

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](http://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 CO<sub>2</sub>-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

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	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
<b>2</b>	<b>Prozeduren für die hydraulische Stichprobenprüfung</b>	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
<b>3</b>	<b>Statistische Bewertung der Stichprobenprüfergebnisse</b>	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
<b>4</b>	<b>Degradation und Bewertung der sicheren Betriebsdauer .....</b>	<b>135</b>
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
<b>5</b>	<b>Der Probabilistische Zulassungsansatz (PAA) .....</b>	<b>213</b>
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
<b>Nachwort</b>	. . . . .	279
<b>Begriffe und Definitionen</b>	. . . . .	281
<b>Sachverzeichnis</b>	. . . . .	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)

TPRD	thermisch aktiviertes PRD
UTS	Anfangsfestigkeit (ultimate strength)
WCC	Worst case corner
WD	WEIBULL-Verteilung

---

## Symbole mit Einheiten

b	Formparameter der WEIBULL-Verteilung [-]
i	laufende Nummer der Prüfmuster einer Stichprobe [-]
$k_{50\%}$	Korrekturfaktor für die Berechnung des Konfidenzintervalls für den Mittelwert [-]
$k_s$	Korrekturfaktor für die Berechnung des Konfidenzintervalls für die Standardabweichung [-]
m	Mittelwert der Ergebnisse einer Stichprobenprüfung
$m_{\log N}$	Mittelwert der logarithmierten Werte einer Stichprobe; Lastwechselprüfung [-]
n	Stichprobenumfang (Anzahl der Prüfmuster einer Loses) [-]
p	Innendruck in einem Prüfmuster [MPa]*
$\dot{p}$	Druckanstiegsrate ( $\Delta p/\Delta t$ ) [MPa/min]*
$\pm \Delta p$	akzeptierte Abweichung von der idealen Soll-Druckkurve [MPa]*
$\Delta p_d$	Druckabweichung während einer Druckstufe von der idealen Soll-Druckkurve [MPa]*
$\Delta p_s$	(Druck-) Höhe jeder einer Druckstufe [MPa]* <i>*in manchen Fällen wird [bar] gefordert, da es international für die Kennzeichnungen von CCn verwendet wird</i>
$p_{10\%}$	Berstfestigkeit (-druck) bei SR von 10% der Stichprobe [MPa]
$p_{50\%}$	Mittelwert und Median des Berstdrucks einer Stichprobe [MPa]
$p_{90\%}$	Berstfestigkeit (-druck) bei SR von 90% der Stichprobe [MPa]
s	Standardabweichung einer Stichprobe
$s_{\log N}$	Standardabweichung der logarithmierten Werte einer Stichprobe; LW-Prüfung [-]
t	Parameter der STUDENT-Verteilung
$t_o$	Parameter „ausfallfreie Zeit“ einer WEIBULL-Verteilung
$\Delta t_h$	Haltezeit im Fall von Druckstufen in der Berstprüfung [s]
$\Delta t_s$	Gesamtdauer einer Druckstufe [s]
$x_{ND}$	Abweichungsmaß der GAUSSschen Normalverteilung [-]
MSP	Maximaler Betriebsdruck (Maximum service pressure $\leq$ test pressure PH) [MPa]
N	(Rest-) Lastwechselfestigkeit bis Versagen [-]
$N_{10\%}$	Anzahl der Lastwechsel bis Versagen bei SR von 10% der Stichprobe [-]
$N_{50\%}$	Mittelwert bzw. Median der Lastwechsel bis Versagen einer Stichprobe [-]
$N_{90\%}$	Anzahl der Lastwechsel bis Versagen bei SR von 90% der Stichprobe [-]
$N_s$	Streuwert der Lastwechselzahl bis Versagen (basiert auf der Standardabweichung) [LW]
NWP	Nennbetriebsdruck (nominal working pressure) [MPa]

---

PH	Prüfdruck (test pressure = 150 % nominal working pressure NWP) [MPa]
PW	Arbeits- oder Betriebsdruck [MPa]
Q	Umfang der Grundgesamtheit (Population) [-]
SR	Überlebenswahrscheinlichkeit einer Population bei einer definierten Last; Anteil der Prüfmuster einer Stichprobe, die eine definierte Last überleben [-]
T	Temperatur [°C]
T	Charakteristische Lebensdauer („63,2 %-Wert“) der WEIBULL-Verteilung [-]
$T_N$	Streuspanne der Lastwechselfestigkeit = $N_{90\%}/N_{10\%}$ [-]
$T_p$	Streuspanne der Druckfestigkeit = $p_{90\%}/p_{10\%}$ [-]
$T_t$	Streuspanne der Zeitstandfestigkeit = $t_{90\%}/t_{10\%}$ [-]
UTS	Anfangsfestigkeit
V	nutzbares Volumen eines CC; ermittelt durch Auslitern [Liter]
$\Psi$	relatives Streumaß des Berstdrucks einer Stichprobe: $\Psi \equiv \Omega_{10\%} - \Omega_{90\%}$ [-]
$\Omega$	relativer Berstdruck $\Omega \equiv p/MSP$ [-]
$\Omega^*$	relativer Berstdruck $\Omega \equiv p/PH$ [-]
$\Omega_{10\%}$	relative Berstfestigkeit einer Stichprobe bei SR = 10 % $\Omega \equiv p_{10\%}/MSP$ [-] (s. $\Omega$ )
$\Omega_{50\%}$	relative Mittelwert der Berstfestigkeit einer Stichprobe $\Omega \equiv p_{50\%}/MSP$ [-] (s. $\Omega$ )
$\Omega_{90\%}$	relative Berstfestigkeit einer Stichprobe bei SR = 90 % $\Omega \equiv p_{90\%}/MSP$ [-] (s. $\Omega$ )
$\Omega_s$	relative Standardabweichung der Berstfestigkeit $\Omega_s \equiv p_s/MSP$ [-] (s. $\Omega$ )
$\Omega_s^*$	relative Standardabweichung der Berstfestigkeit $\Omega_s \equiv p_s/PH$ [-] (s. $\Omega$ )
$\Omega_\mu$	„wirklicher“ Mittelwert des Bestfestigkeit (Grundgesamtheit) [-]
$\Omega_\sigma$	„wirkliche“ Standardabweichung der Berstfestigkeit [-]
$\alpha$	Irrtumswahrscheinlichkeit [%]
$\gamma$	Konfidenzniveau (hier ist es 95 %, falls nicht anders dargestellt) [%]
$\mu$	Mittelwert der Grundgesamtheit
$\sigma$	Spannung (Last pro Fläche) [MPa]
$\sigma$	Standardabweichung der Grundgesamtheit

Gegenstand der nachfolgenden Analysen sind Druckbehälter aus Verbundwerkstoffen (auch „Kompositwerkstoffe“ bzw. dem englischen Sprachgebrauch entnommen „Composite“) für die Speicherung von Gasen im Kontext verschiedenster Anwendungen. Der Begriff „Druckbehälter“ ist in Deutschland seit dem Rückziehen der DruckBehV [1] streng genommen auf stationäre Anwendungen beschränkt. Hier gewinnen Druckbehälter aus Verbundwerkstoffen aufgrund ihrer hohen Lastwechselfestigkeit z. B. als Pufferbehälter der obersten Druckstufen in Tankstellen an Bedeutung.

