

Dissertation

Stefanie Spörhase

Sicherheitstechnische Einordnung von thermisch durchgehenden Lithium-Ionen-Batterien in druckfesten Kapselungen

ISSN 2941-1297
ISBN 978-3-944659-44-2

DOI 10.7795/110.20250422



Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Dissertationen

PTB-Diss-12

Braunschweig, April 2025

Stefanie Spörhase

Sicherheitstechnische Einordnung von thermisch durchgehenden Lithium-Ionen-Batterien in druckfesten Kapselungen

ISSN 2941-1297

ISBN 978-3-944659-44-2

DOI 10.7795/110.20250422

Empfohlene Zitierweise/recommended citation

Spörhase, S., 2025. *Sicherheitstechnische Einordnung von thermisch durchgehenden Lithium-Ionen-Batterien in druckfesten Kapselungen*. Dissertation, Technische Universität Ilmenau. Braunschweig: Physikalisch-Technische Bundesanstalt. PTB-Bericht Diss-12. ISBN 978-3-944659-44-2. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.7795/110.20250422>

Herausgeber:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
ISNI: 0000 0001 2186 1887

Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Bundesallee 100
38116 Braunschweig

Telefon: (05 31) 592-93 21
Telefax: (05 31) 592-92 92
www.ptb.de

Sicherheitstechnische Einordnung von thermisch durchgehenden Lithium-Ionen-Batterien in druckfesten Kapselungen

DISSERTATION

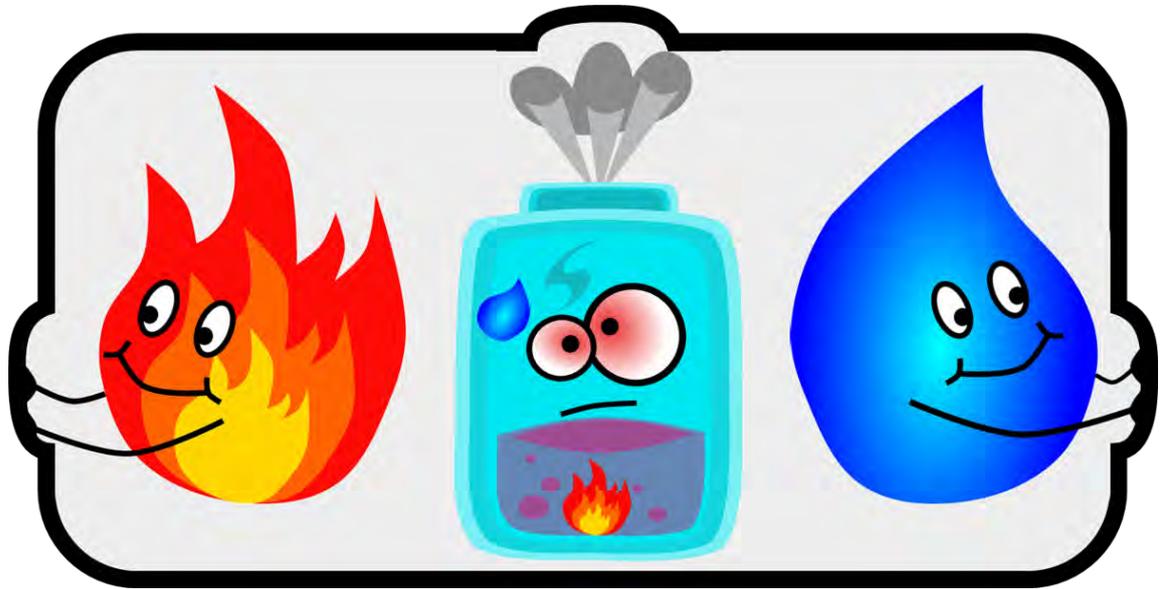
zur Erlangung des akademischen Grades einer
DOKTORIN DER INGENIEURWISSENSCHAFT
(Dr.-Ing.)

Eingereicht von: Stefanie Spörhase
Geburtsdatum, -ort: 04.05.1989, Burgwedel
Studiengang: M. Sc. Physik

Eingereicht bei: Technische Universität Ilmenau
Fakultät für Maschinenbau
Institut für Prozessmess- und Sensortechnik
Ehrenbergstraße 29, 98693 Ilmenau

Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Fröhlich
(Technische Universität Ilmenau)
Dr.-Ing. Detlev Markus
(Physikalisch-Technische Bundesanstalt)
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Bernhard Zagar
(Montanuniversität Leoben, Österreich)

Eingereicht am: 29.04.2024
Genehmigt am: 25.10.2024



*In der Theorie ist diese Arbeit sinnlos,
in der Praxis aber relevant.*

Abstract

According to the ignition protection type of the IEC 60079-1 standard, thermal runaway of a lithium-ion battery in a flameproof enclosure in explosion-protected areas is not a serious fault. However, because of certain potential for errors this should not be underestimated. For this reason, this failure case due to overheating of various cylindrical lithium-ion batteries will be examined in more detail in this work with regard to the material stress and compared to the static and dynamic tests from the above-mentioned standard. The measured variables are pressure, strain and temperature.

