

Berstdruckvorhersage mittels Schallemissionsanalyse

Markus SAUSE¹, Stefan SCHMITT¹, Birte HOECK², Andreas MONDEN¹

¹ Universität Augsburg, Augsburg

² MT Aerospace AG, Augsburg

Kontakt E-Mail: markus.sause@mrm.uni-augsburg.de

Kurzfassung. Druckbehälter stellen seit jeher eine besonders sicherheitskritische Strukturkomponente dar. Zur Qualitätsabnahme solcher Behälter aus faserverstärkten Kunststoffen wurden bereits in der Vergangenheit Indikatoren auf Basis von Schallemissionsmessungen herangezogen. Unter Verwendung neuerer Methoden bieten die aufgezeichneten Daten zusätzlich die Möglichkeit, den Berstdruck des Behälters vorherzusagen. Dieser Beitrag präsentiert hierzu eine Methode, um die lokale Belastung eines faserverstärkten Materials vorherzusagen. Der vorgestellte Ansatz stützt sich auf ein stufenweise ansteigendes Lastprofil, wie es bei Testverfahren von faserverstärkten Druckbehältern üblich ist. Es wird ein künstliches neuronales Netzwerk eingesetzt, um eine Beziehung zwischen zyklisch ausgewerteten Schallemissionskriterien und dem global angelegten Belastungsverhältnis herzustellen. Die verwendete Trainingsdatenbank für dieses neuronale Netzwerk wird auf Basis von Experimenten im Labormaßstab erarbeitet, wie z.B. Zugversuchen, Biegeversuchen, Mode-I und Mode-II Versuchen und Überlapp-Zugscherversuchen. Wir präsentieren die Anwendung dieses neuronalen Netzwerks für die Berstdruckvorhersage von drei kleinen Druckbehältern (560 mm Länge) und zwei großen Druckbehältern (2600 mm Länge). In allen Fällen beträgt die Abweichung zwischen vorhergesagtem und gemessenem Berstdruck weniger als 3,0% bei einer maximalen Prognoseunsicherheit von 9,8%. Darüber hinaus stellen wir eine Segmentierungstechnik vor, mit der die Schallemissionsdaten für Teilvolumina der Gesamtstruktur bewertet werden können. Dies basiert auf einer genauen Ortung der Schallemissionssignale unter Verwendung von künstlichen neuronalen Netzen. Diese lokale Vorhersage ermöglicht die Prognose der lokalen Restbelastbarkeit der Struktur als Funktion der angelegten Last und des Versagensortes. Die Ergebnisse der Schallemissionsmessungen werden zusätzlich mit In-situ Kameraaufnahmen während der Tests, Dehnungsmessungen und Post-Mortem Analyse der Druckbehälter verglichen. In allen Fällen wurde eine gute Übereinstimmung zwischen Vorhersage und tatsächlichem Versagensort gefunden.

1. Einführung

Strukturen aus faserverstärkten Materialien sind für ihr hervorragendes Verhältnis von Festigkeit und Steifigkeit zu Gewicht bekannt. Für die Auslegung von sicherheitskritischen Strukturen, wie beispielsweise Drucktanks, bestehen jedoch immer noch Defizite in den verfügbaren Versagenskriterien [1]–[3]. Daher sind experimentelle Methoden zur Detektion des Schädigungsfortschritts bei der Belastung von Druckbehältern ideal geeignet um Auslegungsmethoden zu verfeinern und neue Bauweisen abzusichern.



