

# Fertigungsbegleitende Qualitätssicherung von Faserverbund-Druckbehältern mittels Schallemissionsprüfung

Eric DUFFNER, Georg W. MAIR, Mariusz SZCZEPANIAK, Stefan LENZ  
BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

**Kurzfassung.** In dem aktuell laufenden EU-Projekt HyComp wurde das bereits beim 18. Kolloquium Schallemission vorgestellte Verfahren zur Qualitätssicherung von Faserverbund-Druckbehältern mittels Schallemissionsprüfung an weiteren Baumustern zweier verschiedener Behältertypen getestet.

Die vorgestellte Methodik beruht auf Merkmalen und zulässigen Grenzwerten, die aus Schallemissionsverläufen bei der Erstdruckprüfung (Druckbehälter mit Kunststoffliner) bzw. dem Autofrettageprozess (Druckbehälter mit metallischem Liner) eines Baumusters abgeleitet werden.

Es wird an einer Anzahl Druckbehälter aus der Serienproduktion eine Referenzkurve mit den mittleren Merkmalswerten und deren Streuung ermittelt. Damit ist das Verfahren zur Druckprüfung dieses Baumusters anwendbar.

Um die Zuverlässigkeit des Verfahrens zu untersuchen, wurden Druckbehälter mit bewusst eingebrachten künstlichen Fertigungsfehlern untersucht.

Alle geprüften Behälter wurden im Anschluss an die SE-Druckprüfung zerstörend geprüft, um Aussagen über die Auswirkungen der eingebrachten Fehler im Vergleich zu den Behältern aus der normalen Produktion treffen zu können.

In dem genannten EU- Projekt wurde das Verfahren an den beiden in der Automobilindustrie gängigen Behältertypen getestet, in einem Fall auch unter Fertigungsbedingungen beim Hersteller.

## 1 Einführung

Das Verfahren zur Qualitätssicherung (QS) mittels Schallemission (SE) wurde entwickelt, um auf einfache und leicht zu implementierende Weise unter normalen Fertigungsbedingungen angewendet zu werden. Es kann sowohl für Typ 3 Druckbehälter (Behälter mit metallischem Liner) als auch für Typ 4 Druckbehälter (Druckbehälter mit Kunststoffliner) angewendet werden, die zuvor noch nicht mit Innendruck belastet wurden. Die Schallemissionsmessung kann sowohl während des Autofrettageprozesses von Typ 3 Behältern als auch während der Dichtheitsprüfung von Typ 4 Behältern durchgeführt werden. Je nach Druckbehältertyp ist einer der beiden Tests für jeden gefertigten Druckbehälter vorgeschrieben bzw. erforderlich [1]. Aus diesem Grund kann die vorgestellte SE-Messung ohne größeren, zusätzlichen Prüfaufwand fertigungsbegleitend angewendet werden [2].

Nach dem vorgestellten Verfahren zu Qualitätssicherung müssen mindestens sieben Druckbehälter eines Designs für die Erstellung einer Referenzkurve geprüft werden. Die Referenzkurve zeigt die mittlere Energiesumme über dem Druck (siehe Abb. 2 bzw. Abb. 5). Von dieser ermittelten Referenzkurve werden die SE-Kriterien und ihre jeweiligen Streuungen abgeleitet. Das ermöglicht es, eine zulässige Abweichung für die Kriterien jedes Baumusters zu definieren, um damit jeden Behälter, welcher in der Produktion mit SE-Prüfung begleitet wird, zu vergleichen und eine Aussage über die Qualität der Behälter zu treffen.

In dem laufenden EU-Projekt HyComp wurde die Leistungsfähigkeit des Verfahrens an Behältern mit künstlich eingebrachten Fehlern untersucht [3].

## 2 Behälterspezifikation und künstliche Fertigungsfehler

Es wurden zwei verschiedene, im Rahmen des EU-Projekts HyComp entwickelte Modellbehälter mit jeweils 9 Liter Volumen für die Untersuchungen verwenden. Ein Typ 3 CfK-Behälter mit Stahlliner und ein Typ 4 CfK-Behälter mit Kunststoffliner. Die Behälter stammen von zwei verschiedenen Herstellern und sind für die Speicherung von Wasserstoff entwickelt worden. Es wurden insgesamt 60 Behälter vom Typ 3 während des Autofrettageversuches mit SE überwacht, davon 45 Behälter mit je einem von vier verschiedenen Fertigungsfehlern. Von den Typ 4 Behältern wurden 19 getestet, davon 12 Behälter mit je einem von vier verschiedenen Fertigungsfehlern.

