

Georg W. Mair

Sicherheitsbewertung von Composite- Druckgasbehältern

Potential statistischer Methoden jenseits
aktueller Vorschriften



 Springer Vieweg

Sicherheitsbewertung von Composite-Druckgasbehältern

Georg W. Mair

Sicherheitsbewertung von Composite- Druckgasbehältern

Potential statistischer Methoden
jenseits aktueller Vorschriften

Georg W. Mair
Großbeeren
Deutschland

ISBN 978-3-662-48131-8
DOI 10.1007/978-3-662-48132-5

ISBN 978-3-662-48132-5 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften. Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Berlin Heidelberg ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
(www.springer.com)

*Es gibt keine Sicherheit, nur verschiedene Grade
der Unsicherheit.*

(Anton Pawlowitsch Tschechow)

Vorwort

Dieses Buch beschreibt eines der Themen, die sich wie ein roter Faden durch die vergangenen 25 Jahren meiner Arbeit mit Druckbehältern ziehen: Die probabilistische Betrachtung der Sicherheit von Gasbehältern aus Faserverbundwerkstoffen. Dieser rote Faden war immer geprägt von dem engen und kreislaufartigen Zusammenwirken dreier Perspektiven: Der praktischen Anwendung von Vorschriften, den in der Anwendung erkannten Defiziten mit der daraus abgeleiteten umfangreichen Forschung und den wiederum aus der Forschung resultierenden Änderungen des Rechts.

Die praktische Anwendung von Vorschriften ist fester Bestandteil meiner Arbeit an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), die auf dem Gebiet der Transportbehälter für Gase zuständige Behörde ist. Diese Arbeit führt immer wieder zu überraschenden Prüfphänomenen, die als Schwächen eines Baumusters oder manchmal auch der Prüf- und Zulassungsvorschriften interpretiert werden müssen. Die Suche nach dem Ausgleich dieser Schwächen ist wiederum klassischer Bestandteil der Forschung, in deren Rahmen ich immer wieder die Ergebnisse in Form von Vorschlägen zur Vorschriftenänderungen formulieren und diese im Nachgang zur Forschung in der internationalen Harmonisierung von technischer Norm und Recht regelmäßig begleiten darf. Mit der Anwendung einer so überarbeiteten Vorschrift schließt sich der Kreis, um in die nächste Runde der praktischen Erfahrung zu gehen.

Im Rahmen dieser Zyklen der Vorschriftenverbesserung ging es thematisch immer wieder auch darum, wie Vorschriften zu ändern wären, um Zukunft zu gestalten. Hierzu gehören die Methoden, nach denen Prüffristen festzulegen sind, die Überwachung der Lebensdauer zu erfolgen hat oder ob mithilfe alternativer Sicherheitsnachweise neue, effizientere Speicherkonzepte zugelassen werden könnten. In den letzten 10 Jahren entwickelte sich aus Gedanken zur Lösung dieser Fragen – im Kontext der speziellen Anwendung auf Druckgefäße aus Verbundwerkstoffen im Gefahrguttransport – ein Ansatz mit neuen Prozeduren zur Prüfung und Sicherheitsbewertung von Speichern und Druckgefäßen aus Verbundwerkstoffen. Diese Prozeduren erlauben es, die Sicherheit eines Baumusters nahezu unabhängig von den im geltenden Recht vorgeschriebenen Werkzeugen und damit auch jenseits dieser Vorschriften zu beurteilen. Damit werden neue Bereiche der Baumusteroptimierung und Gestaltungsfreiheit eröffnet. Gleichzeitig werden aber auch manche Eigenschaften heute möglicher Auslegungen in Frage gestellt.

Abb. 1 Logo zum Probabilistischen Ansatz (PA)



Das resultierende Verfahren bietet die Möglichkeit zur Optimierung bzgl. Gewicht und Kosten auf jedem vom Gesetzgeber in entsprechender Form geforderten Sicherheitsniveau.

Deterministische und insbesondere probabilistische Verfahren zur Prüfung und Bewertung der Sicherheit müssen unabhängig vom Baumuster anwendbar sein. Im Fall der Zulassung muss ein Baumuster auch mit wenig Wissen über die Auslegung beurteilbar sein. In der Konsequenz sind die klassischen Fachthemen der Verbundwerkstoffe, die einer Auslegung oder Optimierung zugrunde liegen, wie die Werkzeuge der Spannungsanalyse, Festigkeitshypothesen oder die Kunst der Fertigung von Druckbehältern nicht Gegenstand der Ausführungen in diesem Buch.