Eine Methode, die hierfür genutzt werden kann ist die Schallemissionsanalyse. Bei ruckartigen inneren Verschiebungen, wie z. B. während der Rissbildung oder beim Risswachstum, werden elastische Wellen im Ultraschallfrequenzbereich freigesetzt. Diese breiten sich in der Prüfstruktur aus und können von piezoelektrischen Sensorsystemen aufgezeichnet werden. In dünnwandigen Faserverbundwerkstoffen können Schallemissionssignale auch in erheblichem Abstand zur Quelle detektiert werden, sie leiden jedoch unter Dämpfungseffekten und dem Ausbreitungsverhalten geführter Wellen. Abhängig von der Stärke der Quelle und der Distanz ist es möglich, dass die Signalpegel unter den Erfassungsschwellwert des Messsystems fallen. Dieses Konzept ist als Detektionswahrscheinlichkeit (PoD) bekannt und wurde für das Umfeld der Schallemissionsanalyse in [4] basierend auf den Überlegungen von Pollock [5] implementiert. Wie in [6], [7] dargelegt und in Prüfnormen wie DIN EN 15857 beschrieben, werden die Informationen von Schallemissionssignalen durch ihre Ausbreitung erheblich beeinflusst. Zur Kompensation dieser Effekte wurde in [8] eine Methodik vorgeschlagen, welche allerdings einen bekannten Ursprungsort des Signals erfordert. Dieser wird üblicherweise durch Ortungsverfahren ermittelt, was im Falle von Faserverbundwerkstoffen jedoch aufgrund von Anisotropie und Heterogenität neue Ansätze erfordert. Hierzu wurden unter Anderem künstliche neuronale Netzwerke [9] oder Mapping-Techniken [10], [11] vorgeschlagen. Zu weiteren spezifischen Herausforderungen bei Schallemissionsmessungen an faserverstärkten Materialien wird in [12], [13] eine umfassende Einführung in dieses Thema gegeben.

In der Literatur wurden verschiedene Konzepte vorgeschlagen, um das Versagen von faserverstärkten Strukturen auf Basis von Schallemissionssignalen vorherzusagen. Der typische Belastungsverlauf (z. B. nach ASTM E 1067) ist ein stufenweiser Belastungs- / Entlastungszyklus, wie in Abbildung 1 dargestellt.

Bereits 1950 demonstrierte Kaiser an metallischen Werkstoffen, dass Schallemission erst nach Überschreiten des zuvor erreichten Lastniveaus erneut auftritt [14]. Dieses Materialverhalten wird daher als Kaiser-Effekt bezeichnet. Bei faserverstärkten Materialien wurde jedoch 1977 von Fowler beobachtet, dass erneute Schallemission bereits unterhalb des vormaligen Lastniveaus auftreten kann. Seitdem wurde die Bewertung des daraus berechneten Felicity-Verhältnisses zu einem wichtigen Konzept, um den Zustand von faserverstärkten Strukturen zu bewerten. Ein weiteres Kriterium, das Shelby-Verhältnis, wurde später von Downs und Hamstad vorgeschlagen [15]. Es unterscheidet sich vom Felicity-Verhältnis dadurch, dass die Bewertung auf den Signalen basiert, die während der Entlastung der Struktur ermittelt wurden. Weitere solche Kenngrößen, die aus Messungen der Schallemission abgeleitet werden können, sind energetische Verhältnisse. Wie kürzlich in [16] eingeführt, basieren diese auf den in einem Zyklus erreichten akkumulierten Energien im Verhältnis zu der in den vorherigen Zyklen erreichten Energie. Die entsprechenden Verhältnisse beziehen sich ebenfalls auf die zuvor erreichten Lasten. Ähnlich wie beim Felicity-Verhältnis und dem Shelby-Verhältnis können diese Größen unabhängig von den Abmessungen und der Schallemissionsaktivität der Testkomponente berechnet werden.

In der Literatur wurde ebenfalls gezeigt, dass sich Felicity-Verhältnis und Shelby-Verhältnis mit dem Berstdruck von faserverstärkten Drucktanks korrelieren lassen [15], [17], [18]. Basierend auf diesen Beobachtungen haben Waller et al. eine Prognoseroutine vorgeschlagen, in der die gemessenen Felicity-Verhältnisse bis zu einem vorab bestimmten kritischen Felicity-Verhältnis extrapoliert wurden [19]. Dieses Konzept wurde kürzlich erweitert, um durch künstliche neuronale Netzwerke bessere Eingabedaten für die Vorwärtsextrapolation zu erhalten [16]. Danach wurde das Konzept weiter ausgebaut, um eine lokale Vorhersage der Belastung zu erhalten [20].