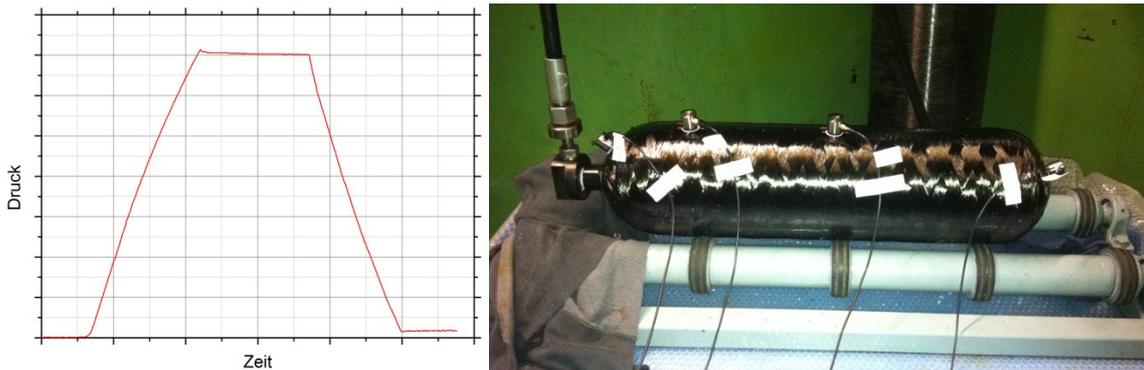
Bei den untersuchten Fertigungsfehlern der beiden Behältertypen handelte es sich um:

- a) MF1 „Offset beim Wickeln“: Die Faserstränge wurden mit einem Offset gegenüber dem Auslegungsdesign auf den Behälter gewickelt.
- b) MF2 „+20% Härter“: Das Harz wurde mit einem um 20% erhöhten Härteranteil gemischt.
- c) MF3 „Aushärten bei Raumtemperatur (RT)“: Statt die Behälter im Ofen auszuhärten, wurden Sie bei RT ausgehärtet.
- d) MF4 „Geänderte Kohlefaser“: Die Behälter wurden mit einem Kohlefasertyp mit deutlich reduzierter Zugfestigkeit gefertigt.

Der Einfluss der vier Fertigungsfehler wurde durch zerstörende Versuche untersucht, auf die am Ende von Kapitel 3 bzw. 4 eingegangen wird.

## 3 SE-Test - Typ 3 Behälter

Die Behälter vom Typ 3 wurden bis zum Autofrettagedruck hydraulisch bedrückt (Abb. 1). Die SE-Sensoren wurden auf der Behälteroberfläche, wie in Abbildung 1 gezeigt, appliziert. Sensor 1 befand sich in der Nähe des Druckanschlusses im Deckel des Druckbehälters und Sensor 3 war in der Mitte des zylindrischen Bereiches angebracht. Die Auswertung konzentrierte sich auf die Kanäle 1 und 3, die sich in vorherigen Projekten als die geeignetsten Kanäle herausgestellt hatten. Die restlichen Kanäle wurden zur Absicherung der Messungen appliziert.

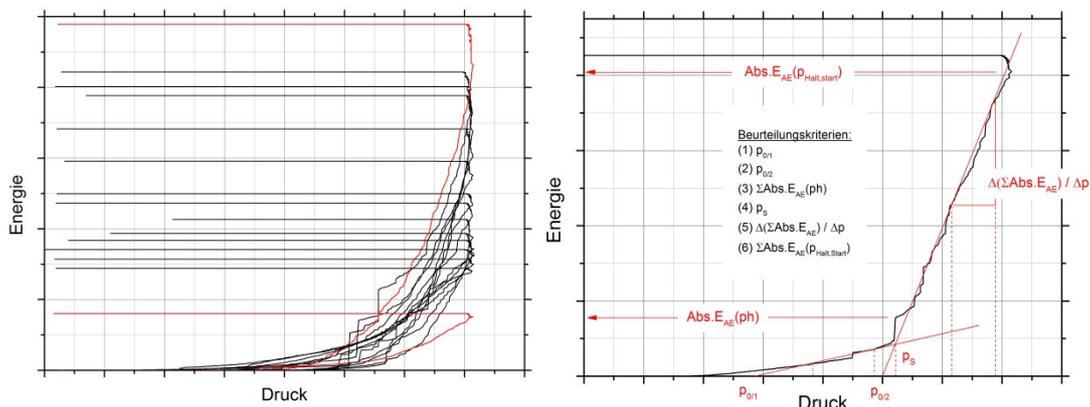


**Abb. 1.** Druckverlauf (links) und Sensorapplikation (rechts) bei Typ 3 Behältern

Die Tests wurden unter Verwendung von SE Messtechnik der Fa. Vallen Systeme GmbH durchgeführt. Bei den Sensoren handelte es sich um Breitbandsensoren (Typ AE1045S) mit einem Frequenzbereich von 0,1 bis 1,5 MHz.

Versuche in vorangegangenen EU-Projekten haben gezeigt, dass für die Bildung einer aussagekräftigen Referenzkurve mindestens sieben vermeintlich fehlerfreie Behälter aus der normalen Produktion eines Baumusters getestet werden müssen [3, 4, 6].

In HyComp wurden 15 Behälter vom Typ 3 getestet, um die Referenzkurve zu entwickeln (siehe Abb. 2). Die größere Anzahl an geprüften Behältern erhöht die Genauigkeit der Statistik für die Referenzkriterien.