Im Bereich der Fahrzeuge, in dem diese Umschließungen aus Gewichtsgründen immer mehr Verbreitung finden, spricht man entweder von „Tanks“ oder von „Treibstoffspeichern“. Da in diesem Kontext der Treibstoff ein Gas ist, spricht man auch von „Treibgasspeichern/Treibgasspeichersystemen“. Dieser Begriff ist relativ sperrig. Der davor genannte Begriff „Tank“ ist dagegen im Kontext mit einem komprimierten Gas physikalisch nicht korrekt und insbesondere missverständlich, da er im Gefahrguttransportrecht ein definierter Oberbegriff für Umschließungen von Flüssigkeiten und Gasen mit einer Wasserkapazität von mindestens 450 L [2] darstellt.

Im Gefahrguttransport wiederum werden die hier interessierenden Druckbehälter als „Gasflasche“ (bis 150 L) oder „Großflasche“ (über 150 L bis zu 3000 L) bezeichnet, die mit anderen Behälterarten unter dem Oberbegriff „Druckgefäß“ subsummiert werden.

Im Sprachgebrauch der ISO (International Standardisation Organisation) werden Druckbehälter, Großflaschen und Flaschen etc. abweichend von den teilweise widersprüchlichen Definitionen in den Rechtsvorschriften verschiedener Rechtsgebiete als „cylinders“ (Gasflasche) bezeichnet. Im Duktus des ISO/TC58 werden Druckbehälter aus Verbundwerkstoffen (engl. „composite“) unabhängig von der Verwendung (stationär, Fahrzeug oder Gefahrgut) kurz „composite cylinders“ genannt. Davon abgeleitet wird in diesem Rahmen die Bezeichnung „Composite-Cylinder“ für die verwendungsunabhängige Bezeichnung der Bauweise aus dem Englischen übernommen und ggf. mit „CC“ abge-

**Abb. 1.1** Wasserstoffbasiertes Elektrofahrzeug (mit freundlicher Genehmigung der BMW Group)



kürzt. Sofern im Folgenden ein bestimmter Verwendungsbereich gemeint ist, wird wieder auf die o. g., verwendungsspezifischen Bezeichnungen zurückgegriffen.

Unabhängig von dem Bereich der Verwendung sind die Entwicklung und auch das Interesse an weiteren Verbesserungen mit Blick auf Sicherheit, Gewicht und Kosten dieser Composite-Cylinder (CC) wesentlich mit der Frage der e-Mobilität verbunden (z. B. Abb. 1.1).

In diesem Kontext muss darauf hingewiesen werden, dass alle Fahrzeuge als e-Fahrzeug gelten, die elektrisch angetrieben werden. Somit ist dieser Begriff nicht auf sog. „Plug-In-Batteriefahrzeuge“ begrenzt. Wasserstofffahrzeuge mit Brennstoffzelle (HFC) haben einen elektrischen Antrieb und gelten somit im Gegensatz zu Wasserstofffahrzeugen mit Verbrennungsmotor (ICE) als e-Fahrzeug. Der Begriff „Batteriefahrzeug“ hat im Kontext des Elektroantriebes eine vollständig andere Bedeutung als im Fahrgutrecht. Dort meint „Batteriefahrzeug“ ein Fahrzeug, auf dem eine Batterie von Druckgefäßen für den Transport von Gasen fest montiert ist, wie z. B. in Abb. 1.2 dargestellt.



**Abb. 1.2** Modernes Großflaschenbatterie-Fahrzeug für die Belieferung von Wasserstofftankstellen (mit freundlicher Genehmigung der Fa. Linde Gas)

**Abb. 1.3** Kryogene Druckspeicherung von Wasserstoff in Pkw (mit freundlicher Genehmigung der Fa. BMW Group)



Ohne einen leistungsfähigen Gasspeicher, der derzeit immer noch als „Flaschenhals“ bzgl. Kosten in Treibgasfahrzeugen angesehen wird, bleibt der Teil der e-Mobilität, auf die batteriebasierten Kurzstreckenfahrzeuge bzw. auf e-Fahrzeuge mit fossil betriebenen Range-Extendern beschränkt. Entsprechend wird intensiv nach neuen Ansätzen zur Speicherung von Wasserstoff gesucht. Dies bedeutet meist eine Evolution im Sinne einer Topologieveränderung. Im Einzelfall ist dies aber auch eine Revolution im Sinne einer Funktionsänderung. So wird z. B. an der Speicherung in Mikrostrukturen (z. B. Glaskapillaren) oder an der Kombination von Druck und niedriger Temperatur (gasförmig kryogen) gearbeitet. In dem in Abb. 1.3 dargestellten Speicher ist ein vollumwickelter Metall-Composite-Treibgasspeicher mit einem hochisolierenden Vakuum kombiniert, um die Energiedichte der flüssig-tiefkalten Speicherung mit einem deutlich reduzierten Aufwand zu erreichen. Außerdem kann dieser Speicher im „Notfall“ auch mit normalem „Druckwasserstoff“ betrieben werden. Eine der besonderen Herausforderung in der Auslegung des innen liegenden Composite-Speichers ist der gegenüber vergleichbaren Druckspeichern große Temperatur- und damit auch Eigenspannungsbereich.