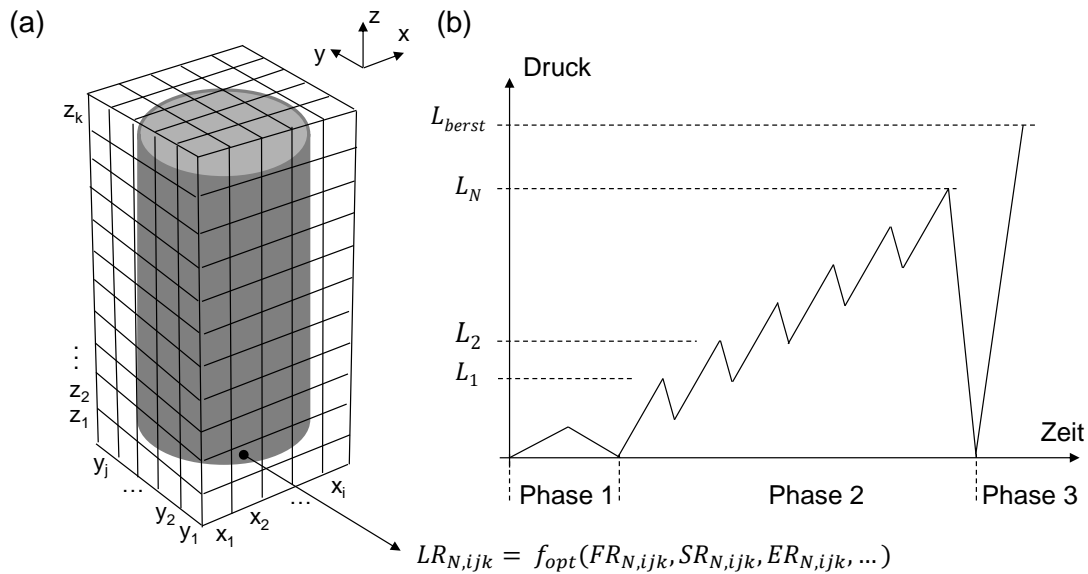


Abb. 1. Schema für die Segmentierung eines 3D-Objekts in lokale Domänen für die Fehlervorhersage (a) und den in diesem Test verwendeten Druckzyklus, um zyklische Testdaten (b) zu erhalten.

2. Algorithmus zur Berstdruckvorhersage

Kürzlich haben wir eine Erweiterung des von Waller et al. [19] und Hill und Walker [21]–[23] vorgeschlagenen Konzeptes ausführlich präsentiert [16]. Dementsprechend wird der gewählte Ansatz hier nur kurz vorgestellt und für eine detailliertere Darstellung auf [16], [20] verwiesen.

Der Algorithmus basiert auf überwachten künstlichen neuronalen Netzwerken. Im ersten Schritt wird eine Testdatenbank erstellt, um die Beziehung zwischen Schallemissionskriterien und der angelegten Belastung zu erschließen. Im zweiten Schritt kann diese Beziehung genutzt werden, um sie auf eine neue Messung anzuwenden. Auf Basis der so ermittelten Belastungen kann denn ebenfalls eine Vorwärtsvorhersage durchgeführt werden.

Für den ersten Schritt (Trainingsphase) sind folgende Punkte erforderlich:

1. Definition der Schallemissionskriterien, die in jedem Zyklus bestimmt werden
2. Auswertung dieser Kriterien während Belastungs- / Entlastungszyklen **bis zum finalen Versagen**
3. Bestimmen einer Beziehung zwischen Schallemissionskriterien und dem Verhältnis von angelegter Belastung zur Versagenslast

Im zweiten Schritt (Anwendungsphase) unterscheiden sich die Punkte geringfügig:

1. Berechnung der Schallemissionskriterien aus Schritt eins während der Belastungs- / Entlastungszyklen **bis zu einem bestimmten Lastniveau**
2. Anwenden der bestimmten Beziehung, um die angelegte Belastung zu prognostizieren
3. Extrapolieren des Belastungsverhältnisses bis zum Wert Eins, wodurch das globale Versagen vorhergesagt wird

2.1 Globale Berstdruckvorhersage

Basierend auf der ASTM E 1067 wird ein stufenweiser Belastungs- / Entlastungszyklus bis zum Bersten des Druckbehälters verwendet. Hierzu wird der Druck monoton erhöht, bis ein bestimmtes Level L_1 erreicht ist. Dann wird der Behälter teilweise entlastet (Abbildung 1-b). Im nächsten "Zyklus" wird der Druck wieder erhöht, bis ein bestimmtes Level L_2 erreicht ist, welches das zuvor erreichte Druckniveau überschreitet. Dieser Vorgang wird N -mal bis zu einem bestimmten maximalen Level L_{max} oder bis zum Bersten des Behälters L_{berst} wiederholt. Daraus ergibt sich das Belastungsverhältnisses LR für den Zyklus N :

$$LR = L_N / L_{berst} \quad (1)$$

Dieses globale Belastungsverhältnis ist identisch mit der globalen Beanspruchung des Behälters (vgl. z.B. Pucks Versagenskriterium [24]), wobei LR^{-1} gerade dem Reservefaktor des Behälters entspricht.