**Abb. 2.** Energiesummenkurven (Kanal 3) für alle Behälter vom Typ 3 aus der Serienproduktion (links) und daraus abgeleitete sechs SE Beurteilungskriterien (rechts):

- (1)  $p_{0/1}$ , (2)  $p_{0/2}$ , (3)  $\sum \text{Abs.} E_{AE}(p_h)$ , (4)  $p_s$ , (5)  $\Delta(\sum \text{Abs.} E_{AE}) / \Delta p$ , (6)  $\sum \text{Abs.} E_{AE}(p_{\text{Halt,start}})$

Von den 15 getesteten Behältern wurden die in Abbildung 2 gezeigten Beurteilungskriterien abgeleitet. Alle Kriterien basieren auf der Summe der SE-Energie.

Ein wichtiges Kriterium der Energiesummenkurve ist das Auftreten erster signifikanter SE, welches durch das Kriterium (1) beschrieben wird. In diesem Bereich startet die plastische Verformung des Metalliners, die bei zunehmender Druckerhöhung zu einem höheren Lastanteil im Faserverbund führt. Dies führt zu mehr SE-Signalen z.B. durch Faserdehnungen und erste Zwischenfaserbrüche.

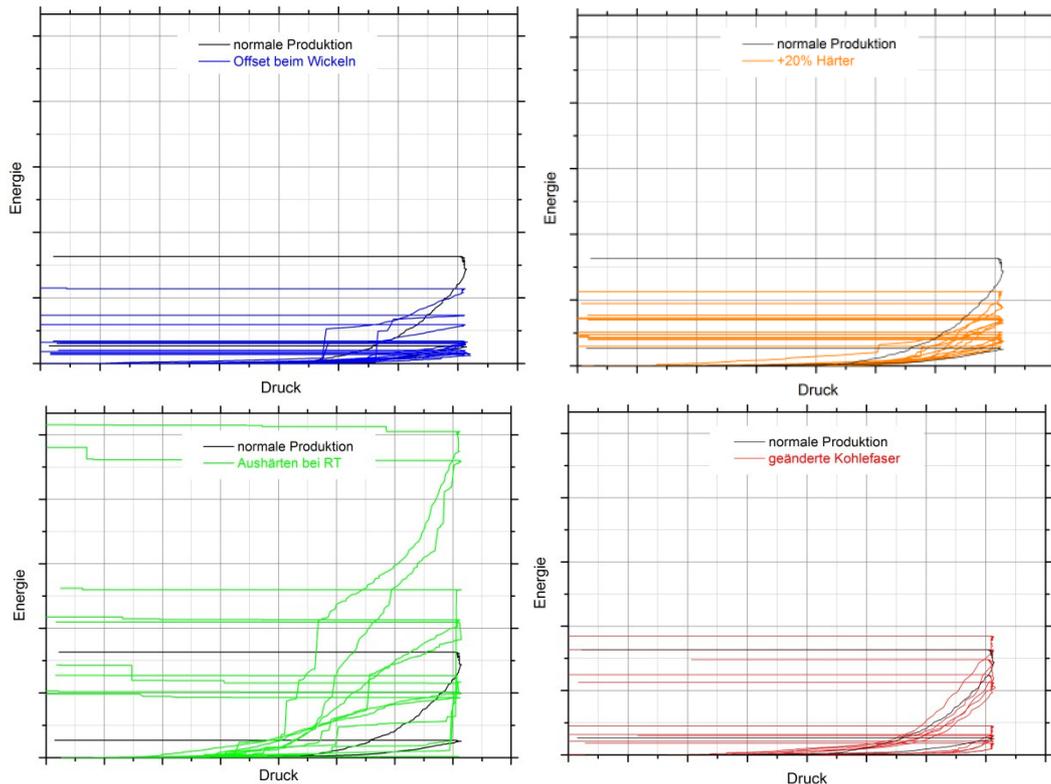
Das Kriterium (2) beschreibt die deutliche Zunahme der SE-Aktivität. Die Extrapolation der Energiesummenkurve, wie sie in Abbildung 2 zu sehen ist, wird durchgeführt, um die Auswertung deutlich objektiver und reproduzierbarer zu machen.

Das Kriterium  $p_s$  steht für den Schnittpunkt der beiden Ausgleichsgeraden und charakterisiert näherungsweise den Beginn einer erhöhten Bildung von Zwischenfaserbrüchen.

Der Anstieg der Energiesummenkurve (Kriterium (5)) beschreibt die Rate von Zwischenfaserbrüchen im Laminat.

Die beiden Kriterien (3) und (6) beziehen sich auf die Energiesumme vom Beginn der Prüfung bis zum Erreichen des Prüfdrucks ( $\sum \text{Abs.} E_{AE}(p_h)$ ) bzw. bis zum Erreichen des Autofrettagedrucks ( $\sum \text{Abs.} E_{AE}(p_{\text{Halt,start}})$ ).

Abbildung 3 zeigt die Energiesummenkurven von Kanal 3 für die vier untersuchten Fertigungsfehler. Zum Vergleich wurden zwei schwarze Kurven in die Diagramme eingezeichnet, die die Behälter mit der höchsten bzw. niedrigsten Energie aus der normalen Produktion zeigen (identisch mit roten Kurven in Abb. 2, links).