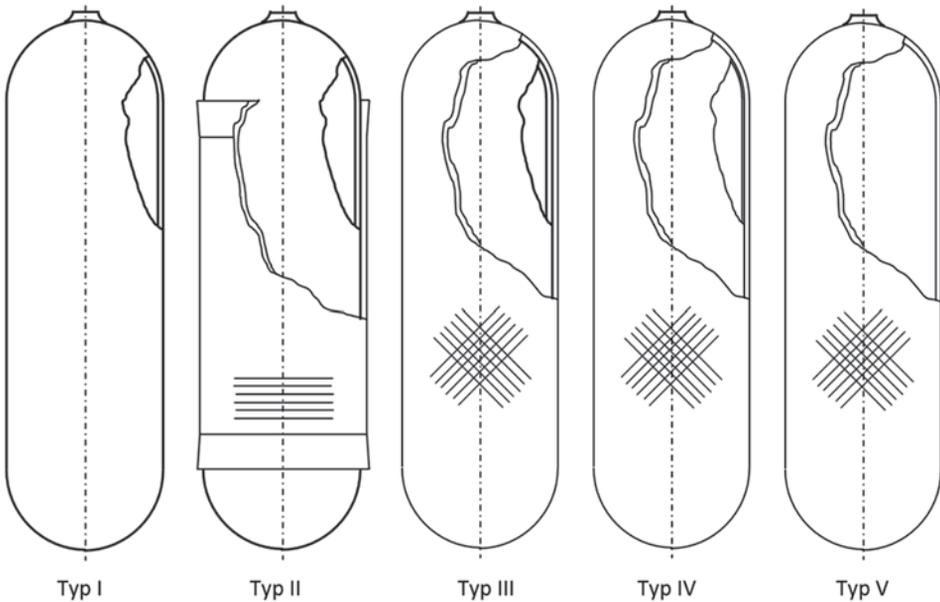
Das Interesse an Optimierung besteht grundsätzlich auch im Bereich der Infrastruktur und der Tankstellentechnik. Um in zumindest temporärer Ermangelung entsprechender Leitungen, Tankstellen mit Wasserstoff effizienter als bisher versorgen zu können, ist z. B. das in Abb. 1.2 dargestellte Batterie-Fahrzeug entwickelt worden.

Bei all diesen Anwendungen kommen verschiedenen Bauweisen von CCn (Composite-Cylindern) zum Einsatz. Um die relevanten Unterschiede besser nachvollziehen zu können, ist in Abb. 1.4 verdeutlicht, wonach die verschiedenen CC unterschieden werden.

Typ I meint einen Composite-Cylinder aus Metall, d. h. ohne Composite (meist aus Stahl, aber auch aus Aluminiumlegierungen), wie er im Grundsatz auch vor über 120 Jahren Verwendung fand [3].

Typ II bezeichnet einen Teil-Hybrid. Sein metallischer Basisbehälter (Liner) ist im zylindrischen Teil mit einer Umfangsarmierung versehen. Damit trägt das Metall nicht nur einen Teil der Umfangslast, sondern auch die gesamte Last in Richtung der Behälterachse.

Typ III bedeutet einen *Hybrid* – CC, der vollständig umwickelt ist. Damit hat die Armierung Steifigkeit und Festigkeit in alle Lastrichtungen. Dennoch trägt der metallische



**Abb. 1.4** Bauweisen (Typen) von Composite-Cylindern

Liner (Innenbehälter meist aus Aluminiumlegierung, aber auch aus Stahl,) nach Maßgabe des Steifigkeitsverhältnisses und der Vorspannung mit.

In CCn des Typs IV wird aus Gewichtsgründen ein Liner aus Kunststoff eingesetzt. Dieser Liner hat gegenüber Metall reduzierte Permeationseigenschaften und trägt aufgrund seiner geringen Steifigkeit nicht mehr mit. Ein gutes Design entgeht dadurch dem Problem der relativ geringen Ermüdungsfestigkeit der metallischen Werkstoffe und kann so die hohe Festigkeit des Composites besser ausnutzen.

Seit kurzem gibt es in der offiziellen Nomenklatur des bei der *ISO* für CC „zuständigen“ Technical Committee (*ISO/TC58*) noch einen fünften Typ. Dieser Typ V steht für ein Design ganz ohne dichtenden Liner. Damit übernimmt das Composite bzw. eine entsprechende Behandlung der Innenoberfläche auch die Dichtfunktion. In der Praxis ist dieser Typ aber derzeit noch auf die Verwendung für niedrige Drücke (Prüfdruck bis 30 bar) reduziert. Hierbei kommt es oft weniger auf die Festigkeit gegen Innendruck als auf eine Mindestwanddicke bei robustem Umgang an.

Die Nutzung von Gasen wie auch deren Transport gehen, wie im Unterkapitel 1.1 dargestellt, in seiner Historie weit zurück. Die aktuell praktische Bedeutung von *Erdgas* und *Wasserstoff* für die Energieversorgung (s. z. B. [4–7]) und Mobilität (s. z. B. [8]) oder anderer Gase für das Funktionieren einer modernen Technikgesellschaft ist in der Literatur umfangreich dargestellt und wird mit Verweis auf die o. g. Studien hier nicht weiter ausgeführt.

Auch bezüglich der Grundlagen zu Verbundwerkstoffen sei auf Standardwerke wie [9–12] verwiesen. Speziell für die Gestaltung von Druckbehälter aus Verbundwerkstoffen gibt es in o. g. Literatur Abschnitte und umfangreiche Verweise auf weiterführende Literatur, die hier nur zum kleinen Teil bedarfsweise zitiert wird. Es ist aber kein umfangreiches Werk bekannt, das man international als Standardwerk für Druckbehälter aus Verbundwerkstoffen bezeichnen könnte.

Was im Gegensatz zur Motivation dafür, Gas zu Speichern oder Verbundwerkstoffe zu verwenden, einer Einführung bedarf, sind die drei Eckpunkte und weitere Schlüsselthemen, die aus Sicht des Autors zu dem hier dargestellten Ansatz für den statistischen Sicherheitsnachweis von Composite-Hochdruckspeichern geführt haben.

Der erste Eckpunkt ist die Einsicht in die Überschätzung der Bedeutung der deterministischen Mindestfestigkeiten bei Composite-Druckgefäßen. Der zweite Punkt ist die Erkenntnis, dass sich die Betriebsfestigkeit und auch die Restfestigkeit vieler Baumuster nicht über die Lastwechselprüfung statistisch quantifizieren lassen. Der dritte ist eine Reihe misslungener Zeitstandsprüfungen, aus denen die Motivation zur Entwicklung der langsamen Berstprüfung entstand.