The static stress can be considered equivalent to the dynamic stress without pressure piling below the yield point. This can be higher with pressure piling. The strain can theoretically be determined in case of using a circular plate, but not in case of a rectangular plate. The cell chemistries NMC and LCO caused the highest pressure stresses among the investigated lithium-ion batteries. This depends not only on the lithium-ion battery itself, but also its geometry and internal gas mixture composition. A small air volume and an increased surface area lead to pressure relief. However, because of the amount of released gas, the chosen volume must not be too small. The concept of pressure relief elements can also be used in the thermal runaway of a lithium-ion battery for pressure reduction. In explosive atmospheres, slightly higher pressures can occur than in pure gas explosions. The thermal runaway of a lithium-ion battery can be simulated without a lithium-ion battery using gas explosions.

Kurzfassung

Nach der Zündschutzart der Norm IEC 60079-1 ist das thermische Durchgehen einer Lithium-Ionen-Batterie in einer druckfesten Kapselung in explosionsgeschützten Bereichen kein ernst genommener Fehlerfall. Dies sollte jedoch aufgrund eines gewissen Fehlerpotentials nicht unterschätzt werden. Deshalb wird in dieser Arbeit dieser Fehlerfall durch Überhitzen von verschiedenen zylindrischen Lithium-Ionen-Batterien im Bezug auf die Materialbeanspruchung näher untersucht und mit den statischen und dynamischen Prüfungen aus der genannten oben Norm verglichen. Als Messgrößen dienen dafür der Druck, die Dehnung und die Temperatur.

Die statische Belastung kann mit der dynamischen Belastung ohne Drucküberhöhungen unterhalb der Fließgrenze als gleichwertig angesehen werden. Mit Drucküberhöhungen kann diese höher sein. Die Dehnung zeigt sich theoretisch bestimmbar bei der Verwendung einer Kreisplatte, jedoch nicht bei einer Rechteckplatte. Bei den untersuchten Lithium-Ionen-Batterien verursachten die Zellchemien NMC und LCO die höchsten Druckbelastungen. Diese ist nicht nur von der Lithium-Ionen-Batterie selbst abhängig, sondern auch von deren Geometrie und der inneren Gasgemischzusammensetzung der druckfesten Kapselung. Ein kleines Luftvolumen und eine erhöhte Oberfläche führen zu einer Druckentlastung. Das Volumen darf aber wegen der freigesetzten Menge an Gas nicht zu klein gewählt werden. Das Konzept von Druckentlastungselementen ist auch bei dem thermischen Durchgehen einer Lithium-Ionen-Batterie zur Druckreduzierung einsetzbar. In explosionsfähiger Atmosphäre kann es zu geringfügig höheren Drücken kommen als bei reinen Gasexplosionen. Das thermische Durchgehen einer Lithium-Ionen-Batterie kann ohne Lithium-Ionen-Batterie mit Hilfe von Gasexplosionen nachgebildet werden.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	3
2.1	Explosionsschutz	3
2.2	Lithium-Ionen-Batterie	8
2.3	Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien in einer druckfesten Kapselung	13
2.4	Messtechnik und deren Hintergründe	15
2.4.1	Dehnung	15
2.4.2	Druck	17
2.4.3	Temperatur	19
3	Aufbau und Durchführung	20
3.1	Verwendete druckfeste Kapselungen	20
3.1.1	Zylinderförmig	20
3.1.1.1	Einzelkammer	20
3.1.1.2	Zweikammersystem	21
3.1.2	Quaderförmig	21
3.1.2.1	Typ 8265	22
3.1.2.2	Typ 8264	22
3.1.2.3	Typ 8280	23
3.2	Messtechniken und Unsicherheiten	24
3.2.1	Dehnungsmessung	24
3.2.2	Druckmessung	25
3.2.2.1	Piezoresistiv	26
3.2.2.2	Piezoelektrisch	26
3.2.3	Temperaturmessung	27
3.2.4	Sonstiges	27
3.3	Aufbauten für die verschiedenen Belastungsarten	28
3.3.1	Statische Belastung	28
3.3.2	Dynamische Belastung	28
3.3.3	Quasi-statische Belastung	29
3.3.3.1	Zellchemie	32
3.3.3.2	Kapazitäten	33
3.3.3.3	Gehäusegeometrie und Inertatmosphäre	33
3.3.4	Kombinierte Belastungen	35
3.3.4.1	Explosionsfähige Atmosphären	35
3.3.4.2	Nachbildung der quasi-statischen Belastung	35