**Abb. 3.** Energiesummenkurven der Typ 3 Behälter mit Fertigungsfehlern (Kanal 3):  
 MF1: Offset beim Wickeln (oben links), MF2: +20% Härter (oben rechts),  
 MF3: Aushärten bei RT (unten links), MF4: Geänderte Kohlefaser (unten rechts)

Die sechs Beurteilungskriterien wurden unter der Annahme einer Normalverteilung der Parameter statistisch ausgewertet. Ein Fehler gilt als detektiert, sobald einer der Parameter außerhalb des ermittelten Streubereichs für das jeweilige Kriterium liegt. Die Tabellen 1 und 2 zeigen die Ergebnisse dieser Auswertung für einen Vertrauensbereich von 95% bzw. 99%. Ein „x“ bedeutet, dass der jeweilige Fehler an dem Behälter nicht gefunden wurde, ein „√“ kennzeichnet einen gefundenen Fehler an dem Behälter.

**Tabelle 1.** Bewertungsmatrix aller Typ 3 Behälter mit künstlichen Fertigungsfehlern  
(Vertrauensbereich 95%)

MF1: Offset beim Wickeln	36	39	42	45	88	8	70	74	77	78	94	177
	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✗	✓
MF2: +20% Härter	38	48	52	68	85	67	69	75	79	129	161	196
	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
MF3: Aushärten bei RT	53	54	154	164	171	83	91	105	135	147		
	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
MF4: geänderte Kohlefaser	4	6	73	82	84	90	99	150	180	184		
	✓	✗	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✗	✓		

**Tabelle 2.** Bewertungsmatrix aller Typ 3 Behälter mit künstlichen Fertigungsfehlern  
(Vertrauensbereich 99%)

MF1: Offset beim Wickeln	36	39	42	45	88	8	70	74	77	78	94	177
	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✓
MF2: +20% Härter	38	48	52	68	85	67	69	75	79	129	161	196
	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
MF3: Aushärten bei RT	53	54	154	164	171	83	91	105	135	147		
	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
MF4: geänderte Kohlefaser	4	6	73	82	84	90	99	150	180	184		
	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✗	✗		

Je höher der Vertrauensbereich desto weniger Behälter ohne Fertigungsfehler werden fälschlich aussortiert. Die nachfolgend beschriebenen Ergebnisse basieren auf einem Vertrauensbereich von 95% (vgl. Tabelle 1).

Annähernd 80% der Behälter mit dem Fertigungsfehler „MF1: Offset beim Wickeln“ werden überwiegend durch die Kriterien (1) und (2) entdeckt. Diese Behälter zeigen somit ein frühes Einsetzen erster SE Aktivität aber nur einen geringfügigen Anstieg der Kurve im zweiten Abschnitt. Der Behälter 8 mit dem geringsten Berstdruck aller MF1 Behälter wurde entdeckt. Die Behälter 36, 45 und 88, die zyklisch bis zum Versagen getestet wurden und deren Ergebnisse über- bzw. unterhalb der Streuung der Behälter ohne Fertigungsfehler lagen, wurden ebenfalls entdeckt. Die Behälter 39 und 42, die innerhalb der Streuung der Behälter aus der normalen Produktion lagen, wurden nicht entdeckt. Für diese Fehlerart ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen der zerstörenden Versuche und den Ergebnissen aus der SE-Prüfung.

Der Fertigungsfehler MF2 „+20% Härter“ ist kaum zu entdecken. Die Ergebnisse der zerstörenden Versuche für diesen Fertigungsfehler sind jedoch auch vergleichbar zu denen der Behälter ohne Fertigungsfehler (vgl. Kap. 5).

Der Fehler MF3 „Aushärten bei RT“ kann zuverlässig an jedem Behälter erkannt werden, auch mit einem Vertrauensbereich von 99%. Die beiden wichtigsten Kriterien sind (2) und (4), was bedeutet, dass diese Behälter einen früheren Beginn von signifikanten SE-Signalen im zweiten Kurvenabschnitt und eine höhere SE-Intensität als die Behälter ohne Fehler zeigen. Das ist voraussichtlich begründet in einer früher einsetzenden und höheren Anzahl an Zwischenfaserbrüchen im Vergleich zu den Referenzbehältern. Die Ergebnisse aller zerstörenden Versuche der Behälter mit Fehler MF3 liegen innerhalb der Streuung der Behälter ohne Fertigungsfehler.

70% der Behälter mit Fertigungsfehler MF4 „geänderte Kohlefaser“ werden erkannt. Die SE-Kriterien (4) und (1) sind die beiden wichtigsten Kriterien, um diesen Fehler zu finden. Diese Behälter zeigen eine frühe erste SE Aktivität aber eher später einsetzende signifikante SE-Signale im zweiten Kurvenabschnitt. An zwei Behältern (Behälter 4 und 150) wurde ein Berstversuch durchgeführt. Der Berstdruck beider Behälter betrug weniger als 70% des Berstdrucks der Behälter ohne Fehler und beide Behälter wurden entdeckt.