Während der Belastung werden Schallemissionssignale erfasst und können zur Berechnung der Schallemissionskriterien verwendet werden. Gemäß der Definition in [16] werden fünf verschiedene Felicity-Verhältnisse FR_N und drei energetische Kriterien für jeden Zyklus berechnet. Das Felicity-Verhältnis basiert auf dem Ersteinsatz von Schallemission im betrachteten Zyklus $L_{FR,N}$ und bezieht sich rekursiv auf das zuvor erreichte Drucklevel L_{N-1} :

$$FR_N = L_{FR,N} / L_{N-1} \quad (2)$$

Konkret werden insgesamt fünf verschiedene Felicity-Verhältnisse berechnet, welche die Ersteinsätze für die relativen Anteile von 5%, 10%, 15% und 20% der gesamten Signale im ansteigenden Ast des Belastungsprofils verwenden. Diese werden als $FR5$, $FR10$, $FR15$ und $FR20$ bezeichnet. Weiterhin wird das durchschnittliche Felicity-Verhältnis als arithmetischer Mittelwert dieser vier Werte berechnet:

$$\langle FR \rangle = \frac{1}{4}(FR5 + FR10 + FR15 + FR20) \quad (3)$$

Zur Berechnung der energetischen Schallemissionskriterien werden die drei Signalparameter "signal amplitude", "signal energy" und "average-signal-level" verwendet. Deren jeweiliger Ersteinsatz wird als Drucklevel $L_{E,N}$ bestimmt, bei dem die vorher erreichten akkumulierten Werte A_{N-1} übertroffen werden, d.h. beim Erreichen von $A_N \geq 2 \cdot A_{N-1}$. Mit diesen jeweiligen Drucklevels lassen sich die drei Kriterien definieren:

$$ER_N = L_{E,N} / L_{N-1} \quad (4)$$

Für die Trainingsphase wird ein symbolischer Zusammenhang f_{opt} zwischen den fünf Werten FR_N und den drei Werten ER_N , sowie dem angelegten Belastungsverhältnis LR etabliert. Dies wird, wie im Detail in [16] beschrieben, durch ein künstliches neuronales Netzwerk erreicht. In der Anwendungsphase kann f_{opt} dann genutzt werden, um unbekannte LR vorherzusagen:

$$LR_N = f_{opt}(FR_N, ER_N, \dots) \quad (5)$$

Dadurch lässt sich das aktuelle Belastungsverhältnis von Zyklus N basierend auf den Schallemissionskriterien FR_N und ER_N vorhersagen. Zur Vorwärtsextrapolation werden

jedoch mehrere Stützpunkte benötigt. Der ursprüngliche Vorschlag von Waller *et al.* [19] sieht eine lineare Extrapolation vor. Der Schnittpunkt der Gerade mit $LR = 1$ kann dann zur Prognose des globalen Berstdrucks verwendet werden.

2.2 Lokale Berstdruckvorhersage

Die Beschreibung in Abschnitt 2.1 nimmt an, dass alle aufgezeichneten Schallemissionssignale zur Berechnung der LR -Werte verwendet werden. Bei größeren Testobjekten ist es jedoch möglich, diesen globalen Ansatz auch auf eine lokale Berechnung der LR -Werte zu erweitern. Für geortete Schallemissionsquellen ist es möglich, den globalen Schallemissionsdatensatz basierend auf der bekannten (xyz)-Position zu segmentieren. Wie in Abbildung 1-a zu sehen ist, wurde in [20] ein einfacher volumetrischer Diskretisierungsansatz verwendet. Das quaderförmige Volumen, das die untersuchte Teststruktur umschließt, ist in Teilvolumina unterteilt. Unter Bezugnahme auf das Koordinatensystem von Abbildung 1 werden dabei i Unterteilungen entlang der x-Achse, j Unterteilungen entlang der y-Achse und k Unterteilungen entlang der z-Achse verwendet. Durch die Beschränkung der Schallemissionssignale auf die Teilmenge der Signale mit Quellkoordinaten, die in das Teilvolumen ijk fallen, kann die Gleichung (5) damit lokal angewendet werden:

$$LR_{N,ijk} = f_{opt}(FR_{N,ijk}, ER_{N,ijk}, \dots) \quad (6)$$

Die Anwendung von Gleichung (6) für jeden Zyklus und jedes Teilvolumen $x = 1, \dots, i$, $y = 1, \dots, j$ und $z = 1, \dots, k$ erlaubt daher örtlich aufgelöste LR -Werte zu bestimmen.

3. Versuchsreihen

Für die Trainingsphase wurden in einem Testprogramm unter Verwendung von Zugprüfkörpern, Mode-I und Mode-II Prüfkörpern, Zugscherprüfkörpern und skalierten 4-Punkt-Biegeproben eine umfangreiche Referenzdatenbank für das Training des künstlichen neuronalen Netzwerks geschaffen. Dieses ist als mehrschichtiges neuronales Netzwerk mit zwei verborgenen Schichten und je zwanzig Neuronen in MATLAB aufgesetzt, um die Funktionsapproximation f_{opt} mittels eines Levenberg-Marquardt-Algorithmus durchzuführen. Details zur Übertragbarkeit auf größere Strukturen und die konkrete Vorgehensweise finden sich in [16], [20].

3.1 Kleine Druckbehälter

Zunächst wurde der Ansatz für Druckbehälter mit einer Länge von 560 mm und einem Durchmesser von 151 mm angewendet, was in etwa zwei- bis dreimal so groß ist wie die in der Referenzdatenbank enthaltenen Proben. Alle Druckbehälter sind aus dem gleichen Material hergestellt, welches auch für die Referenzdatenbank verwendet wurde. Die drei getesteten Druckbehälter werden als SPV-1, SPV-2 und SPV-3 bezeichnet.

Die Positionierung der Schallemissionssensoren basiert auf einer Studie der Detektionswahrscheinlichkeit unter Verwendung der Dämpfungscharakteristik des Druckbehälters [4]. Im vorliegenden Fall wurde mit den ausgewählten 11 Sensorpositionen eine Abdeckung mit $PoD \geq 96\%$ erreicht. Alle Einstellungen zur Aufzeichnung der Schallemission entsprechen den Einstellungen der Referenzdatenbank, mit Ausnahme der Trigger-Einstellungen, für die 20/80/1500 μs (Peak-Definition-Time / Hit-Definition-Time / Hit-Lockout-Time) gewählt wurde. Basierend auf dem Konzept aus [9] wurden die

Schallquellen mit einer berechneten Genauigkeit von ≤ 36 mm geortet. Bei der Berstdruckvorhersage werden nur geortete Schallquellen berücksichtigt. Wie in Abbildung 2 dargestellt, konnte für alle drei Fälle eine Extrapolation des Berstdrucks auf Basis der vorhergesagten Belastungsverhältnisse im Rahmen der Prognoseunsicherheit erreicht werden. Die Extrapolation erfolgte auf Basis der aufgezeichneten Daten $< 0.80 LR$, wie in Abbildung 2 dargestellt.