Die Erläuterungen folgen dem Ziel, ein probabilistisches Konzept mit einem Einblick in die relevanten Grundlagen für die Weiterentwicklung im Recht anzubieten. Das Ergebnis ist eine systematische Darstellung von Arbeits- und Analyseschritten, die unabdingbar für die Betrachtung der Festigkeitseigenschaften im probabilistischen Sinne sind. Intention und Wirkung dieser Schritte sind überwiegend phänomenologisch anhand einer Auswahl eigener Prüf- und Forschungsergebnisse dargelegt. Zur Kenntlichmachung für Beiträge zu diesem Konzept ist bereits vor Jahren die Idee für ein „Logo“ (Abb. 1) entstanden, das seit 2014 durch mein Team international Verwendung findet.

Das Buch soll dazu dienen, die wesentlichen Elemente eines probabilistischen Zulassungsansatzes und ihre Interaktion darzustellen. Damit Interessierte dem Ziel effizient folgen können, wird darauf verzichtet, die essentiellen Themen weiter zu vertiefen als dies für das Verständnis des Ansatzes als Ganzes erforderlich ist. Dies gilt insbesondere für einige Detailspekte der Statistik und der Mikromechanik, die der zitierten Literatur folgend, individuell vertieft werden können.

Auch wenn der Anspruch besteht, alles Sinnvolle zu bedenken, so ist dies kaum zu leisten und noch schwerer ist es, dies lesbar auszudrücken. Es gibt noch eine Reihe von Fragen, deren Beantwortung in der Zukunft einen solchen Ansatz besser und effizienter machen wird. Hierzu gehört ein verbessertes Verständnis zum statistischen Langzeitverhalten der Verbundwerkstoffe, von der Bauteilebene bis hinein in mikromechanische Modelle. Dazu gehören auch die verbesserte Anwendbarkeit zerstörungsfreier Prüfverfahren und eine auf Druckbehälter aus Verbundwerkstoffen abgestimmte Validierung der umfangreichen Auswahl statistischer Werkzeuge.

Mit Blick auf den Rahmen, in dem und für den die dargelegten Erkenntnisse gesammelt und bewertet wurden, gehe ich davon aus, dass dieses Buch die Einführung von Wasser-

stoff als potenziell CO₂-neutralen und universell einsetzbaren Energieträger unterstützen wird. Denn gerade in diesem Bereich erfolgt die Suche nach gewichts- und kostengünstigen, aber insbesondere sicheren Gasspeichern mit hoher Intensität. Hierbei ist aus Sicht des Autors ein essentieller Grundsatz unbedingt zu berücksichtigen, der für die erfolgreiche Einführung neuer technischer Anwendungen eine besondere Bedeutung hat:

Für die Attraktivität und Akzeptanz einer Technologie ist im Zweifelsfall die Sicherheit höher zu bewerten als die Wirtschaftlichkeit.

Danksagung

Im Grunde sind wir alle kollektive Wesen selbst das größte Genie würde nicht weit kommen, wenn es alles seinem eigenen Inneren verdanken würde. (J. W. v. Goethe)

Gerade mit Blick auf die Komplexität des Themas bin ich all denen dankbar, die mich in den letzten 25 Jahren bei der Prüfung von Composite-Druckgefäßen und –speichern, auf der Suche nach dem Verstehen ihrer Eigenschaften und deren statistischer Betrachtung begleitet haben.

Dies waren zunächst die Mitarbeiter des Instituts für Luft- und Raumfahrt der TU Berlin und zahlreiche Studenten mit ihren Abschlussarbeiten. Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Johannes Wiedemann († 2004), der mich lehrte, ein analytisch geprägtes Verständnis von Verbundwerkstoffen zu entwickeln und die graphische Analyse zum Erkennen komplexer Zusammenhänge zu verwenden.

Jeder meiner ehemaligen und aktuellen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter im Bereich „Druckgefäße“ an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung hat seinen Teil zum hier dargestellten Inhalt beigetragen. Nicht nur die Wissenschaftler, insbesondere auch diejenigen, die meine Ideen in der Prüfpraxis umzusetzen oder zur Bewertung von Ergebnissen anzuwenden hatten und haben, haben einen großen Anteil an der Entwicklung einer umfassenden Idee.