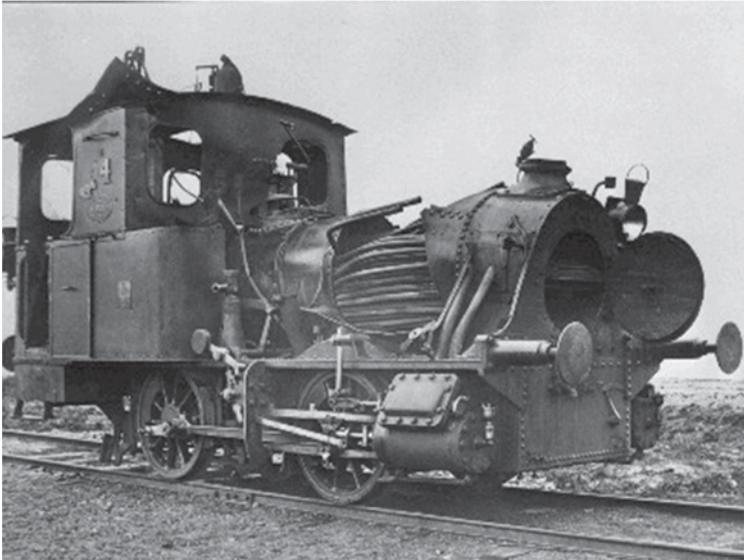
Insofern sind die nachfolgenden, einführenden Betrachtungen von Bedeutung, um über diesen Hintergrund die Intention des in den Kap. 2 bis 4 beschriebenen Ansatzes und der weiter führenden Gedanken im Kap. 5 zu vermitteln.

---

## 1.1 Historische Entwicklung der Druckgasspeicher

Die Industrialisierung Europas fußte im Wesentlichen auf der Nutzung der mechanischen Energie, die im 19. Jhd. mithilfe der Dampfmaschinen zunehmend unabhängig von Wasserläufen und Wind zur Verfügung stand. Trotz der Betriebsregelung in Deutschland für Dampfkessel aus dem Jahr 1831 kam es mit der zunehmenden Anzahl von Dampfkesseln zu immer häufigeren Unfällen („Zerknall“; vergl. Abb. 1.5), die die wirtschaftliche Existenz der betroffenen Unternehmen als auch die Akzeptanz der Technik gefährdeten. Zur Vermeidung solcher Unfälle gründeten die Dampfkesselbesitzer unabhängige Überwachungsorganisationen in Form von Vereinen. Ihr Erfolg bei der Vermeidung von Dampfkesselunfällen war so beachtlich, dass die Dampfkessel von Mitgliedern dieser regionalen Selbsthilfe-Organisationen („Dampfkessel-Überwachungs- und Revisions-Vereine: DÜV“) ab 1871 von der staatlichen Inspektion frei gestellt wurden. Erst 1908 gab es die ersten deutschen Bauvorschriften für Dampfkessel.

Der Erfolg des DÜV in der Unfallverhütung der sich rapide weiter entwickelnden Dampfdruck-Technologie war der Grund dafür, dass die DÜVe später auch mit Sicherheitsprüfungen auf anderen technischen Gebieten, unter anderem mit der wiederkehrenden Prüfung von Gasflaschen als Organisation staatlich anerkannter (beliehener) Sachverständiger (technische Überwachungsvereine „TÜV“) beauftragt wurden. Aus diesen Erfahrungen entwickelten sich die „technischen Regeln Gase“, die auch die technische Basis



**Abb. 1.5** Dampfkesselzerknall einer Lokomotive am 2. November 1890

der in Deutschland im Jahr 1968 zum Zweck der Arbeitssicherheit eingeführten Druckgasverordnung darstellen. Im Ergebnis mussten nach 1968 alle Gasflaschen in Deutschland zugelassen sein, um befüllt werden zu dürfen.

Unter dem Dach der EWG (römischen Verträge 1957/1958) folgten auf Basis des EG-Vertrages Art. 95 (vormals: 100a) in den 80er Jahren Diskussionen zur Harmonisierung auf der Basis von Normen (Entscheidung 85/C136/01). Dem folgte der sog. „Global Approach“ (Entscheidung des Rates 89/C267/03) und später die Ausformung der Module im „New Approach“ (Beschluss des Rates 90/683/EWG), die den Binnenmarkt und die europaweite Anerkennung von Prüfungen privater Prüfstellen zum Inhalt hatten.

Separate Anforderungen für den Transport von Gasen in Gasflaschen als Gefahrguttransportumschließung von Gasen (Druckgefäße) in Ergänzung zur Druckgas- und später Druckbehälterverordnung gab es bis zu den Europäischen Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf Straße (1957: ADR) und Schiene (1980: RID) nicht. Auf die gegenseitige Anerkennung von nationalen Zulassungen für den ausschließlichen Zweck der Beförderungen durch bzw. in die Unterzeichnerstaaten mit der Genehmigung zur Entleerung folgten 1984 die ersten EWG-weit harmonisierten Beschaffenheitsanforderungen für Gasflaschen: drei harmonisierte EWG-Richtlinien 84/525/EWG, 84/526/EWG und 84/527/EWG, nach denen die so genannten „EWG-“ oder „e-Flaschen“ gebaut wurden. Damit begann der Wechsel von der dominierenden Betrachtung des Arbeitsschutzes hin zur Federführung des Transportrechtes mit seinen zwischenstaatlichen Verträgen. Diese griffen die bestehenden arbeitsrechtlichen Vorschriften zum größten Teil auf und ergänzten diese durch die Aspekte der Transportsicherheit. An der Anforderung, dass zum Schutze des Füllers grundsätzlich nur Flaschen mit einem Prüfstempel eines deutschen TÜVs befüllt werden durften, änderte sich jedoch zunächst nichts.

Mit dem „ADR 1997“ wurde das internationale Regelwerk ADR über die Rahmenrichtlinie 94/55/EG auch für den nationalen Straßenverkehr in D verbindlich. Parallel hierzu gab es die Möglichkeit, für Druckgefäße mit nationaler Zulassung unter Einschaltung der jeweils zuständigen Behörde für den IMDG-Code eine umfangreiche Transporterlaubnis für den Seeverkehr zu erhalten. Für die Befüllung der Druckgefäße in (West-) Deutschland galt aber nach wie vor die auf dem Arbeitsschutz basierte Druckbehälterverordnung (§ 15(3): Kennzeichen des GSG-Sachverständigen) mit den TRGs (z. B. 402) etc.

