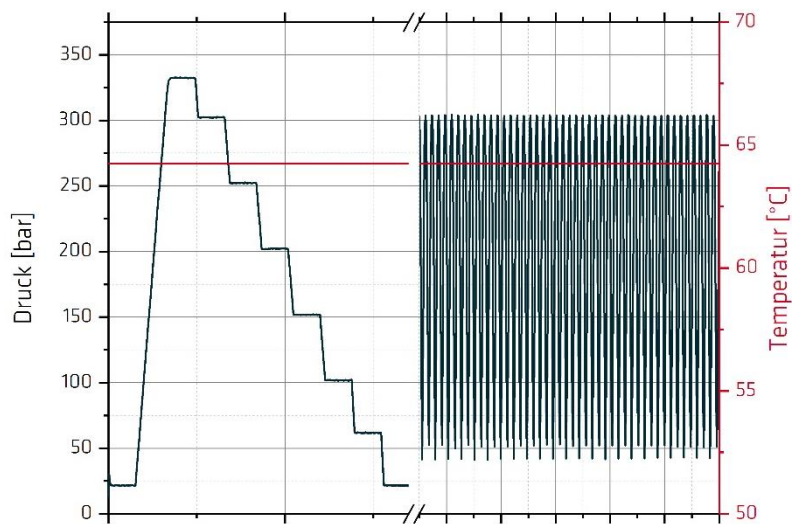


Abb. 4. Verlauf der Druckprüfung und der ersten Druckzyklen

3. Messergebnisse

3.1. Zustandsüberwachung der Lastwechselversuche bei 65°C mittels SEP

Wie zuvor beschrieben, wurde der Behälter einer Vorbelastung von 230.000 Lastwechseln ausgesetzt bevor die Materialalterung durch Anheben der Umgebungstemperatur auf 65°C

beschleunigt und somit eine gezielte Überbeanspruchung des Behälters eingeleitet wurde. Die Zyklisierung bei 65°C wurde in zwei Teilen durchgeführt. Der erste Teil umfasste dabei je vier Druckrampen sowie vier Zyklischerphasen von je 5.000 LW (insgesamt 20.000 LW). Der zweite Teil beinhaltet eine Druckrampe und 2.730 Zyklen, bevor der Behälter versagte. Beide Teile wurden unmittelbar nacheinander durchgeführt. In Abb. 5 ist der Verlauf der Energiesummenkurven aller Sensoren während des ersten Teils dargestellt. Die Kurven umfassen sowohl die Druckrampen als auch die Zyklischerphasen. Start und Ende jeder der vier Druckrampen ist dabei rot markiert. Es sind nur die Signale dargestellt, die aus den oberen 10 % des Druckbereichs (> 270 bar) kommen. Dieser Vorgehensweise liegt die Überlegung zugrunde, dass diese Signale primär einen Schadensfortschritt im Verbundwerkstoff charakterisieren.

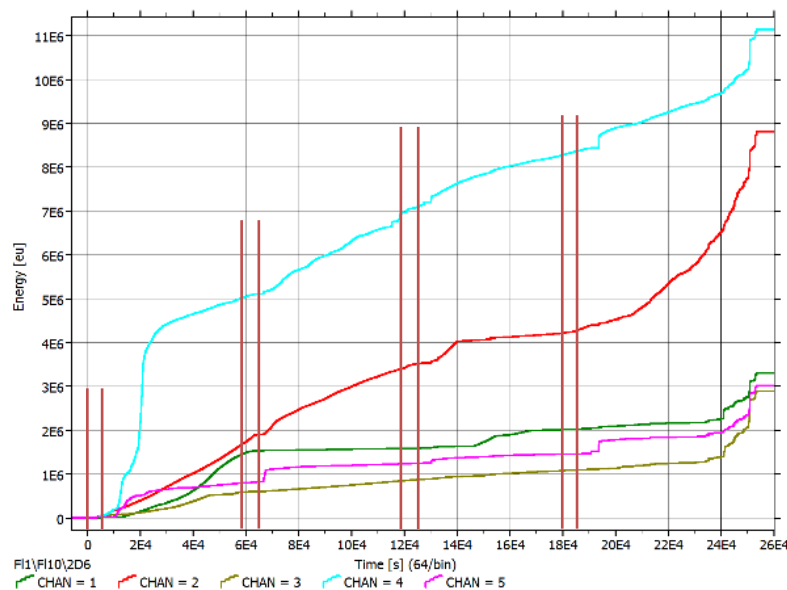


Abb. 5. Energiesummenkurven während des ersten 20.000 Zyklen bei 65 °C, mit Signalen aus einem Druckbereich über 270 bar