Dies sind: Dr.-Ing. Stefan Anders, Dr.-Ing. Ben Becker, Dipl.-Ing. Eric Duffner (FH), Dipl.-Ing. Christian Gregor, Dipl.-Ing. Martin Hoffmann, M. Eng. André Klauke, Dipl.-Ing. Markus Lau, Dipl.-Ing. Stephan Lenz (FH), Heinz Macziewski, Dipl.-Ing. (FH) Hans-Jörg Müller, Dipl.-Ing. (FH) Andreas Neudecker, Dr.-Ing. Pavel Novak, Dr.-Ing. Pascal Pöschko, Dipl.-Wirt.-Ing. (FH) Herbert Saul, Dr.-Ing. Florian Scherer, Dipl.-Ing. Irene Scholz, Dipl.-Ing. (FH) André Schoppa, M. Eng. Thorsten Schönfelder, Dr.-Ing. Jost Sonnenberg, Dipl.-Ing. (FH) Manfred Spode, Dr.-Ing. Michael Schulz und Dipl.-Ing. (FH) Mariusz Szczepaniak. Nicht unerwähnt lassen möchte ich meinen ehemaligen Kollegen Herrn Dr. habil. Jürgen Bohse, der mein Verständnis für Verbundwerkstoffe durch seine Interpretation von Ergebnissen aus der Schallemissionsanalyse wesentlich geprägt hat.

Auch möchte ich es nicht versäumen, mich bei der Leitung der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung BAM und meinen Vorgesetzten zu bedanken, die vor 15 Jahren mit einer weitsichtigen Investmententscheidung, die Voraussetzungen für die Er-

arbeitung der hier dargestellten, umfangreichen Prüfergebnisse geschaffen und über die Zeit begleitet haben.

Nicht zuletzt sei denjenigen gedankt, die sich auf deutscher und insbesondere auf europäischer Ebene als Forschungsmittelgeber und als Forschungspartner dem Thema im Rahmen der Vorhaben StorHy (6. Forschungsrahmenprogramm der EU „FP6“), INGAS (FP 7), HyComp (FP7), HyCube (EU „KIC InnoEnergy“), „Langzeitverhalten Composite-Druckgefäße“ (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur BMVI) und CryoCode (Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie NOW) unterstützend angenommen haben. Unentbehrlich für dieses Buch waren diejenigen, die durch kritische Diskussionsbeiträge zur Weiterentwicklung und Schärfung der hier dargestellten Inhalte beigetragen haben.