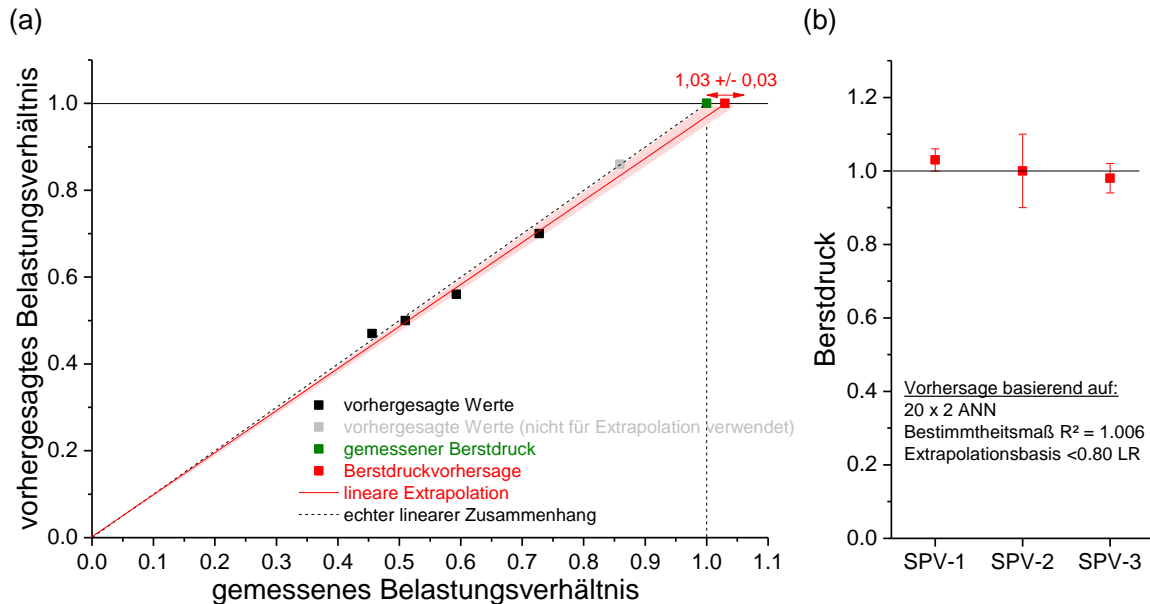


Abb. 2. Beispiel für die Vorwärtsextrapolation der vorhergesagten Belastungsverhältnisse für SPV-3 (a) und Zusammenfassung der globalen Berstdruckvorhersage für SPV-1, SPV-2 und SPV-3 normiert auf Eins für bessere Vergleichbarkeit (b).

3.2 Große Druckbehälter

Weiterhin wurden zwei Druckbehälter mit einer Länge von 2600 mm und 890 mm Durchmesser untersucht. Diese werden als LPV-1 und LPV-2 bezeichnet. Insgesamt wurden die Behälter mit 28 Schallemissionssensoren überwacht, was in einer PoD $\geq 67\%$ resultiert. Alle Aufzeichnungseinstellungen entsprechen weiterhin den Einstellungen der Referenzdatenbank, mit Ausnahme der Trigger-Einstellungen, die als 20/80/1500 μs (Peak-Definition-Time / Hit-Definition-Time / Hit-Lockout-Time) gewählt werden, um die längeren Laufwege der Signale zu berücksichtigen. Die Quellortung wurde mit einer mittleren Genauigkeit von ≤ 73 mm (LPV-1) und ≤ 104 mm (LPV-2) durchgeführt. Für die Berstdruckvorhersage werden ebenfalls nur geortete Schallemissionsquellen und entfernungskorrigierte Merkmale gemäß dem Ansatz von [8] berücksichtigt.

Ein Beispielergebnis der lokalen Schadensvorhersage ist hierzu in Abb. 3 dargestellt. Mit zunehmender Zyklenzahl zeichnen sich deutlich die Bereiche höchster Belastung ab. Das Versagen des Behälters findet letztlich am unteren Dom statt, was durch eine Hochgeschwindigkeitsaufnahme des Berstvorgangs bestätigt werden konnte (s. Bilder in Abb. 3 rechts). Der tatsächliche Berstdruck wurde mit einer Genauigkeit von $97,6 \pm 0,6 \%$ vorhergesagt.