Ab dem Beginn der vierten Zyklischerphase ist ein leicht progressiver Anstieg der Energiesummenkurve zu erkennen. Sehr viel deutlicher wird dieser progressive Anstieg jedoch im letzten Drittel der Zyklisierung, nach etwa 18.000 Zyklen. Da die Schallemission (SE)-Aktivität über die gesamte Zyklisdauer relativ gleichmäßig bleibt, nimmt demnach die Intensität der SE-Ereignisse deutlich zu, was mit einer erhöhten Schädigung des Materials bspw. durch erste Faserbrüche zu erklären ist. Während diesen ersten 20.000 Zyklen weist der auf dem Behälter mittig platzierte Kanal 4 die höchsten SE-Energien auf. Die stärkste Energiezunahme, in dieser letzten Zyklischerphase, zeigt jedoch Kanal 2, der im zylindrischen Bereich nahe dem Übergangsbereich zum Boden liegt.

In Abb. 6 sind die Energiesummenkurven für die letzte Zyklischerphase bei 65°C vor dem finalen Behälterversagen dargestellt. Im Moment des Versagens des Druckbehälters kommt es zu einer sehr hohen Anzahl an Faserbrüchen und demzufolge zu sehr hohen aufgezeichneten SE-Energien. Dieser Bereich des unmittelbaren Behälterversagens wurde ebenso herausgefiltert wie der zuvor beschriebene Druckbereich unter 270 bar.