Auf dieser Basis wurde auch eine Richtlinie für Transportumschließungen von Gasen entwickelt: die Richtlinie 1999/36/EG über ortsbewegliche Druckgeräte „TPED“ (Transportable Pressure Equipment Directive). Sie basiert auf dem Artikel 75 (alt) der EG-Verträge, beinhaltet aber dennoch wesentliche Elemente des „New Approach“. Diese Richtlinie wurde in Stufen zwischen 1. Juli 2001 (Anfang Übergangszeit Gasflaschen) und 1. Juli 2007 (Ende Übergangszeit Gastanks) in allen EU-Mitgliedsstaaten verbindlich eingeführt.

Der § 15(3) DruckBehV galt in Deutschland bis Ende 2002 formal auch für die Flaschen, die seit dem 1. Juli 2001 in Übereinstimmung mit der TPED zertifiziert wurden. Wobei in der EU alle Druckgefäße mit einem regelkonformen „π“ und der Nummer einer benannten Stelle als harmonisiert und sicherheitstechnisch unbedenklich befüllbar galten und gelten. Die Konformitätsbestätigung nach der TPED ersetzte somit für die betroffenen Umschließungen die nationale Zulassung durch die jeweilig zuständigen (Bundes-) Länderbehörden aufbauend auf Empfehlungen der nach dem Territorialitätsprinzip zuständigen Sachverständigenorganisation (TÜVs).

Nach dem 1. Juli 2003 mussten alle Gasflaschen, Großflaschen und geschlossene Kryo-Gefäße grundsätzlich anstelle der vormals nationalen Zulassungen durch Anwendung der TPED (Richtlinie 1999/36/EG) zertifiziert werden. Hierbei sind nach wie vor die technischen den Anforderungen der Landverkehrsvorschriften RID/ADR zu erfüllen. ADR und RID sind jeweils völkerrechtliche Verträge, deren Vertragspartner ein Gebiet repräsentieren, das weit über EU-Europa und sogar den europäischen Kontinent hinausgeht. Zum 1. Juli 2007 endete in der EU auch die Übergangsfrist für die übrigen ortsbeweglichen Druckgeräte wie Tanks, Bündel oder Druckfässer. Ausgenommen von der Erfassung durch die TPED sind neue Druckgeräte nur, wenn diese ausschließlich für den Verkehr mit Drittstaaten bestimmt sind (Artikel 1 (4) der TPED).

Mit dem Rückziehen der Druckbehälterverordnung Ende 2002 verschwanden jedoch in Deutschland die Basis für nationale Zulassungen im Landverkehr als Verwaltungsakt und auch die Zulassungsstellen der Bundesländer. Sofern Druckgefäße in Deutschland in Verkehr gebracht werden sollen, bleibt somit de facto nur mehr der Weg über die TPED – auch für den ausschließlichen Drittstaatenverkehr.

Per Beschluss des Europäischen Parlamentes vom 16. Juni 2010 wurde die Richtlinie 1999/36/EG durch die Richtlinie 2010/25/EU abgelöst. Auslöser für das Ersetzen waren erheblichen Ergänzungen im ADR/RID, die das Wegfallen einiger Passagen aus der Richtlinie 1999/36/EG ermöglichten. Die Richtlinie 2010/25/EU wurde zum 03. Dezember 2011 mithilfe ODV (Ortsbewegliche-Druckgeräte-Verordnung vom 29. November 2011)

in Deutschland umgesetzt. Damit lief die Frist für die Herstellung und das Inverkehrbringen von Druckgefäßen nach der 1999/36/EG zum 31.12.2012 aus.

Parallel und teilweise bereits im Vorfeld zur Entwicklung der TPED entstanden bei den Vereinten Nationen in der sogenannten „Working Party 29“ (kurz: UN ECE WP.29) unter dem Dach des sog. „1958er Agreement“, [13] technische Vorschriften für die Fahrzeugspeicher. In Deutschland wurden diese Fahrzeugspeicher anfangs ebenfalls nach der DruckBehV geprüft und zugelassen. Mit der Verabschiedung der ECE R67 [14] und der ECE R110 [15] in 2001 entstand mittels EU-Verordnung die Verpflichtung, diese im Zuge der STVZO [16] national anzuwenden. Damit fielen die Gasspeicher für Erdgas und Propan/Butan-Gemische als Bestandteil des Fahrzeugantriebs kurz vor dem Zurückziehen DruckBehV [1] ohnehin aus dem Geltungsbereich der DruckBehV.

Im Ergebnis waren damit ab 2002 die drei vorgenannten Anwendungen von CCn nach der DruckBehV (Gefahrguttransport, Fahrzeugspeicher und stationäre Speicher) rechtlich getrennt. In der Folge entwickelten sich sowohl die Vorschriften wie auch die Auslegung anwendungsspezifisch immer mehr auseinander. Was dazu führte, dass heute z. B. der Auslegungsdruck anwendungsabhängig unterschiedlich definiert wird. Auch die zugehörigen Sicherheitsbeiwerte und Prüfungen bilden in Umfang wie auch nach ihren Anforderungen unterschiedliche Niveaus ab.

Nichts desto trotz sind die technischen Eigenschaften im Grundsatz gleich. Auch sind die Verfahren zur Sicherheitsbeurteilung nach wie vor relativ stark an die umfangreichen Erfahrungen mit Stahlbehältern angelehnt. Daraus entsteht ein ähnlich gelagerter Bedarf, die Prüfverfahren weiter zu entwickeln. Auch das Potential, die Sicherheitskriterien anhand statistischer Methoden zu überprüfen, weiter zu entwickeln oder durch einen probabilistischen Ansatz für CCs zu ersetzen, ist vergleichbar.