Der größte Dank gebührt aber meiner Frau und meinen Kindern, die Jahren viel Geduld mit mir haben und insbesondere im letzten Jahr der Manuskripterstellung hatten. Sie geben mir den Freiraum, der notwendig ist, um über viele Jahre konsequent und engagiert an einem Thema zu bleiben und so das vorliegende Buch entstehen zu lassen.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|----|
| 1 Einführung | 1 |
| 1.1 Historische Entwicklung der Druckgasspeicher | 5 |
| 1.2 Bedeutung des minimalen Berstdrucks für die Betriebsfestigkeit | 8 |
| 1.3 Die Lastwechsel-Empfindlichkeit | 9 |
| 1.4 Die Restfestigkeit | 11 |
| 1.5 Die langsame Berstprüfung | 12 |
| 1.6 Der probabilistische Ansatz | 13 |
| Literatur | 14 |
| 2 Prozeduren für die hydraulische Stichprobenprüfung | 17 |
| 2.1 Anforderungen zur Verbesserung der Reproduzierbarkeit | 18 |
| 2.1.1 Reproduzierbarkeit der Lastwechselprüfung | 18 |
| 2.1.2 Reproduzierbarkeit der Berstprüfung | 27 |
| 2.2 Der Einfluss der Zeit auf die Ergebnisse quasi-statischer Prüfungen bis zum Versagen | 29 |
| 2.2.1 Berstprüfung von Composite-Cylindern | 29 |
| 2.2.2 Zeitstandsprüfung von Composite-Cylindern | 32 |
| 2.3 Die langsame Berstprüfung (SBT) | 35 |
| 2.3.1 Der Weg zum Konzept der langsamen Berstprüfung (SBT) | 36 |
| 2.3.2 Erfahrungen mit der langsamen Berstprüfung (SBT) | 39 |
| 2.4 Detaillierte Empfehlungen für eine SBT-Prüfprozedur | 50 |
| 2.4.1 Zusammensetzung der Stichprobe | 50 |
| 2.4.2 Prüfparameter | 50 |
| 2.4.3 Prüfprozedur | 51 |
| 2.4.4 Der SBT mit schrittweisem Druckaufbau | 53 |
| Literatur | 55 |
| 3 Statistische Bewertung der Stichprobenprüfergebnisse | 59 |
| 3.1 Einführung des „Stichproben-Arbeitsdiagramms“ | 60 |
| 3.1.1 Das Arbeitsdiagramm für die Berstfestigkeit von Stichproben ... | 64 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 3.1.2 | Das Arbeitsdiagramm für die Zeitstandsfestigkeit von Stichproben | 67 |
| 3.1.3 | Das Arbeitsdiagramm für die Lastwechselfestigkeit von Stichproben | 68 |
| 3.2 | Statistische Auswertung der Stichprobenprüfergebnisse | 72 |
| 3.2.1 | Ergebnisse der Berstprüfung und der langsamen Berstprüfung ... | 72 |
| 3.2.2 | Ergebnisse der Lastwechselprüfung | 77 |
| 3.3 | Ermittlung der Überlebenswahrscheinlichkeit einer Stichprobe | 84 |
| 3.3.1 | Die Überlebenswahrscheinlichkeit im Kontext der Berstprüfung und der langsamen Berstprüfung | 85 |
| 3.3.2 | Die Überlebenswahrscheinlichkeit im Kontext der Lastwechselprüfung | 89 |
| 3.4 | Übertragung der Stichprobenergebnisse auf eine Population von Composite-Cylindern | 95 |
| 3.4.1 | Konfidenzniveau und Konfidenzintervall | 96 |
| 3.4.2 | Stichprobenbewertung im Arbeitsdiagramm für die Berstfestigkeit (lineare Achsenskalierung) | 107 |
| 3.4.3 | Stichprobenbewertung im Arbeitsdiagramm für die Lastwechselfestigkeit (logarithmische Achsenskalierung) | 111 |
| 3.5 | Aspekte der praktischen Verwendung | 113 |
| 3.5.1 | Einfluss der Gase-Eigenschaften | 114 |
| 3.5.2 | Aspekte unfallbedingter Lasten | 120 |
| | Literatur | 132 |
| 4 | Degradation und Bewertung der sicheren Betriebsdauer | 135 |
| 4.1 | Aspekte der baumusterspezifischen Degradation | 137 |
| 4.1.1 | Grundsätzliche Betrachtungen zum primären Versagen von Composite-Cylindern | 141 |
| 4.1.2 | Klassifizierung der Baumuster nach dem Kriterium der Lastwechselempfindlichkeit | 143 |
| 4.1.3 | Beurteilung des Leck-vor-Bruch-Verhalten | 146 |
| 4.1.4 | Festigkeit am Ende der Produktion „Begin des Lebens“ | 148 |
| 4.2 | Erfahrungen mit der künstlichen Alterung | 150 |
| 4.2.1 | Prüfung auf Restfestigkeit am Ende der künstlichen Degradation | 151 |
| 4.2.2 | Künstliche Alterung durch hydraulisches Lastwechseln | 152 |
| 4.2.3 | Künstliche Alterung durch konstanten Innendruck bei erhöhter Temperatur | 155 |
| 4.2.4 | Künstliche Alterung durch Druckzyklieren mit Gas | 157 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.3 | Erfahrungen mit der betrieblichen Degradation | 164 |
| 4.3.1 | Ergebnisse der Restfestigkeitsprüfung mittels hydraulischer Lastwechsel | 165 |
| 4.3.2 | Ergebnisse der Restfestigkeitsprüfung mittels langsamen Berstens | 171 |
| 4.4 | Abschätzung der Degradation bis zum Ende der sicheren Betriebslebensdauer | 177 |
| 4.4.1 | Degradation der Überlebenswahrscheinlichkeit | 177 |
| 4.4.2 | Extrapolation der Prüfergebnisse aus der betrieblichen Alterung | 183 |
| 4.4.3 | Interpolation der Prüfergebnisse aus der künstlichen Alterung ... | 189 |
| 4.5 | Abschätzung des Betriebsendes auf Basis der künstlichen Alterung in Kombination mit betriebsbegleitenden Prüfungen | 193 |
| 4.5.1 | Untersuchungen am Baumuster im Neuzustand | 194 |
| 4.5.2 | Betriebsbegleitende Untersuchungen | 196 |
| 4.6 | Produktionsqualität und ihr Einfluss auf die Lebensdauer | 198 |
| 4.6.1 | Interpretation der Degradation | 200 |
| 4.6.2 | Composite-Cylinders ohne mittragendem Liner | 202 |
| 4.6.3 | Composite-Cylinders mit metallischem Liner | 204 |
| 4.6.4 | Erkennen von Herstellungsfehlern mittels zerstörungsfreier Prüfung | 206 |
| | Literatur | 209 |
| 5 | Der Probabilistische Zulassungsansatz (PAA) | 213 |
| 5.1 | Das akzeptierte Risiko – basierend auf Konsequenz und Versagenswahrscheinlichkeit | 215 |
| 5.1.1 | Die Abwägung von Risiko und Chance | 216 |
| 5.1.2 | Diskussion von Konsequenz und Versagenswahrscheinlichkeit an Beispielen | 224 |
| 5.2 | Vergleich des probabilistischen Ansatzes mit deterministischen Anforderungen | 234 |
| 5.2.1 | Statistische Interpretation deterministischer Anforderungen | 234 |
| 5.2.2 | Prinzipien der statistischen Bewertung von Mindestanforderungen | 242 |
| 5.2.3 | Bewertung der Mindestanforderungen in den Regelwerken nach dem Kriterium der Zuverlässigkeit | 246 |
| 5.2.4 | Einfluss der Stichprobe bei der Betrachtung der Festigkeit in der (langsamen) Berstprüfung | 251 |
| 5.2.5 | Einfluss der Stichprobe bei der Betrachtung der Festigkeit in der Lastwechsellprüfung | 255 |