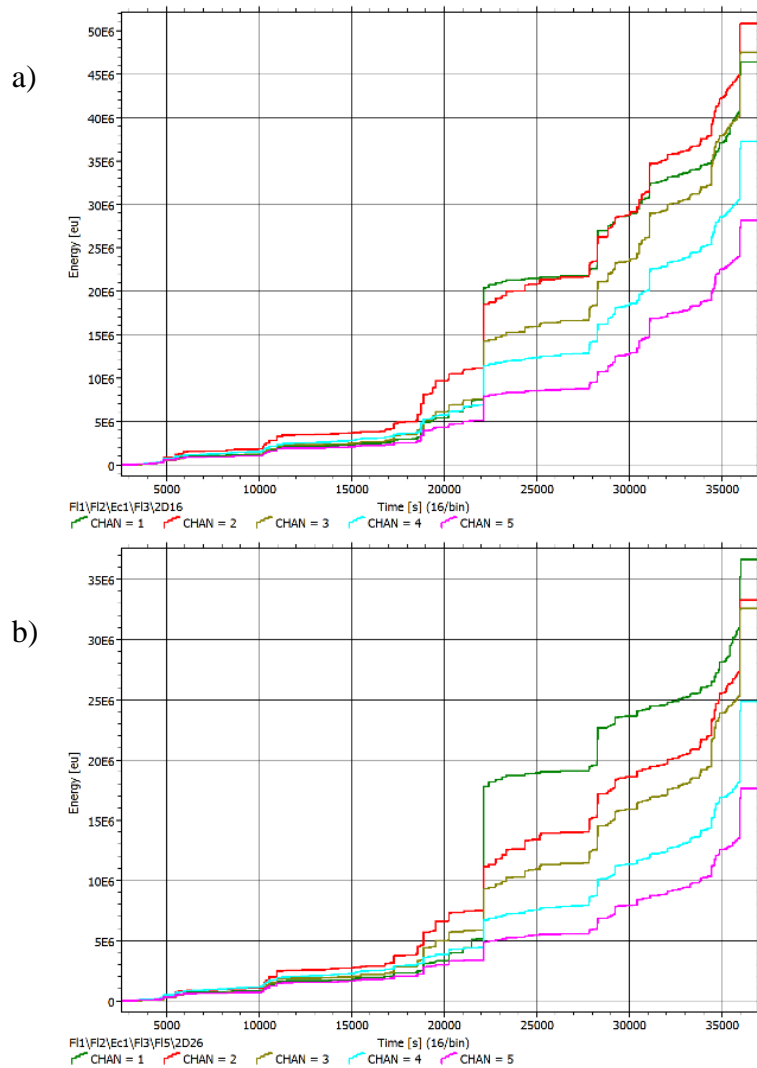


Abb. 6. Energiesummenkurven während der finalen Zyklrierphase bei 65°C.
a) Signale aus Druckanstieg und -abfall, b) Signale nur aus dem Druckanstieg,
mit Druck- und Zeitfilterung (> 270 bar und ohne die letzten 90 s vor dem Versagen)

In der Abb. 6 a) sind die Energien aller Signale aus dem Druckanstieg und -abfall und in Abb. 6 b) nur die Energien aller Signale aus dem Druckanstieg aufsummiert. Der Kurvenverlauf zwischen den Abbildungen a) und b) ist annähernd vergleichbar, d.h. die Signale aus dem Druckanstieg haben den größten Einfluss auf die Energiesummenkurve bzw. die Signalintensität. Nach 22.000 s ist ein deutlicher Anstieg der ab diesem Zeitpunkt bis zum Behälterversagen stark progressiv verlaufenden Energiesummenkurven zu erkennen.

Das Behälterversagen tritt bei etwa 36.000 s auf, demnach deutet sich das Versagen etwa 14.000 s (knapp 1.200 Zyklen) vorher an. Wie die Abbildungen 6 a) und b) zeigen, treten die höchsten Energien an den Kanälen 1, 2 und 3 auf. Diese liegen auch in unmittelbarer Nähe der Versagensstelle an dem Behälter C02. Der Behälter versagte im Dombereich am Druckanschluss des Behälters, dabei wurde der komplette Anschlussadapter aus dem Behälter herausgerissen (Abb. 7).



Abb. 7. Behälter C02 mit Versagen im Bereich des Anschlussadapters

3.2. Ergebnisse der Druckprüfung bei 65°C

3.2.1. Faseroptische Sensorik

Im Folgenden werden die Ergebnisse der in einer GFK-Kreuzlage integrierten optischen Sensorfaser gezeigt, die Ortsauflösung beträgt 1 cm.

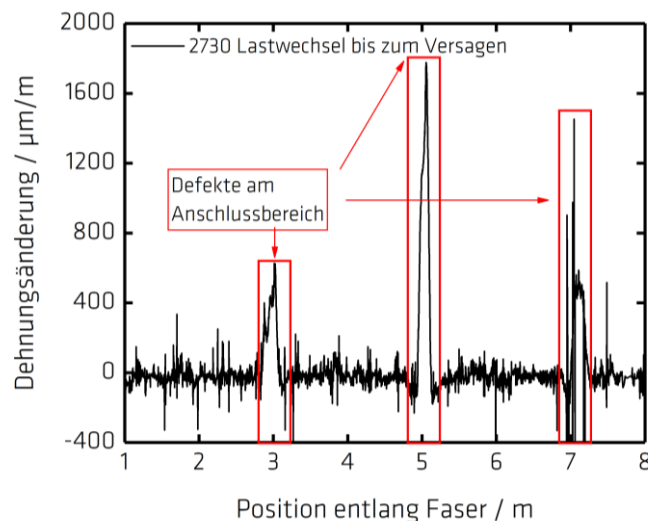


Abb. 8. Dehnungsänderung in Abhängigkeit der Faserlänge bei 2730 Lastwechsel bis zum Versagen des Behälters