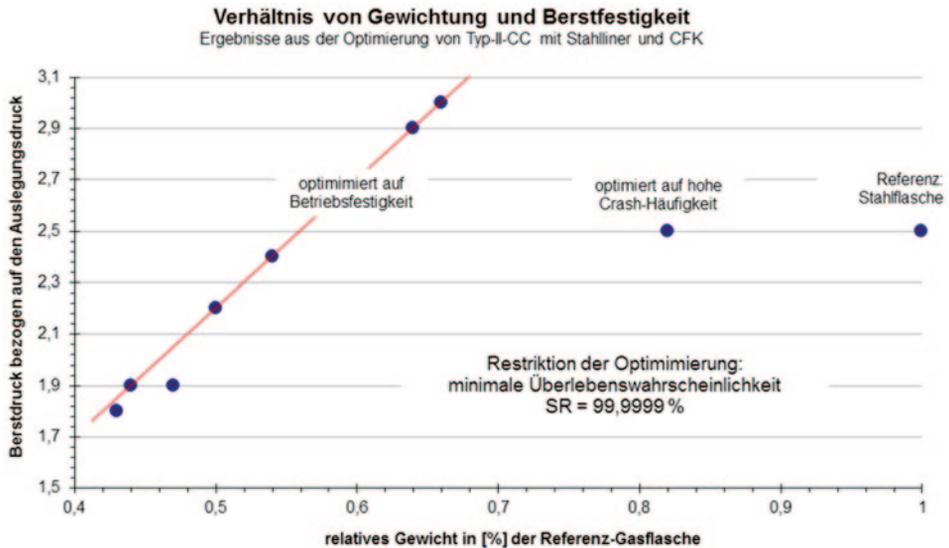
---

## 1.2 Bedeutung des minimalen Berstdrucks für die Betriebsfestigkeit

In [17] ist das Ergebnis zuverlässigkeitsrestringierter Optimierungsrechnungen zu umfangsverstärkten Composite-Cylinder (Typ II) dargestellt: Eine Reihe optimaler Kombinationen (Optima) der Fertigungsparameter „Dicke des metallischen Liners“, „Composite-Dicke“ und „Vorspannung des Composites gegenüber dem Liner“.

Jedes dieser Optima gibt ein Design wieder, das mindestens 99% Zuverlässigkeit gegen Leckage und 99,9999% gegen Bersten aufweist. Die im Nachgang erfolgte Analyse der aus diesen Designoptima resultierenden Berstdrücke ist in Abb. 1.6 über dem Gewicht der Optima dargestellt.

Abbildung 1.6 zeigt, dass die Auswertung der Berstfestigkeiten trotz gleicher Zuverlässigkeit gegen spontanes Versagen (Bersten) im Betrieb sehr unterschiedliche Ergebnisse liefert. Die in Abb. 1.6 dargestellte Gerade suggeriert einen Zusammenhang zwischen Berst-Sicherheitsbeiwert und Gewicht. Man ist damit versucht, zu vergessen, dass jeder Punkt in diesem Diagramm ein Design darstellt, das zumindest im Rahmen der Modellannahmen eine exakt gleiche Zuverlässigkeit gegen Bersten im Betrieb aufweist.



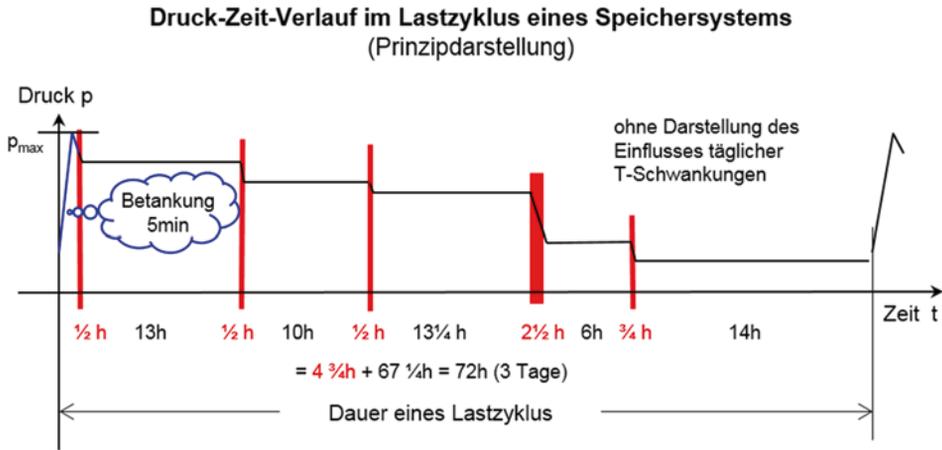
**Abb. 1.6** Korrelation von Sicherheitsfaktor und Gewicht verschiedener Gasflaschen; alle nach [17] auf die gleiche Zuverlässigkeit optimiert

Daraus leitet der Autor ab, dass wenn aus der Zuverlässigkeit gegen Bersten im Betrieb nicht auf den Berstdruck geschlossen werden kann, dann auch aus dem Berstdruck nicht auf die Sicherheit im Betrieb geschlossen werden darf. Dies stellt konsequenterweise die zentrale Bedeutung der Mindestberstdrücke in Frage, wie diese heute für Composite-Cylinder zur Anwendung kommen. Ihre Aussagekraft für die Betriebssicherheit ist differenziert zu betrachten. Letztendlich führt das auch zu einer grundlegenden Verunsicherung, was die Aussagekraft deterministischer Werkzeuge der Sicherheitsbeurteilung angeht. Die Ergebnisse einer detaillierten Betrachtung des heutigen deterministischen Ansatzes werden im Kap. 5 im Detail ausgeführt.

### 1.3 Die Lastwechsel-Empfindlichkeit

Eines der aus dem Unterkapitel 1.2 ableitbaren Erkenntnisse ist die herausragende Bedeutung der statistischen Betrachtung von Festigkeitseigenschaften für die Sicherheitsbeurteilung. Aus dem Anspruch, Festigkeitseigenschaften statisch zu erfassen, leitet sich aber zwingend der Anspruch ab, die relevanten Prüfungen bis zum Versagen durchzuführen.

Es gibt eine Vielzahl von Baumustern, deren Festigkeit in der hydraulischen Prüfung der Ermüdungsfestigkeit deutlich über 100.000 Lastwechseln liegt. Vor dem Hintergrund einer statistischen Betrachtung bedeutet dies für die Lastwechselprüfung einer hinreichend großen Stichprobe einen nicht mehr tragbaren Aufwand. Mit teilweise 500.000 Lastwechsel bis zum Versagen erreicht man schon mit einer kleinen Stichprobe die Standzeit der



**Abb. 1.7** Schema eines Druck-Zeit-Verlaufs eines Betankungszyklus (Kfz)

hydraulischen Druckübersetzer, wie sie heute (oft) in der Lastwechselprüfung eingesetzt werden.

Zur Reduktion der Lastwechselzahl ist eine Erhöhung des hydraulischen Innendrucks über den sogenannten Prüfdruck PH hinaus denkbar. Dies verbietet sich jedoch, da höhere Drücke betriebsfremde Belastungen darstellen würden. Diese würden über Kriechen und ggf. Linerplastifizieren einen deutlichen Einfluss auf den Eigenspannungszustand im Composite haben und damit möglicherweise einen der Entwurfsparameter, d. h. die Auslegung, verändern.