4	Auswertungsmethoden	37
4.1	Dehnung	37
4.2	Druck	40
4.3	Energiemenge der Lithium-Ionen-Batterie	41
4.4	Reproduzierbarkeit	42
5	Ergebnisse	43
5.1	Statische und dynamische Belastung	43
5.1.1	Statische Belastung	43
5.1.2	Dynamische Belastung	45
5.1.3	Vergleich der statischen und dynamischen Belastung	47
5.2	Quasi-statische Belastung	50
5.2.1	Zellchemie	52
5.2.2	Kapazitäten	54
5.2.3	Gehäusegeometrie und Inertatmosphäre	55
5.3	Kombinierte Belastungen	62
5.3.1	Explosionsfähige Atmosphären	62
5.3.2	Nachbildung der quasi-statischen Belastung	63
5.4	Vergleich der quasi-statischen Belastung mit anderen Belastungen	66
5.4.1	Vergleich der dynamischen Belastungen	66
5.4.2	Einordnung der quasi-statischen Belastung	68
5.4.3	Druckfestigkeit der druckfesten Kapselung	69
6	Zusammenfassung und Ausblick	71
A	Anhang	I
A.1	Fachliche Ergänzungen	I
A.1.1	Versuchsdaten	I
A.1.2	Beschleunigungsempfindlichkeiten von Drucksensoren	X
A.1.3	Methode zum Hervorrufen des thermischen Durchgehens	X
A.2	Wissenschaftliche Vita	XII
A.3	Eidesstattliche Erklärung	XV
A.4	Danksagung	XVI
V	Verzeichnisse	XVIII
V.1	Abkürzungen	XVIII
V.2	Abbildungen	XX
V.3	Tabellen	XXI
V.4	Gleichungen	XXII
V.5	Geräte	XXIII
V.6	Literatur	XXIV

Hinweise für den Leser

In der digitalen PDF-Version dieser Arbeit sind Verweise mit einer hellgrünen Umrandung gekennzeichnet. Durch einen Mausklick, wird zu dem entsprechenden Verweis gesprungen. In der Papierversion sind die Umrandungen nicht dargestellt. In dieser Arbeit werden die verwendeten Geräte in einem gesonderten Verzeichnis „Geräte“ im Anhang in Abschnitt V.5 aufgeführt. Im Text wird auf dieses Verzeichnis verwiesen indem in Klammern „G-“ mit der entsprechenden Gerätenummer genannt wird.

1. Einleitung

Die Lithium-Ionen-Batterie (LIB) ist aus der heutigen Zeit nicht mehr wegzudenken. Prognosen sagen voraus, dass der weltweite Batteriebedarf jährlich um 25 % steigen wird und 2030 der wirtschaftliche Wert von Batterien 130 Milliarden bis 185 Milliarden US-Dollar beträgt [1]. LIBs erreichen immer mehr Einsatzgebiete und werden auch in explosionsgeschützten Bereichen verwendet. In diesen besonders gesicherten Bereichen müssen explosionsgeschützte Geräte verwendet werden, um die Zündung explosionsfähiger Atmosphären zu verhindern. Geschieht dies nicht, kann es im Falle einer Explosion zu einem verheerenden Personen- oder Sachschaden kommen. Um für diesen Fall vorzusorgen, ist es die Aufgabe des konstruktiven Explosionsschutzes, die Auswirkungen einer Explosion zu beschränken [2]. Um dies zu realisieren, können verschiedene Zündschutzarten, z. B. sogenannte „Druckfeste Kapselung“, angewendet werden. Druckfeste Kapselungen sind Gehäuse, welche so konstruiert sind, dass eine Explosion im Inneren nicht nach außen dringen und diese auch keine explosionsfähige Atmosphäre außerhalb zünden kann. Bei dem Einsatz von LIBs muss u. a. bei dieser Zündschutzart sichergestellt werden, dass kein Elektrolyt freigesetzt wird, wobei es sich i. d. R. nicht um ein klar definiertes brennbares Gasgemisch handelt [3, 4]. Die Freisetzung des Elektrolyten lässt nämlich auf ein späteres thermisches Durchgehen der LIB schließen, welches verhindert werden soll [5]. Wird diese Bedingung z. B. durch Sicherheits- und Überwachungseinrichtungen erfüllt, gibt es keine Begrenzungen für die Verwendung von LIBs in druckfesten Kapselungen. Es wurde bereits bewiesen, dass eine druckfeste Kapselung bei dem thermischen Durchgehen, thermal runaway (TR), einer LIB versagen und dies zu einer verheerenden Explosion führen kann (siehe Abschnitt 2.3) [6].