Abb. 8 zeigt die Dehnungsänderung der optischen Sensorfaser in Abhängigkeit der Faserlänge bei 254.270 Lastwechseln, d.h. 2.730 Lastwechseln bis zum Versagen des Druckbehälters. Erkennbar sind Bereiche mit einer deutlichen Änderung der Dehnung bei 3 m, 5 m und 7 m. Diese Positionen korrelieren mit dem Bereich des späteren Materialversagens, das heißt dem Dombereich mit dem Anschlussadapter. Die Dehnungsänderung im zylindrischen Bereich und dem Boden ist hingegen nahezu konstant. Diese ca. 2 m entsprechen der Streckenlänge eines kompletten Umlaufs der in Kreuzlage verlegten optischen Faser über den ca. 0,8 m langen zylindrischen Teil des Behälters sowie über die beiden Dombereiche bei einem Behälterdurchmesser von 0,3 m. Aus Abb. 8 geht das Potential der faseroptischen Sensorik zur Zustandsüberwachung von Composite-Druckbehältern hervor. Als minimal invasives, zerstörungsfreies Prüfverfahren gestattet sie die Schadenslokalisierung und das Schadensmonitoring über den gesamten Messzyklus.

3.2.2. Schallemissionsprüfung

Der Verlauf der Energiesummenkurven, die während der Druckprüfung zwischen den Sequenzen von je 5.000 Lastwechseln aufgezeichnet wurden, ist in Abb. 9 dargestellt. Wie bei den Zyklerversuchen betrug die Temperatur während der Druckprüfungen 65 °C. Die Druckprüfung ist angelehnt an die wiederkehrende Prüfung der Druckbehälter im Betrieb, lediglich das maximale Druckniveau lag mit 330 bar um 10% über dem maximalen Druckniveau während der Druckzyklisierung. Zusätzlich wurden weitere Stufen mit konstantem Druck für die faseroptische Sensorik integriert. In Abb. 9 sind die Summenkurven der aufgezeichneten SE-Energien, exemplarisch für den Kanal 1 über dem Druck für alle fünf Druckprüfungen bei 65 °C übereinander, aufgetragen. Damit lässt sich die Entwicklung der SE-Intensität in den aufeinander folgenden Druckkurven gut ablesen.

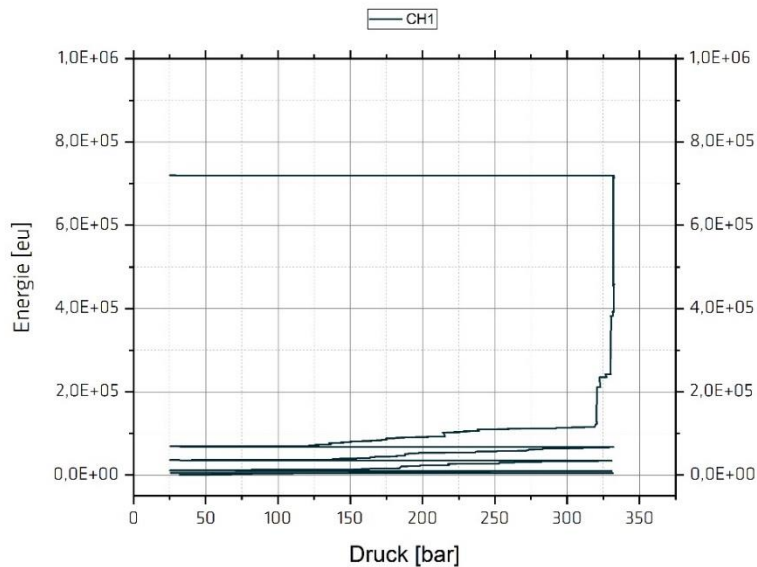


Abb. 9. Energiesummenkurven des Kanal 1.