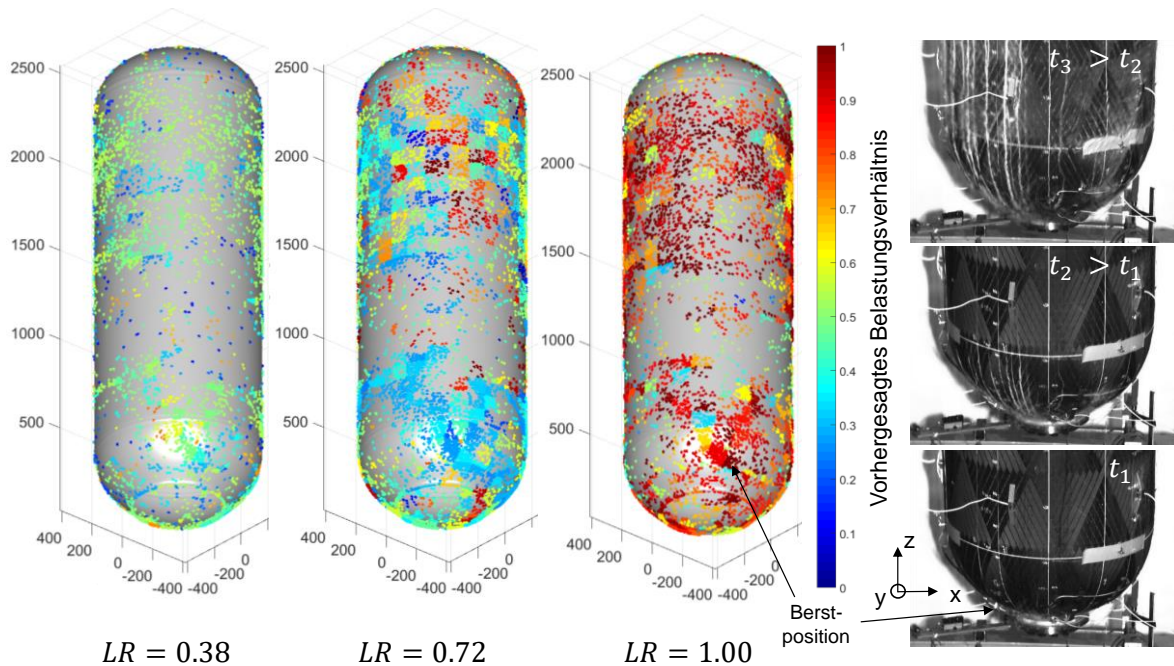


Abb. 3. Beispiel für die lokale Vorhersage des Belastungsverhältnisses für LPV-1, dargestellt in drei aufsteigenden Lastzyklen. Ebenso dargestellt sind drei Bilder einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme beim Berstvorgang, was erlaubt, die Position des Berstens zu identifizieren.

4. Zusammenfassung

Es wurde ein Ansatz vorgestellt, welcher den globalen Belastungszustand von faserverstärkten Druckbehältern mittels der aufgezeichneten Schallemissionssignale prognostizieren kann. In Kombination mit Ortungsinformationen ist es ebenso möglich, eine Vorhersage der lokalen Belastungsverhältnisse für jeden Lastzyklus durchzuführen. Die Visualisierung der höchstbeanspruchten Stellen bietet dazu eine einzigartige Möglichkeit zum quantitativen Abgleich mit numerischen Analysetechniken wie der Finite-Elemente-Modellierung.

Danksagung

Wir bedanken uns bei der European Space Agency ESA für die Finanzierung des Entwicklungsprojekts „P120C 2nd Production Line Step 1a Technology Demonstration“ innerhalb dessen die präsentierten Ergebnisse erzielt wurden.

Referenzen

- [1] A. S. Kaddour and M. J. M. J. Hinton, “Maturity of 3D failure criteria for fibre-reinforced composites: Comparison between theories and experiments: Part B of WWFE-II,” *J. Compos. Mater.*, vol. 47, no. 6–7, pp. 925–966, 2013.
- [2] P. D. Soden, a. S. Kaddour, and M. J. Hinton, “Recommendations for designers and researchers resulting from the world-wide failure exercise,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 64, no. 3–4, pp. 589–604, 2004.
- [3] A. S. Kaddour, M. J. Hinton, and P. D. Soden, “A comparison of the predictive capabilities of current failure theories for composite laminates: Additional contributions,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 64, no. 3–4, pp. 449–476, 2004.
- [4] M. G. R. Sause, F. F. Linscheid, and M. Wiehler, “An Experimentally Accessible Probability of Detection Model for Acoustic Emission Measurements,” *J. Nondestruct. Eval.*, vol. 37, no. 2, p. 17, Jun. 2018.