Mit der Rückbesinnung auf die Belastungszustände während eines realen Betriebszyklus wird die Zweiteilung in der Simulation der Betriebsbelastung deutlich. Dies ist schematisch in Abb. 1.7 dargestellt. Während die Lastwechselprüfung der Frage der Zahl der Füllzyklen im Zeitraffer nachgeht, bleibt der Aspekt der Dauer einer Lasteinwirkung unbeleuchtet. Wie wir aus [18–20] und ähnlicher Literatur wissen, ist dieser Aspekt bei Composite-Werkstoffen im Gegensatz zu Metallen keinesfalls zu vernachlässigen. Wenn also die Zeitfestigkeit aus der Lastwechselprüfung für einen Aspekt der Betriebsfestigkeit steht, dann müsste auch die Zeitstandsfestigkeit einen Aspekt der Betriebsfestigkeit abbilden.

Die Entscheidung, ob die Lastwechselfestigkeit oder die Zeitstandsfestigkeit die beste Methode zur Ermittlung aktueller Betriebs-(Rest-)festigkeiten ist, bedarf eines Kriteriums. Als Kriterium wurde vom Autor ab 2010 (vergl. [21, 22]) die Lastwechsel-Ermüdungsempfindlichkeit vorgeschlagen. So wird jedes Baumuster als lastwechselempfindlich klassifiziert, das aus einer Stichprobe von mindestens 5 Prüfmustern einen oder mehr Ausfälle (Leckagen) vor 50.000 LW aufweist. Umgekehrt wird ein Baumuster als lastwechselunempfindlich bezeichnet, wenn in diesem Rahmen kein Ausfall festgestellt wird. Die Grenze von 50.000 LW basiert auf Praktikabilitätsüberlegungen und orientiert sich an der heute bereits übliche Abbruchgrenze von 45.000 LW (9-fache Füllzyklenzahl) gemäß z. B. Abschnitt 4.2.2.3 der REGULATION EU 406/2010 [23]. Man geht davon aus, dass

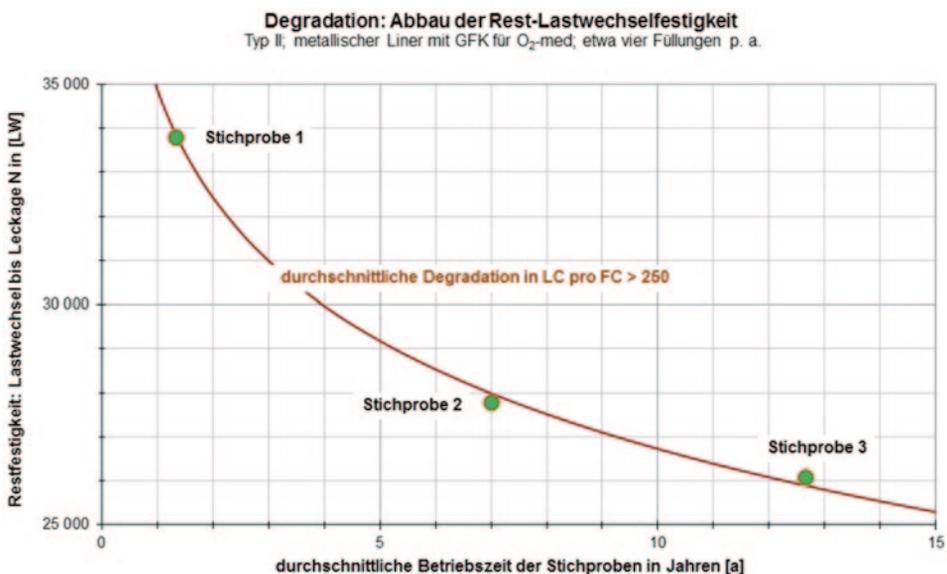
ein Prüfmuster mit derart hoher Lastwechselfestigkeit eine im Betrieb schadensfreie bleibende Auslegung (safe-life design) hat. Entsprechend muss das Leckageverhalten nach diesem Konzept nicht weiter untersucht werden. Vor diesem Hintergrund wird die Grenze von 50.000 LW als akzeptabel angesehen. Dennoch ist dieser Zahlenwert ein de facto willkürlich gewählter Kompromiss zwischen Prüfaufwand und Aussagekraft.

## 1.4 Die Restfestigkeit

Betrachten man eine Prüfreihe zur Abnahme der o. g. Lastwechselfestigkeit im Laufe des Betriebes, dann kommt man zu einem zunächst überraschenden Phänomen. Die in Abb. 1.8 dargestellten Ergebnisse (vergl. Abschnitt 4.3.1) zeigen ein lastwechselempfindliches, Aluminium&Glasfaser- basiertes Baumuster.

Die Abnahme der Lastwechsel-Restfestigkeit wird als Degradation betrachtet und in verbliebenen hydraulischen Lastwechseln gemessen. Die Werte der jährlichen Degradation sind trotz unverändertem Betrieb altersabhängig. Der jährliche Verlust an LW-Festigkeit nimmt mit zunehmendem Alter ab, bleibt aber immer ein Vielfaches der im Betrieb real aufgebrauchten Füllzyklen. Damit ist davon auszugehen, dass Zeit bzw. Alter einen zusätzlichen Aspekt der Betriebsfestigkeit dieser Composite-Druckgefäße darstellen.

Soweit die Beschreibung eines Phänomens aus der Lastwechselfprüfung. Dagegen wird die Zeitstandsfestigkeit nach einer in Abb. 1.9 dargestellten Druck-Zeit-Kurve A ermittelt. Im Vergleich dazu stellt die Kurve B die klassische Berstprüfung dar.