Die Ausfallrate von LIBs kann aufgrund fehlender Datenlage nicht konkret eingeschätzt werden. Dennoch zeigen vergangene Ereignisse, dass es sich bei einem Ausfall um ein mögliches Szenario handelt. Dieses geringe, aber sicherheitsrelevante Risiko kann auch bei dem Einsatz von Sicherheitseinrichtungen nicht komplett ausgeschlossen werden [7, 8]. Die Wahrscheinlichkeit eines verheerenden Unfalls steigt, je mehr LIBs in einer druckfesten Kapselung eingesetzt werden. Ebenso steigt die Gefahr bei gealterten LIBs, bei Fehlgebrauch oder wenn die Umgebungsbedingungen nicht optimal sind [9].

In dieser Arbeit wird das TR einer LIB in einer druckfesten Kapselung unter Betrachtung verschiedener Parameter untersucht. Mittels dieser Informationen wird eine Anpassung der Norm IEC 60079-1 [4] angestrebt, um zukünftig LIBs sicher in druckfesten Kapselungen einsetzen zu können. Diese sollen nicht nur einer Gasexplosion standhalten, sondern auch dem TR einer LIB. Um die Beanspruchung

einer thermisch durchgehenden LIB einzuordnen, werden in dieser Arbeit die bekannten Belastungsarten aus der Prüfung der Druckfestigkeit von druckfesten Kapselungen nach IEC 60079-1 [4] betrachtet. Es handelt sich dabei um eine statische Belastung, welche hier durch Wasserdruck erzeugt wird, und eine dynamische Belastung in Form einer Gasexplosion. Die druckfeste Kapselung wird durch die dynamische Belastung thermisch beansprucht, bei einer statischen Belastung trifft dies nicht zu. Im statischen Fall wird die druckfeste Kapselung langsamer (Druckanstiegszeit ist nicht relevant), aber dafür deutlich länger, über mehrere Sekunden, als im dynamischen Fall beansprucht [4]. Bei der dynamischen Belastung beläuft sich die zeitliche Beanspruchung nur auf die Dauer der Gasexplosion [10]. Dies bedeutet bei einer Deflagration einige Millisekunden bis zu etwa einer Sekunde [2]. Das TR einer LIB beansprucht die druckfeste Kapselung zwar auch thermisch, aber die Belastung ist ggf. langsamer als bei einer Gasexplosion [11]. Die Beanspruchung durch eine thermisch durchgehende LIB liegt demnach zwischen diesen beiden Extremen von statischer und dynamischer Beanspruchung und wird in dieser Arbeit deshalb als „quasi-statische“ Belastung bezeichnet.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Belastung einer druckfesten Kapselung durch eine thermisch durchgehende LIB mit den Belastungen durch die normativ vorgegebenen Prüfungen zu vergleichen. Es soll eine Methode entwickelt werden, um abzuschätzen, inwieweit eine druckfeste Kapselung dieser Belastung standhält und wie diese dafür konstruiert werden muss. Dazu werden verschiedene Einflussparameter auf die Belastung der druckfesten Kapselung durch das TR einer LIB, welches mittels Überhitzen hervorgerufen wird, untersucht. Als Parameter der LIB werden in dieser Arbeit die Zellchemie und die Kapazität variiert. Des Weiteren werden Einflussparameter der druckfesten Kapselung in Bezug auf die Konstruktion und der inneren Gasgemischzusammensetzung untersucht. Zukünftig wäre es sinnvoll, auf zerstörerische Versuche mit thermischen durchgehenden LIBs verzichten zu können. Deshalb sollen im Rahmen dieser Arbeit die Druckverläufe des TR mittels Gasexplosionen nachgebildet werden.

Diese Arbeit konzentriert sich auf die im Explosionsschutz praxisnahen und relevanten Größen wie den Explosionsdruck p_{ex} infolge einer Gasexplosion oder des TR einer LIB, den zeitlichen Explosionsdruckanstieg $(dp/dt)_{ex}$ und den K_G - bzw. K_{LIB} -Wert.

2. Grundlagen

In diesem Kapitel sind die Grundlagen erläutert, welche für das Verständnis dieser Arbeit relevant sind. Es werden Grundlagen zum Thema Explosionsschutz und zu Lithium-Ionen-Batterien (LIBs) erläutert, um anschließend auf deren Einsatz in druckfesten Kapselungen einzugehen. Des Weiteren werden die Grundlagen zu verschiedenen Messtechniken vermittelt.