- [5] A. Pollock, "Probability of Detection for Acoustic Emission," vol. 25, pp. 167–172, 2007.
- [6] S. K. Al-Jumaili, K. M. Holford, M. J. Eaton, and R. Pullin, "Parameter Correction Technique (PCT): A novel method for acoustic emission characterisation in large-scale composites," *Compos. Part B Eng.*, vol. 75, pp. 336–344, Jun. 2015.
- [7] E. Maillat, N. Godin, M. R. Mili, P. Reynaud, and G. Fantozzi, "Lifetime prediction with acoustic emission during static fatigue tests on ceramic matrix composite at intermediate temperature under air," no. June, pp. 22–26, 2014.
- [8] S. K. Al-Jumaili, K. M. Holford, M. J. Eaton, and R. Pullin, "Parameter Correction Technique (PCT): A novel method for acoustic emission characterisation in large-scale composites," *Compos. Part B Eng.*, vol. 75, pp. 336–344, Jun. 2015.
- [9] S. Kalafat and M. G. R. G. R. Sause, "Acoustic emission source localization by artificial neural networks," *Struct. Heal. Monit.*, vol. 14, no. 6, pp. 633–647, Nov. 2015.
- [10] S. K. Al-Jumaili, M. R. Pearson, K. M. Holford, M. J. Eaton, and R. Pullin, "Acoustic emission source location in complex structures using full automatic delta T mapping technique," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 72–73, pp. 513–524, May 2016.
- [11] M. J. Eaton, R. Pullin, and K. M. Holford, "Acoustic emission source location in composite materials using Delta T Mapping," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 43, no. 6, pp. 856–863, Jun. 2012.
- [12] M. G. R. Sause, "Acoustic Emission," in *Springer Series in Materials Science*, vol. 242, 2016, pp. 131–359.
- [13] M. Sause and M. Hamstad, "Acoustic Emission Analysis," in *Comprehensive Composite Materials II*, P. W. R. Beaumont and C. H. Zweben, Eds. Oxford: Elsevier, 2018, pp. 291–326.
- [14] J. Kaiser, "Untersuchungen über das Auftreten von Geräuschen beim Zugversuch," Dissertation, Technische Hochschule München, 1950.
- [15] K. S. Downs and M. A. Hamstad, "Acoustic Emission from Depressurization to Detect/Evaluate Significance of Impact Damage to Graphite/Epoxy Pressure Vessels," *J. Compos. Mater.*, vol. 32, no. 3, pp. 258–307, Feb. 1998.
- [16] M. G. R. Sause, S. Schmitt, and S. Kalafat, "Failure load prediction for fiber-reinforced composites based on acoustic emission," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 164, pp. 24–33, Aug. 2018.
- [17] K. S. Downs and M. A. Hamstad, "Correlation of Acoustic Emission Felicity Ratios and Hold-Based Rate Moments with Burst Strengths of Spherical Graphite/Epoxy Pressure Vessels," *J. Acoust. Emiss.*, vol. 13, no. 3/4, pp. 45–56, 1995.
- [18] T. J. Fowler, "Revisions to the CARP Recommended Practice for Tanks and Vessels," in *Proceedings of the Fifth International Symposium on Acoustic Emission From Composite Material - AECM-5*, 1995, pp. 263–271.
- [19] J. M. Waller, C. T. Nichols, D. J. Wentzel, R. L. Saulsberry, D. O. Thompson, and D. E. Chimenti, "Use of Modal Acoustic Emission to Monitor Damage Progression in Carbon Fiber/Epoxy Composites," in *AIP Conference Proceedings*, 2011, vol. 1335, pp. 919–926.
- [20] M. G. R. Sause, S. Schmitt, B. Hoeck, and A. Monden, "Acoustic emission based prediction of local stress exposure," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 173, pp. 90–98, Mar. 2019.
- [21] E. K. Hill, S. T. Dion, J. O. Karl, N. S. Spivey, and J. L. W. Ii, "Neural Network Burst Pressure Prediction in Composite Overwrapped Pressure Vessels," *Neural Networks*, vol. 25, pp. 187–193, 2007.
- [22] J. L. Walker and E. V. K. Hill, "Backpropagation neural networks for predicting ultimate strengths of unidirectional graphite/epoxy tensile specimens," *Adv. Perform. Mater.*, vol. 3, no. 1, pp. 75–83, Jan. 1996.
- [23] J. L. Walker, G. L. Workman, S. S. Russell, and E. V. K. Hill, "Neural network/acoustic emission burst pressure prediction for impact damaged composite pressure vessels," *Mater. Eval.*, vol. 55, no. 8, Aug. 1997.
- [24] H. M. Deuschle and A. Puck, "Application of the Puck failure theory for fibre-reinforced composites under three-dimensional stress: Comparison with experimental results," *J. Compos. Mater.*, vol. 47, no. 6–7, pp. 827–846, Mar. 2013.