Fünf Behälter (6, 73, 82, 84 und 90) wurden unter erhöhter Temperatur konditioniert und anschließend mit zyklischem Innendruck belastet. Alle fünf Behälter

versagten deutlich früher, aber nur zwei Behälter wurden bei der SE-Prüfung erkannt. Im Gegensatz dazu wurde der zyklisch getestete Behälter (Nr. 90) mit Fehler MF4, der innerhalb der Streuung der Ergebnisse der Zyklerversuche der Behälter aus normaler Produktion lag, entdeckt.

In der nachfolgenden Tabelle 3 sind die zerstörenden Versuche an den Behältern vom Typ 3 zusammengefasst. Die normierten Werte in den Tabellen beziehen sich auf die Prüfergebnisse an den Behältern aus normaler Produktion.

**Tabelle 3.** Zusammenfassung der zerstörenden Versuche (Typ 3 Behälter)

Fertigungsfehler	Durchgeführter Versuch	normiert	
		Durchschnitt	Standard Abweichung
MF1: Offset beim Wickeln	Berstversuch	1,02	2,1
	Konditionierung + Zyklisierung	1,01	1,5
MF2: +20% Härter	Berstversuch	1,03	1,6
	Konditionierung + Zyklisierung	0,97	0,7
MF3: Aushärten bei RT	Berstversuch	0,90	7,1
	Konditionierung + Zyklisierung	1,10	1,5
MF4: geänderte Kohlefaser	Berstversuch	0,69	0,9
	Konditionierung + Zyklisierung	0,73	1,7

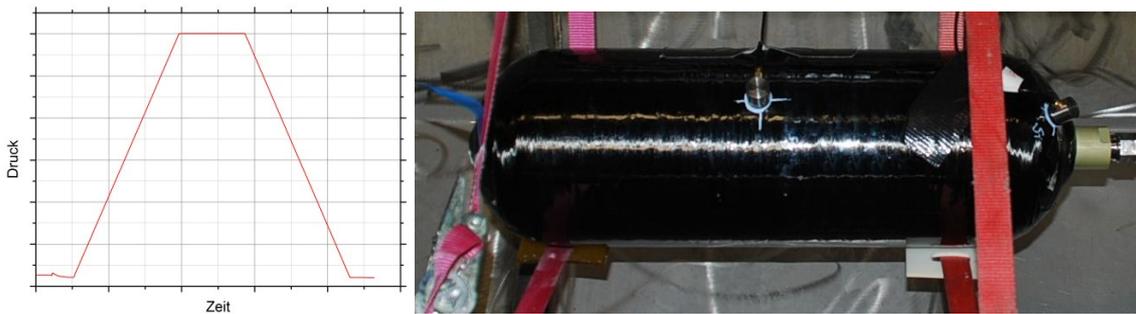
Die Fehlerarten MF1 und MF2 haben nur einen sehr geringen Einfluss auf die Ergebnisse der Zyklis- bzw. Berstversuche der Behälter. Lediglich die Standardabweichung für beide Fehler ist größer (bis zum 2,1-fachen der Standardabweichung der Referenzbehälter). Die Behälter mit dem Fehler MF3 haben einen im Durchschnitt um 10% reduzierten Berstdruck, die durchschnittlichen Zyklen bis zum Versagen der Behälter sind jedoch um 10% erhöht. Die Streuung der Werte ist jedoch erheblich höher, besonders bei den Ergebnissen der Berstversuche.

Den größten Einfluss auf die Behältereigenschaften hat der Fertigungsfehler MF4, bei dem die Ergebnisse der Berst- bzw. Zykliversuche um bis zu 30% reduziert sind.

#### 4 SE-Test - Typ 4 Behälter

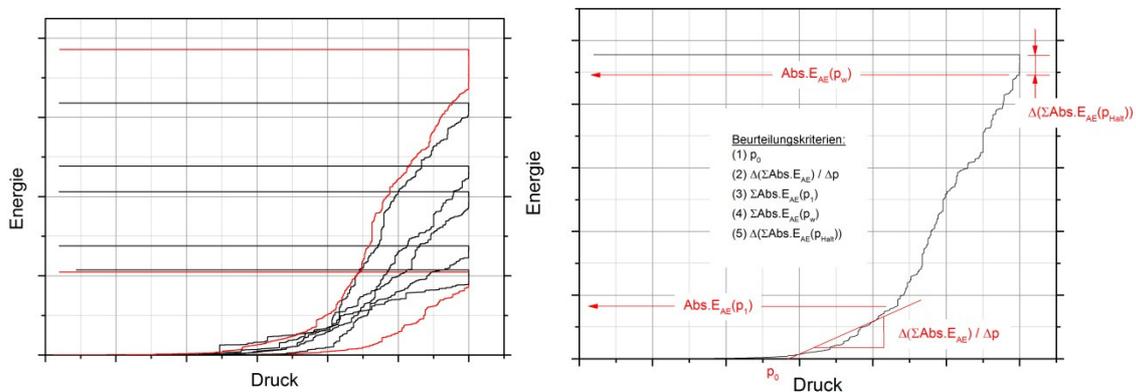
Die Behälter vom Typ 4 wurden bis zum Arbeitsdruck getestet. Üblicherweise werden die Behälter im Herstellungsprozess bis zum Prüfdruck (1,5-fachen des Arbeitsdrucks) belastet. Der Grund für den reduzierten Druck lag darin, dass Vorversuche an den Behältern mit Fertigungsfehler MF4 „geänderte Kohlefaser“ einen Berstdruck annähernd dem Prüfdruck aufwiesen und demzufolge ein Test bis zum Prüfdruck eine zu große Gefahr für die Beschädigung der SE-Messtechnik dargestellt hätte.