2.1. Explosionsschutz

Eine Explosion ist eine sehr schnelle chemische oder physikalische induzierte Reaktion, welche mit einer starken Volumenvergrößerung bzw. einem entsprechenden Druck einhergeht. Eine physikalische Reaktion wäre beispielsweise ein Auseinanderreißen eines mit Gas gefüllten Behälters, welcher dem inneren Druck nicht standhalten kann. Bei Explosionen wird neben der Reaktionsart auch zwischen der Reaktionsgeschwindigkeit und dem Medium separiert. Handelt es sich um Raumexplosionen, wird zwischen Gas- und Staubexplosionen unterschieden. In beiden Fällen muss das Medium in einer gewissen Konzentration und ein Oxidationsmittel, z. B. Luft, vorhanden sein, damit eine Zündquelle eine Explosion hervorrufen kann. Das Prinzip wird durch das sogenannte Explosionsdreieck veranschaulicht, wie in Abb. 2.1 zu sehen.

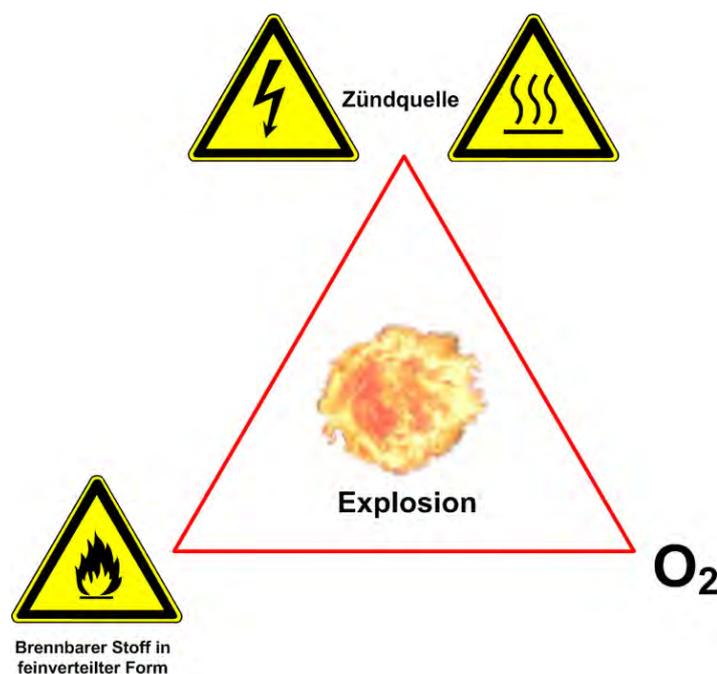


Abb. 2.1.: Explosionsdreieck [12]

Die Grenzwerte der Konzentration des Mediums, welche zu einer Explosion führen können, werden als untere und obere Explosionsgrenze bezeichnet. Innerhalb dieser Grenzen handelt es sich um ein explosionsfähiges Gemisch. Neben Gasen und Stäuben können auch andere explosionsfähige Stoffe, wie Sprengstoff, zu einer Explosion führen. Diese benötigen im Vergleich zu den Raumexplosionen kein zusätzliches Oxidationsmittel um zu zünden. Als Zündquellen können u. a. offene Flammen, elektrische Entladungen, heiße Oberflächen oder elektromagnetische Strahlung in Betracht kommen.

Bei der Reaktionsgeschwindigkeit wird zwischen Verpuffung, Deflagration und Detonation unterschieden. Die Verpuffung ist die Reaktion mit der langsamsten Geschwindigkeit unterhalb von 1 m/s, wobei es nicht zu einer relevanten Druckerhöhung kommt. Bei der Deflagration wird durch die schnelle Volumenvergrößerung ein Explosionsdruck i. d. R. zwischen 7 bar und 14 bar erzeugt. Die Reaktionsgeschwindigkeit liegt dabei in Luft unter Normalbedingungen unterhalb von 330 m/s, also unterhalb der Schallgeschwindigkeit. Bei Detonationen wird Überschallgeschwindigkeit erreicht. Durch den Verdichtungsstoß können dabei Drücke von 1000 bar erreicht werden [13, 14].

Um das Ausmaß einer Explosion einzuschätzen, gibt es eine Reihe von sicherheitstechnischen Kenngrößen von denen im Folgenden drei von diesen, die vor allem für Gasexplosionen relevant sind, vorgestellt werden. Tabelle 2.1 zeigt einige Kennzahlen für verschiedene Brenngase aus der Norm IEC 60079-1.