Wie Abb. 9 zeigt, weist die fünfte und letzte Druckprüfung vor dem Behälterversagen eine drastisch höhere Schallemissionsintensität als die vorhergehenden Druckprüfungen auf. Dieser extreme Anstieg ist an allen fünf Kanälen festzustellen, besonders deutlich tritt er jedoch an den Kanälen 1, 2 und 5 auf, die im bzw. nahe der Behälterböden liegen. Während der finalen Druckprüfung treten nahezu 80 % der Gesamtenergie in der Druckhaltephase bei 330 bar auf, was als äußerst kritisch zu bewerten ist und auf ein bevorstehendes Behälterversagen hinweist. In zahlreichen Untersuchungen wurde der Felicity-Effekt und dessen Bedeutung zur Beurteilung des Schädigungszustandes von Composite-Werkstoffen und Druckbehältern untersucht [7,8]. Der Felicity-Effekt bzw. das Felicity-Verhältnis beschreibt das Verhältnis zwischen der aufgebracht Belastung, bei der Schallemission erneut auftritt und der vorangegangenen maximalen Belastung [3]. Die übliche Vorgehensweise sieht darin eine stufenweise Erhöhung der Last mit einer Lastabsenkung nach jedem Lastplateau vor. Aufgrund der gewünschten Vergleichbarkeit zur wiederkehrenden Prüfung von Composite-Druckbehältern wurde darauf verzichtet. Das Felicity-Verhältnis wurde nachfolgend für jede Druckprüfung, auf Grundlage der aufgezeichneten SE-Intensität, ausgewertet und ins Verhältnis zum maximalen Druck bei vorangegangener Zyklisierung von 302 bar gesetzt (Abb. 10).

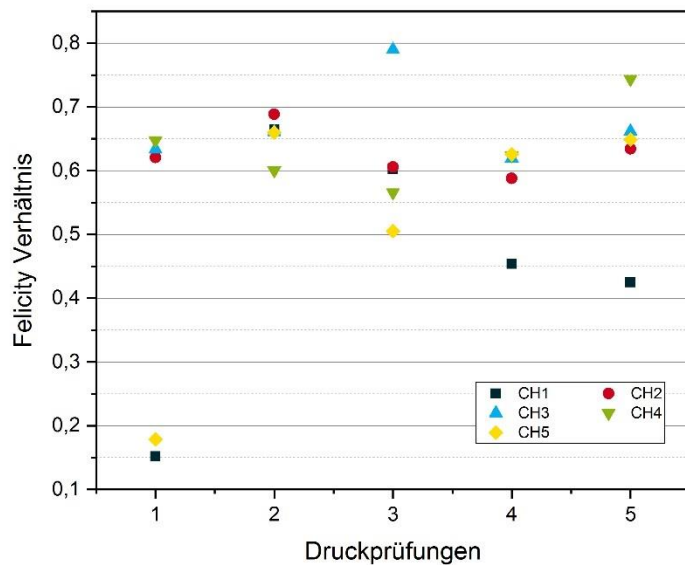


Abb. 10. Felicity-Verhältnis je Kanal und Druckprüfung

Die erste Druckprüfung wurde unmittelbar nach der Temperierung auf 65°C über 48 h, aber ohne vorherige Druckzyklisierung, durchgeführt. An den in den Dombereichen angeordneten Sensoren 1 und 5 setzte sehr frühe signifikante Schallemissionsintensität ein, was zu einem sehr niedrigen Felicity-Verhältnis führt. Während der ersten Druckprüfung ist jedoch die SE-Intensität verglichen mit den folgenden Druckprüfungen sehr gering. Mögliche Ursachen, für das frühe Einsetzen von SE-Aktivität in den Dombereichen könnten erhöhte Spannungen infolge der größeren Dehnung in diesem Behälterbereich sein. Auch die verschiedenen Materialien (Aluminiumadapter, GfK- und CfK-Umwicklung) und die daraus resultierenden unterschiedlichen thermischen Dehnungen könnten bei der Temperierung Spannungen im Material hervorgerufen haben, die zu SE-Signalen bei der ersten Druckprüfung nach der Temperierung geführt haben. Während der folgenden Druckprüfungen schwankt das Felicity-Verhältnis an den Kanälen 2 bis 5 und zeigt keine Hinweise auf ein anstehendes kritisches Behälterversagen. Am Kanal 1 nimmt das Felicity-Verhältnis mit der zweiten Druckprüfung kontinuierlich bis zur fünften und letzten Druckprüfung ab. Dabei kann schon der Wert von 0,45 in der vierten Druckprüfung als kritisch angesehen werden. Zusammen mit der zuvor beschriebenen drastischen Zunahme der SE-Energien, insbesondere in den Druckhaltephasen, kündigt sich das bevorstehende Behälterversagen deutlich an.