Die SE-Sensoren wurden, wie in Abbildung 4 zu sehen ist, auf der Behälteroberfläche befestigt; ein Sensor im Schulterbereich (Kanal 1) nahe dem Druckanschluss und ein weiterer mittig im zylindrischen Bereich (Kanal 3).



**Abb. 4.** Druckverlauf (links) und Sensorapplikation (rechts) bei Typ 4 Behältern

Es wurde die gleiche SE-Ausrüstung wie für die Behälter vom Typ 3 verwendet (vgl. Kapitel 3). Sieben Typ 4 Behälter aus der normalen Produktion vermeintlich ohne Fertigungsfehler wurden für die Ermittlung der SE-Referenzkurve und zur Bestimmung der Beurteilungskriterien und deren Verteilung getestet.



**Abb. 5.** Energiesummenkurven (Kanal 3) für alle Behälter vom Typ 4 aus der Serienproduktion (links) und daraus abgeleitete fünf SE Beurteilungskriterien (rechts):  
 (1)  $p_0$ , (2)  $\Delta(\Sigma \text{Abs.} E_{AE}) / \Delta p$ , (3)  $\Sigma \text{Abs.} E_{AE}(p_1)$ , (4)  $\Sigma \text{Abs.} E_{AE}(p_w)$ , (5)  $\Delta(\Sigma \text{Abs.} E_{AE}(p_{\text{Halt}}))$

Abbildung 5 zeigt die Energiesummenkurven für Kanal 3 aller getesteter Behälter ohne Fertigungsfehler. Die ermittelten Beurteilungskriterien der Typ 4 Behälter unterscheiden sich von denen der Typ 3 Behälter, stimmen aber mit den ermittelten Beurteilungskriterien der vorangehenden EU-Projekte StorHy und INGAS überein, in dem sich diese Kriterien für Typ 4 Behälter als geeignet herausgestellt hatten [3, 4, 6].

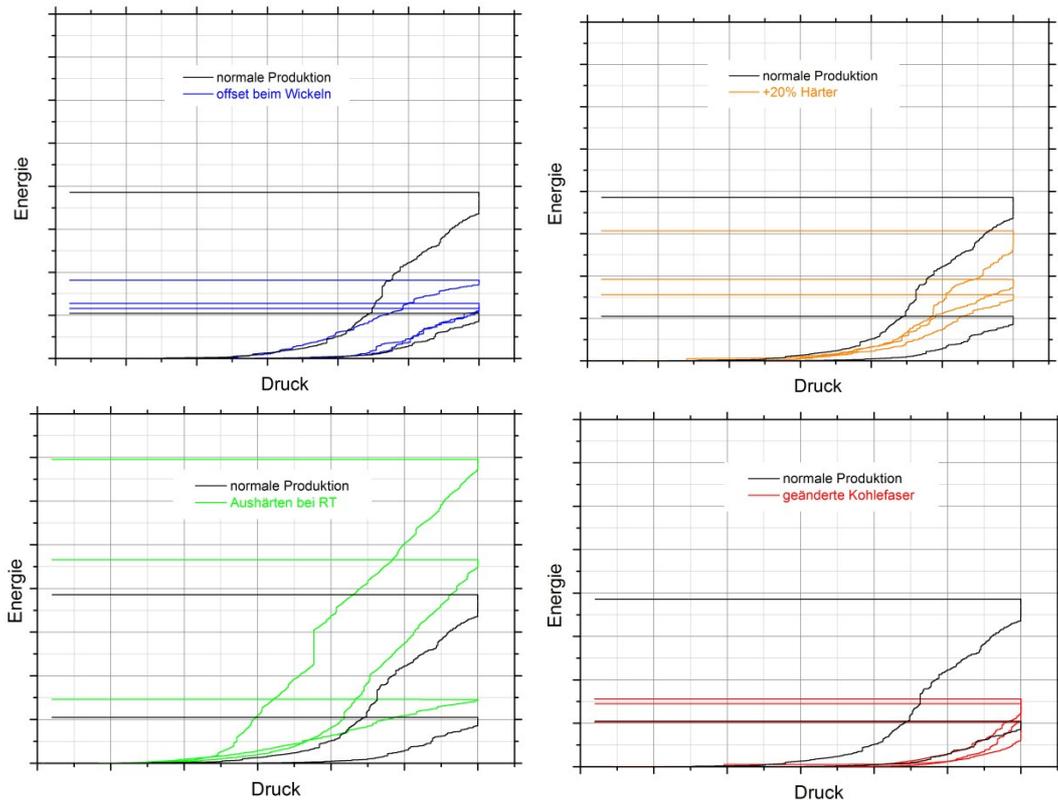
Im Gegensatz zu den Typ 3 Behältern zeigen die Energiesummenkurven der Typ 4 Behälter keine so ausgeprägten zwei linearen Bereiche. Ein weiterer wichtiger Unterschied liegt in der deutlich höheren SE-Aktivität der Typ 4 Behälter während der Druckhaltephase.