Brenngas in Luft	p_{\max} in bar	$(dp/dt)_{\max}$ in bar/s	K_G -Wert in bar · m/s
Wasserstoff (H ₂)	7,3 (29,5 Vol.-%)	3233,6 (30 Vol.-%, 141)	779,3 (bestimmt aus $(dp/dt)_{\max}$)
Propan (C ₃ H ₈)	8,4 (4 Vol.-%)	271-380 (4,6 Vol.-%, 22-2,56 l)	97,5 (4,51 Vol.-%, 24,85 °C)
Methan (CH ₄)	7,1 (9,5 Vol.-%)	277,4 (10 Vol.-%, 201)	75,3 (bestimmt aus $(dp/dt)_{\max}$)
Äthylen (C ₂ H ₄)	8,7 (6,5 Vol.-%)	826,6 (8 Vol.-%, 201)	224,4 (bestimmt aus $(dp/dt)_{\max}$)
Acetylen (C ₂ H ₂)	10,1 (7,7 Vol.-%)	824	-

Tabelle 2.1.: Einige sicherheitstechnische Kennzahlen von Brenngas-Luft-Gemischen aus der Norm IEC 60079-1 bei atmosphärischem Vordruck und 20°C [4, 10, 14, 15].

In Klammer ist die jeweilige Brenngaskonzentration in Luft, Behältervolumen oder Anfangstemperatur angegeben.

Der maximale Explosionsdruck p_{\max} ist als Überdruck zu verstehen.

Der Explosionsdruck p_{ex} ist der zeitlich höchste auftretende Druck während einer Explosion. Der maximale Explosionsdruck p_{max} bezeichnet den Maximalwert aller Explosionsdrücke eines Brennstoffes bezeichnet. Von diesem Wert kann beispielsweise das Schadensausmaß abgeschätzt werden, wenn eine Druckwelle auf ein Objekt oder eine Person trifft. Bei Gasexplosionen wird der maximale Explosionsdruck bei leicht überstöchiometrischen Gemischen von Brenngas und Oxidationsmittel erhalten [2, 14].

Der höchste zeitliche Explosionsdruckanstieg $(dp/dt)_{\text{ex}}$ ist ein Maß für die Reaktionsgeschwindigkeit der Explosion. Diese beschreibt, wie schnell der Druck maximal zeitlich steigt und somit, wie stark der Druckstoß der Explosion ist. Bei der Konzentration eines Brennstoffes, aus welcher der höchste zeitliche Explosionsdruckanstieg folgt, wird dieser als $(dp/dt)_{\text{max}}$ bezeichnet. Nach der Norm IEC 60079-1 wird $(dp/dt)_{\text{ex}}$, wie in Abb. 2.2 dargestellt, ermittelt. Sie wird durch den Druckanstieg innerhalb der Zeit zwischen 10 % und 90 % des Explosionsdruckes bestimmt. Das verwendete Zeitintervall wird dabei als Druckanstiegszeit (DAZ) bezeichnet [2, 4]. Eine weitere Methode zur Ermittlung von $(dp/dt)_{\text{ex}}$ ist die Bestimmung der maximalen zeitlichen Steigung des Druckverlaufs durch mehrere Differenziale über verschiedene Zeitintervalle [17]. Der maximale zeitliche Explosionsdruckanstieg $(dp/dt)_{\text{max}}$ ist maßgeblich von der Geometrie und dem freien Volumen der Umgebungsbedingungen abhängig. Die Abhängigkeit von dem freien Volumen V_{frei} kann durch den K_i -Wert nach Gleichung 2.1 ausgedrückt werden. Durch dieses sogenannte kubische Gesetz wird $(dp/dt)_{\text{ex}}$ bzw. $(dp/dt)_{\text{max}}$ auf ein Volumen von 1 m^3 normiert. Handelt es sich um eine Gasexplosion, wird