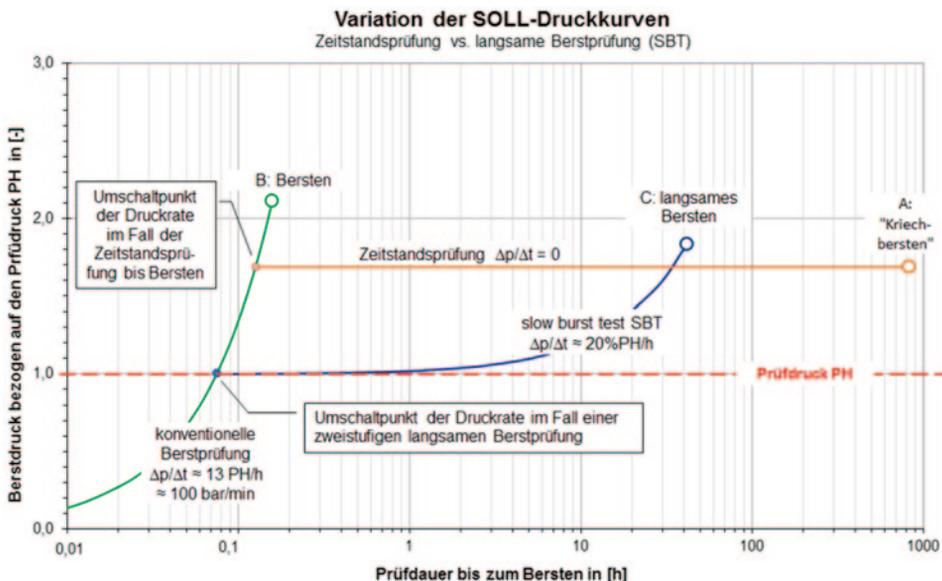


**Abb. 1.8** Festgestellte Degradation der Restlastwechselfestigkeit von CCn aus dem Betrieb [24]

Die praktische Durchführung mit Druckanstiegsphase und Druckhaltephase hat jedoch einige Nachteile. Zum einen ist die Lastaufbringung schwierig. Bereits kleine Drucksprünge im Umschaltpunkt zwischen beiden Phasen führen manchmal zum vorzeitigen Versagen und zum Verwerfen des Prüfmusters. Die Streuung der Zeit bis Versagen ist sehr hoch – in ähnlichen Größenordnungen wie die Streuung der Lastwechselfestigkeit. Um eine Prüfung innerhalb weniger 1000 h abschließen zu können, muss das Lastniveau sehr nahe an die mittlere Berstfestigkeit gesteigert werden. Dies zielt aber auch bei Baumustern mit mitragendem Liner nur auf den Composite. Bei allen Typen von Baumustern führt dies zu einem beträchtlichen Anteil von Ausfällen bevor die Druckhaltephase und damit die Phase der Zeitmessung bis Versagen begonnen haben. Die Ergebnisse der früh ausfallenden Prüfmuster sind somit nicht statistisch verwertbar. Damit wird deutlich, dass die Zeitstandsprüfung aus prüfpraktischen Aspekten nicht geeignet ist, die Resttragfähigkeit statistisch zu quantifizieren.

## 1.5 Die langsame Berstprüfung

Um dem Dilemma der Abwägung zwischen einem nicht machbarem Zeitrahmen und einem statistisch nicht verwertbaren Datensatz zu entkommen, wird im Jahr 2011 vom Autor erstmals eine Modifikation der Zeitstandsprüfung vorgeschlagen (s. [25]): Der Umschaltpunkt wird auf den Prüfdruck PH herunter gesetzt. Von dort wird dann mit einer geringen, aber erkennbaren Druckanstiegsrate bis zum Bersten weiter gefahren. Dies ist in Abb. 1.9 mit Kurve C dargestellt.



**Abb. 1.9** Schematische Druck-Zeit-Kurve verschiedener Verfahren zum quasi-statischen Prüfen bis Bersten

Im Ergebnis können alle Prüfergebnisse statistisch bewertet und auch der Zeiträumen in relativ engen Grenzen gehalten werden. Erfasst und bzgl. Mittelwert und Streuung bewertet werden können unmittelbar sowohl die Zeit vom Umschaltzeitpunkt bis zum Bersten oder auch der Berstdruck. Daraus leitet sich auch die vom Autor mit dem Prüfverfahren eingeführte Bezeichnung „Slow-Burst-Test“ (SBT) ab. Es stellt aber nach wie vor einen Ersatz für die Zeitstandsprüfung dar und ist damit vom Ansatz her nicht primär als Ersatz der Berstprüfung gedacht. Details hierzu sind im Unterkapitel 2.3 zu finden.

Ein für den hier dargestellten Ansatz essentielles Werkzeug ist das vom Autor gestaltete und in 2012 erstmals in einem Aufsatz [22] verwendete Arbeitsdiagramm zur Stichprobenauswertung (Sample Performance Chart SPC). Es bietet eine relativ einfache Darstellung und Bewertung der statistischen Festigkeitseigenschaften und damit auch der Degradation. Im Unterkapitel 3.1 werden die Varianten dieses Arbeitsdiagramms vorgestellt und in den nachfolgenden Abschnitten umfassend zur Darstellung der Ergebnisse aus der Lastwechsel- und der langsamen Berstprüfung sowie relevanter Degradationseffekte verwendet.

---

## 1.6 Der probabilistische Ansatz

Damit sind die Grundzüge der Werkzeuge beschrieben, die erforderlich sind, um eine quantifizierte und damit auch statistisch auswertbare Festigkeitsermittlung durchzuführen: Die Lastwechselprüfung im Fall eines lastwechselempfindlichen Baumusters und die langsame Berstprüfung für lastwechselunempfindliche Baumuster.

Wie den in den Kap. 3 und 4 dargestellten Prüfergebnissen entnommen werden kann, ist die Streuung der Festigkeitseigenschaften im Neuzustand von wesentlicher Bedeutung. Hinzu kommt, dass die o. g. Kapitel zeigen, dass sich die Alterung baumusterabhängig auch – oder sogar überwiegend – durch Zunahme der Streuung der Restfestigkeit darstellt. Auch ist die belastungsspezifische Alterung baumusterabhängig. Da die Sicherheit im Sinne geforderter Zuverlässigkeit, wie in Abschn. 4.4.1 dargestellt bis zum Lebensende und insbesondere am Ende des Lebens einzuhalten ist, hat die Vorhersage und Validierung der Vorhersage der Alterung eine große Bedeutung. Daraus resultiert die Aufgabe, die Veränderung von Mittelwert und Streuung wie auch die Veränderungen des Versagensablaufs probabilistisch vorherzusagen und ergänzend betriebsbegleitend abzusichern.

Fasst man nun diese Erfahrungen und Erkenntnisse zusammen, ist zu folgern, dass die heutigen Bau- und Prüfvorschriften vor weiterer Reduktion der Sicherheitsmargen nach statistischen Aspekten neu bewertet werden müssten. Alternativ und weitreichender in der Nutzung von Optimierungspotentialen zur Gewicht-, Material- und Kosteneinsparung ist aber die unmittelbare Zulassung von Baumustern nach probabilistischen Anforderungen. Hierzu muss ein Grenzkriterium vorgegeben werden, was im Abschn. 5.1 betrachtet wird. Im Abschn. 5.2 sind Aspekte aktueller Prüfvorschriften in diesem Sinne analysiert, während Ansätze zur unmittelbaren Anwendung auf Baumuster im Abschn. 5.3 erläutert werden.