Das abgeleitete Beurteilungskriterium (1) der Typ 4 Behälter ist vergleichbar mit dem Kriterium (1) der Typ 3 Behälter. Genauso ist die Energie bei Arbeitsdruck bei Typ 4 Behältern (Kriterium (4)) mit der Energie zu Beginn der Haltephase, wie sie für die Typ 3 Behälter als Kriterium (6) angewendet wurde, vergleichbar.

Der Anstieg der Energiesummenkurve (Kriterium (2)) kennzeichnet das Auftreten erster SE-Aktivität bedingt durch z.B. Ausrichten und Strecken von Fasern und/oder erste Zwischenfaserbrüche. Der Wert für das Kriterium (3) wird am Beginn einer erhöhten SE-Aktivität bestimmt, welcher wahrscheinlich einen starken Anstieg der Zwischenfaserbrüche kennzeichnet. Die während der Druckhaltephase ansteigende SE- Energie (Kriterium (5)) ist durch das viskoelastische Verhalten von Faserverbund- und Linerwerkstoff begründet.

Abbildung 6 zeigt die Energiesummenkurven für die vier Fertigungsfehler der untersuchten Behälter beispielhaft für Kanal 3. Aus Vergleichbarkeitsgründen ist auch hier

die Energiesummenkurve mit der höchsten und niedrigsten Energie der Behälter ohne Fertigungsfehler in schwarz eingetragen (vgl. rote Kurven in Abb.5, links).



**Abb. 6.** Energiesummenkurven der Typ 4 Behälter mit Fertigungsfehler (Kanal 3):  
 MF1: Offset beim Wickeln (oben links), MF2: +20% Härter (oben rechts),  
 MF3: Aushärten bei RT (unten links), MF4: Geänderte Kohlefaser (unten rechts)

Tabelle 4 zeigt die Ergebnisse der SE-Prüfung aller Typ 4 Behälter jedes Fertigungsfehlers für die Vertrauensbereiche 67%, 95% und 99%. Ein „x“ bedeutet auch hier, dass der jeweilige Fehler an dem Behälter nicht gefunden wurde, ein „√“ kennzeichnet einen gefundenen Fehler an dem Behälter.

**Tabelle 4.** Bewertungsmatrix aller Behälter mit künstlichen Fertigungsfehlern

Vertrauensbereich \ Behälter	MF1: Offset beim Wickeln			MF2: +20% Härter			MF3: Aushärten bei RT			MF4: geänderte Kohlefaser		
	04	05	07	02	04	05	03	04	06	01	02	04
	67%	√	√	√	x	√	√	√	√	√	√	√
95%	x	x	√	x	√	√	√	√	√	√	√	√
99%	x	x	√	x	x	x	√	√	√	√	√	√

Aufgrund der geringeren Streuung der Bewertungsparameter der Typ 4 Behälter aus der normalen Produktion gegenüber der Streuung der Typ 3 Behälter, ist ein Vertrauensbereich von 99% für die Bewertung dieses Behältertyps geeignet.

Der Fertigungsfehler MF1 ist kaum zu entdecken. Das am ehesten geeignete Kriterium, um diesen Fehler zu finden, ist das Kriterium (2), welches das Auftreten erster SE-Aktivität beschreibt. Es ist jedoch keine Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen der SE-Prüfung und den zerstörenden Versuchen zu erkennen.

Bei einem Vertrauensbereich von 99% kann auch der Fertigungsfehler MF2 nicht entdeckt werden. Bei einem 95%igen Vertrauensbereich ist das einzige abweichende

Kriterium Nr. (5), d.h. der Behälter weist eine geringfügig höhere SE-Aktivität während der Haltephase gegenüber den Behältern ohne Fehler auf. Die Behälter 04 und 05 wurden bei 95% Vertrauensbereich entdeckt und hatten beide einen geringeren Berstdruck als der nicht detektierte Behälter 02. Die Ergebnisse der zerstörenden Versuche für alle drei Behälter sind jedoch innerhalb der Streuung der Behälter aus normaler Produktion.

Die Fehler MF3 und MF4 können beide sogar bei einem Vertrauensbereich von 99% erkannt werden. Der Fehler „Aushärten bei RT“ (MF3) ist überwiegend durch die Kriterien (2) und (3) zu entdecken. Diese Behälter zeigen einen frühen Beginn von SE-Aktivität sowie eine hohe SE-Intensität, vermutlich durch eine erhöhte Anzahl an Zwischenfaserbrüchen. Die Ergebnisse der zerstörenden Versuche lagen alle am oberen Ende oder über dem Bereich der Streuung der Behälter aus normaler Produktion.