| | | |
|----------------------------------|---|-----|
| 5.3 | Entwicklungspotential eines probabilistischen Zulassungsansatzes | 259 |
| 5.3.1 | Schwachstellen und Unsicherheiten des PAA | 260 |
| 5.3.2 | Kostensenkung durch Anwendung des probabilistischen Zulassungsansatzes | 268 |
| 5.3.3 | Grundlegende Anforderungen für die Einführung des probabilistischen Zulassungsansatzes | 270 |
| Literatur | | 274 |
| Nachwort | | 279 |
| Begriffe und Definitionen | | 281 |
| Sachverzeichnis | | 301 |

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen

| | |
|-----------|---|
| Al | Aluminium |
| AMD | künstlich eingebrachte Fertigungsabweichung (artificial manufacturing defect) |
| BoL | Anfang des Betriebes/erstmaliges Inverkehrbringen |
| BT | Berstprüfung (burst test) |
| CC | Composite-Cylinder (Gasflasche aus Kompositwerkstoff) |
| CF | Carbonfaser (Kohlenstofffaser) |
| CFK | Carbonfaser-verstärkter Kunststoff (CF in Kunststoffbettung) |
| cyfas | lastwechsel-empfindlich (cycle fatigues sensitive) |
| EoL | Ende der geplanten Lebensdauer |
| F | Eintrittshäufigkeit F (frequency of occurrence) |
| FC | Füllzyklus (filling cycle) |
| FR | Ausfallwahrscheinlichkeit (failure rate) |
| GFK | Glasfaser-verstärkter Kunststoff |
| LBB | Leck-vor-Bruchverhalten (leak before break) |
| LCT | Lastwechselprüfung (load cycle test) |
| LW | Lastwechsel (load cycle LC) |
| MF | Fertigungsfehler (manufacturing defect) |
| ND | (GAUSSsche) Normalverteilung |
| non-cyfas | lastwechsel-unempfindlich (non-cycle fatigue sensitive) |
| PA | Probabilistischer Ansatz |
| PAA | Probabilistischer Zulassungsansatz (probabilistic approval approach) |
| PRD | Druckentlastungseinrichtung (meist integral im Absperrventil) |
| SBT | langsame Berstprüfung |
| SPC | Arbeitsdiagramm für Stichprobenprobeneigenschaften (sample performance chart) |
| SR | Überlebenswahrscheinlichkeit (survival rate) |
| SV | statistische Verteilungsfunktion |
| TDG | Transport gefährlicher Güter (transport of dangerous goods) |