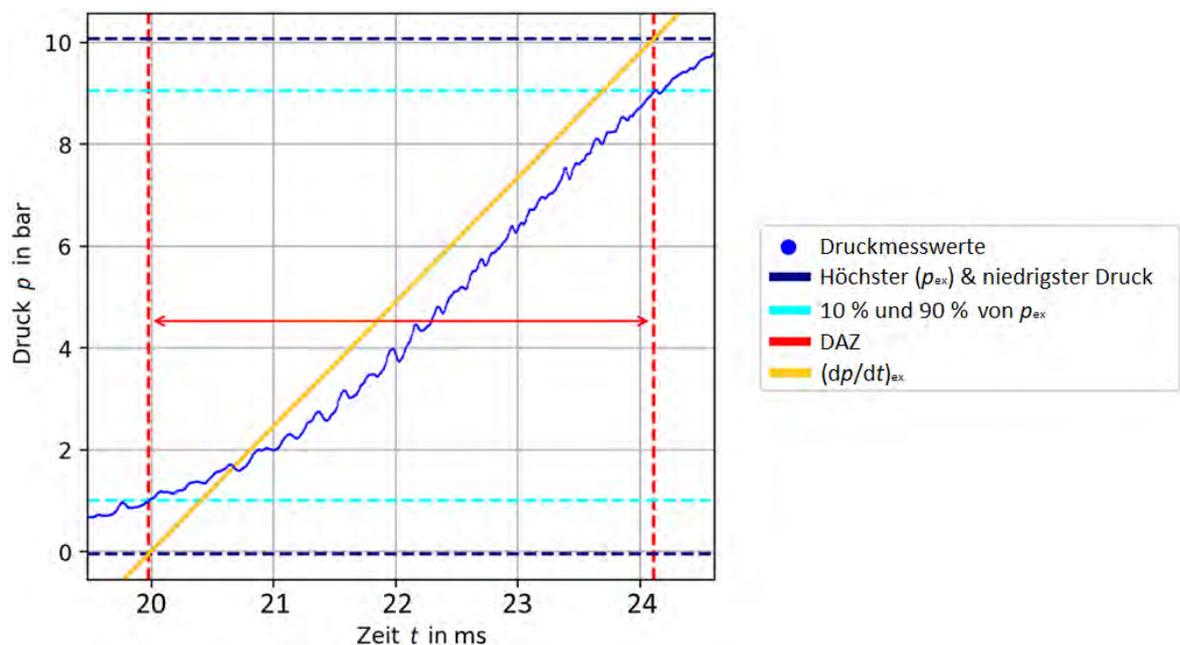


Abb. 2.2.: Bestimmung von $(dp/dt)_{\text{ex}}$ und der DAZ
(in Anlehnung an Abb. 4 aus [16])

dies durch ein „G“ im Index kenntlich gemacht. Dieses Gesetz gilt allerdings nur, wenn außer dem Volumen alle restlichen Einflussgrößen, z. B. Druck, Temperatur und Turbulenzen, nicht verändert werden und nicht von dem freien Volumen abhängig sind. Untersuchungen haben hingegen bereits gezeigt, dass der K_G -Wert offensichtlich volumenabhängig ist. Es wird ebenso davon ausgegangen, dass $(dp/dt)_{\max}$ proportional zu dem Verhältnis zwischen innerer Oberfläche und freiem Volumen des Gehäuses ist [2, 13, 14, 18].

$$K_i = \left(\frac{dp}{dt} \right)_{\max} \cdot \sqrt[3]{V_{\text{frei}}} \quad (2.1)$$

Die Kennzahlen sind neben der Gemischzusammensetzung u. a. auch abhängig von Ausgangstemperatur, Zündquelle und Vordruck (dem Ausgangsdruck des Gemisches). Erhöht sich beispielsweise der Vordruck, so steigt der Explosionsdruck, $(dp/dt)_{\text{ex}}$ und der K_i -Wert [13, 18].

Tritt eine Gasexplosion in einem Gehäuse komplexer Geometrie auf, können Drucküberhöhungen, pressure piling (PP), entstehen. Eine komplexe Geometrie beschreibt ein Gehäuse mit Einbauten oder mehreren Teilräumen, die miteinander verbunden sind. Im Falle von PP können die sicherheitstechnischen Kennzahlen um ein Vielfaches höher sein als bei einer einfachen Geometrie. Daraus entstehend wird durch die komplexe Geometrie unverbranntes Gas vorkomprimiert, wodurch ein starker Druck aufgebaut wird. Nach der Norm IEC 60079-1 wird PP angenommen, wenn die Explosionsdrücke mehrerer Versuche um mehr als einen Faktor von 1,5 voneinander abweichen oder eine DAZ kleiner als 5 ms auftritt [4, 19, 20].

Um die Umwelt vor einer möglichen Explosion zu schützen, können verschiedene Maßnahmen ergriffen werden. Bei dem primären Explosionsschutz wird explosionsfähiges Gemisch verhindert, beim sekundären wird das Vorhandensein von Zündquellen ausgeschlossen. Beim tertiären bzw. konstruktiven Explosionsschutz darf innerhalb eines bestimmten Bereiches eine Explosion stattfinden, ohne dass diese den Bereich verlässt. Dazu kann die Zündschutzart „Druckfeste Kapselung“ (Ex „d“) nach der Norm IEC 60079-1 angewendet werden. Eine Prinzipskizze ist in Abb. 2.3 dargestellt. Der Bereich, in dem Zündquelle und explosionsfähige Atmosphäre aufeinander treffen könnten, wird in einem Gehäuse eingeschlossen, das im Falle einer Explosion dem Druck standhalten kann. Eine druckfeste Kapselung weist eine hohe Wandstärke auf, um dem Druck standhalten zu können. Außerdem hat diese so lange und dünne Spalte, dass heiße Explosionsgase abgekühlt werden können, sodass eine explosionsfähige Atmosphäre außerhalb der druckfesten Kapselung nicht entzündet werden kann. Um die Druckfestigkeit einer druckfesten Kapselung nachzuweisen, muss zunächst eine sogenannte Bezugsdruckmessung mittels einer Gasexplosion durchgeführt werden. Der höchste entstehende Explosionsdruck ist der sogenannte Bezugsdruck.