Die geänderte Kohlefaser (MF4) kann durch die Kriterien (1) und (5) entdeckt werden, was ein früheres Auftreten erster SE Signale und eine höhere SE-Aktivität während der Haltephase bedeutet. Die Schallemissionssignale während der Haltephase können zum Teil als fortschreitende Schädigung durch druckbedingtes viskoelastisches „Fließen“ der Behälter gedeutet werden. Die zerstörenden Versuche ergaben sehr viel geringere Werte als die Behälter aus normaler Produktion.

In Tabelle 5 sind die Ergebnisse der zerstörenden Versuche an den Typ 4 Behältern normiert auf die Ergebnisse der zerstörenden Versuche an den Referenzbehältern zusammengefasst.

**Tabelle 5.** Zusammenfassung der zerstörenden Versuche (Typ 4 Behälter)

Fertigungsfehler	Durchgeführter Versuch	normiert	
		Durchschnitt	Standard Abweichung
MF1: Offset beim Wickeln	Berstversuch	0,93	0,8
MF2: +20% Härter	Berstversuch	1,03	0,8
MF3: Aushärten bei RT	Berstversuch	1,08	0,7
MF4: geänderte Kohlefaser	Berstversuch	0,57	0,4

Der Einfluss der Fertigungsfehler auf die Typ 4 Behälter ist ähnlich dem Einfluss auf die Typ 3 Behälter. Eine Bewertung der Standardabweichung ist bei einer Stichprobe von nur drei Behältern je Fertigungsfehler nicht sinnvoll.

## 5 Zusammenfassung

Die Form der Energiesummenkurve der Typ 3 Behälter unterscheidet sich von der der Typ 4 Behälter. Bei den Behältern vom Typ 3 sind 2 lineare Bereiche zu erkennen. Die Kurve der Typ 4 Behälter zeigt nur einen ausgeprägten linearen Bereich, dafür aber eine höhere Zunahme der SE-Energie während der Druckhaltephase. Dies unterstreicht die Notwendigkeit Kriterien zu entwickeln, die dem charakteristischen Verhalten der Behältertypen entsprechen. Die Untersuchungen unterstreichen weiterhin, dass die gezeigten Kriterien für Typ 3 bzw. Typ 4 Behälter geeignet sind.

Der Fertigungsfehler MF3 „Aushärten bei RT“ kann für beide Behältertypen zuverlässig entdeckt werden. Der Fehler MF4 „geänderte Kohlefaser“ wird bei den Typ 4 Behälter zuverlässig entdeckt und kann mit einer hohen Wahrscheinlichkeit ebenfalls für die Typ 3 Behälter entdeckt werden. Die Fertigungsfehler MF1 „Offset beim Wickeln“ und MF2 „+20% Härter“ können bei beiden Behältern kaum entdeckt werden.

Dies stimmt mit den Ergebnissen der zerstörenden Versuche überein, bei denen nur die Behälter MF3 und MF4 einen klaren Einfluss auf die Ergebnisse der zerstörenden Versuche zeigen.

Hier liegt die Stärke der Qualitätssicherung durch die fertigungsbegleitende Schallemissionsprüfung mittels der vorgestellten Methode. Die Fehler MF3 und MF4 sind durch herkömmliche Methoden der Qualitätssicherung (z.B. hydraulischen Wasserdruckprüfung) nicht zu entdecken. Beide Fehler stellen jedoch ein ernstes Sicherheitsrisiko dar, wie die zerstörenden Versuche bekräftigen. Mit den durchgeführten Untersuchungen konnte das Verfahren zur fertigungsbegleitenden SE-Druckprüfung für diese Arten von Fertigungsfehlern und Behältertypen verifiziert werden.

Im Rahmen des EU-Projektes HyComp wurde die vorgestellte Methode zur Qualitätssicherung mittels SE bei einem Behälterhersteller unter Bedingungen vergleichbar mit der Serienproduktion untersucht. Der zusätzliche Aufwand der SE-Prüfung beträgt nur wenige Minuten und kann durch einen entsprechend geschulten Mitarbeiter durchgeführt werden. Die Auswertung der Daten kann in die Analysesoftware des SE-Messsystems integriert werden, wodurch das Ergebnis der SE-Prüfung unmittelbar nach der Druckaufbringung zur Verfügung steht.

## 6 Referenzen

- [1] E/ECE/324/Rev.2/Add.109/Rev.1/Amend.2 (Regulation No. 110)
- [2] BAM Patent EP 1 882 933 B1 vom 10.04.2013 – J. Bohse und G.W. Mair
- [3] Deliverable D4.3 “Report on quality assurance methods and NDE applicable to the manufacturing process” – E.Duffner – EU Project HyComp – June 2013
- [4] Deliverable D SA 7, Procedure for Evaluation of Composite Cylinders using Acoustic Emission – J. Bohse, G.W. Mair, S. Anders – EU Project StorHy – Sep. 2006
- [5] Deliverable DB.1.4, Quality concept for advanced pressure vessel manufacturing – E. Duffner, C. Gregor, V. Strubel – EU Project INGAS – March 2011
- [6] Überwachung der Fertigungsqualität von Faserverbund-Druckbehältern mittels Schallemissionsprüfung – E. Duffner, C. Gregor, J. Bohse – 18. Kolloquium Schallemission – August 2011