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass die Schallemission im Rahmen der wiederkehrenden Druckprüfung das Potential bietet, ein anstehendes Behälterversagen zu erkennen. Die Ermittlung von geeigneten Abbruchkriterien bedarf jedoch weitergehender systematischer Untersuchungen.

4. Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Bei dem durch Temperatur- und Druckerhöhung im finalen Schritt erhöht beanspruchten Behälters kam es nach insgesamt 252.730 Lastwechseln zum Versagen. Die letzten 23.730 Lastwechsel wurden bei 65 °C Umgebungstemperatur durchgeführt. Schon 2.730 Lastwechsel vor dem Versagen des Druckbehälters, konnte bei der letzten Druckprüfung das bevorstehende Behälterversagen detektiert werden. Durch die integrierte faseroptische Sensorik in den Kreuzlagen wird eine deutlich erhöhte Dehnungsänderung im Bereich des Druckanschlusses registriert. Auch die Schallemissionsprüfung registriert zu diesem Zeitpunkt einen kritischen Anstieg an SE-Signalen im Behälter und dabei insbesondere in der Zone am Druckanschluss an Kanal 1. Auch über die Auswertung des Felicity-Verhältnisses kann zu diesem Zeitpunkt eine kritische Zunahme der Schädigung im Bereich des Behälterdoms festgestellt werden.

Beim kontinuierlichen Überwachen der zyklischen Belastung deutet sich eine stark zunehmende Schädigung im Behälter etwa 1.200 Zyklen vor dem finalen Behälterversagen an. Je nach gewählten Abbruchkriterien ließe sich bei der Zustandsüberwachung ein bevorstehendes Behälterversagen mittels SEP ab diesem Zeitpunkt vorhersagen. Wie die hier vorgestellten Ergebnisse zeigen, ist eine Schadensfrüherkennung in Faserverbund Druckbehältern mittels SEA möglich.

Referenzen

- [1] EN ISO 11623:2015 - Gasflaschen - Verbundbauweise (Composite-Bauweise) - Wiederkehrende Inspektion und Prüfung
- [2] R. Eisermann, M. Schukar, L. Nagel, S. Hickmann, D. Munzke und V. Trappe, „Characterising the material degradation of inner pressure-loaded GFRP-tube specimens using distributed strain sensing“, Proceedings of the Sensors and Measuring Systems; 19th ITG/GMA-Symposium; VDE Verlag GmbH: Nürnberg, 2018; S. 239–242.
- [3] D. Samiec., „Distributed fibre-optic temperature and strain measurement with extremely high resolution“, Photonik international, S. 10-13, 2012.
- [4] A. Güemes, A. Fernández-López und B. Scholler, „Optical fiber distributed sensing – physical principles and applications“, Structural Health Monitoring, Bd. 9, Nr. 3, S. 233-245, 2010
- [5] A. Güemes, A. Fernández-López, P. F. Díaz-Maroto, A. Lozano und J. Sierra-Perez, „Structural Health Monitoring in Composite Structures by Fiber-Optic Sensors“, Sensors, Bd. 18, S. 1094 ff., 2018.
- [6] DIN EN 1330-9:2017 - Zerstörungsfreie Prüfung - Terminologie - Teil 9: Begriffe der Schallemissionsprüfung
- [7] Hamstad, M.A. - A discussion of the basic understanding of the felicity effect in fiber composites, *J Acoustic Emission*, **5**, S. 95 -102, 1986
- [8] Weathers, D., Nichols, C., Waller, J., Saulsberry, R., - Automated Determination of Felicity Ratio for Composite Overwrapped Pressure Vessels *NASA USRP – Internship Final Report*, 2010
- [9] Nichols, C., Waller, J., Saulsberry, R., - Acoustic Emission Lifetime Estimation for Carbon Fiber/Epoxy Composite Overwrapped Pressure Vessels, *NASA USRP – Internship Final Report*, 2010