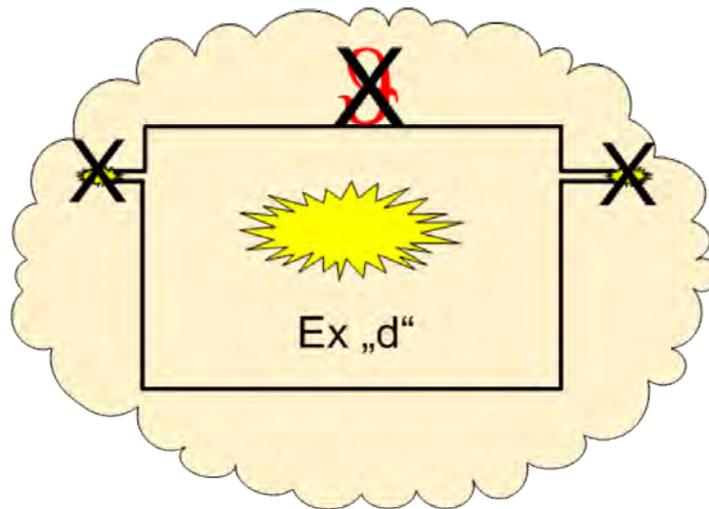


Abb. 2.3.: Prinzip einer druckfesten Kapselung [21]

Der Druckverlauf wird dabei mit einem Tiefpassfilter von 5 kHz geglättet. Bei der anschließenden Überdruckprüfung muss ein bestimmter Prozentsatz des Bezugsdrucks als Überdruck erreicht werden. Diese Prüfung kann entweder statisch, beispielsweise durch Wasserdruck, oder dynamisch durch Gasexplosionen durchgeführt werden. Die beiden Methoden werden in der Norm als gleichwertig angesehen. Um im dynamischen Fall den erforderlichen Explosionsdruck zu erreichen, kann das Gasgemisch im Vorfeld komprimiert werden, sodass ein gewisser Vordruck in der druckfesten Kapselung herrscht. Die Prüfung gilt als bestanden, wenn während der Prüfung weder plastische Verformungen noch Beschädigungen aufgetreten sind [2, 4].

Der Explosionsdruck ist daher der entscheidende Faktor bei dieser Prüfung. Generell hängt der Druck p bei einer Gasexplosion innerhalb eines Gehäuses von der Anzahl der Gasteilchen pro Volumen V und der Temperatur T ab. Dieser Zusammenhang wird durch das universelle Gasgesetz, auch ideales Gasgesetz genannt, nach Gleichung 2.2 ausgedrückt. R ist dabei die universelle Gaskonstante und n die Stoffmenge. Gleichung 2.2 gilt für ideales Gas, das bedeutet, dass das Gas keinen Wechselwirkungen unterworfen ist und sich im thermodynamischen Gleichgewicht befindet. Ein Gleichgewichtszustand ist dann gegeben, wenn sich die Gaseigenschaften, u. a. Volumen und Temperatur, zeitunabhängig verhalten. Alle Stöße der Teilchen, die hier als Kugeln betrachtet werden, sind elastisch und Wechselwirkungen treten ausschließlich bei Stößen im direkten Kontakt auf [14, 22, 23].

$$p \cdot V = R \cdot n \cdot T \quad (2.2)$$

Um generell den entstehenden Druck einer Gasexplosion innerhalb eines Gehäuses zu senken, können Druckentlastungselemente verwendet werden. Bei diesen

Elementen handelt es sich um konstruktive Maßnahmen, welche dafür sorgen, dass bei einer Explosion das Gehäuse geöffnet wird. Die Öffnung kann dabei kurzfristig oder dauerhaft erfolgen [13, 24]. Dadurch wird u. a. das verfügbare Volumen vergrößert, wodurch der Druck gesenkt wird, siehe Gleichung 2.2. Der reduzierte Explosionsdruck ist dabei maßgeblich von der wirksamen Entlastungsfläche abhängig. Bei druckfesten Kapselungen muss sichergestellt sein, dass durch die Öffnung die Zünddurchschlagssicherheit nicht beeinträchtigt wird. Das heißt, dass der Vorgang flammenlos ablaufen muss. Dazu können hinter der Entlastungsfläche flammenlöschende Elemente eingebaut werden, welche durch enge Spalte dafür sorgen, dass die Flamme gestreckt und dadurch gekühlt wird [25]. Durch diese Elemente wird die Geschwindigkeit der Gasteilchen verlangsamt, also die Temperatur gesenkt, wodurch wiederum nach Gleichung 2.2 der Druck reduziert wird. Diese neuartige Konstruktionsweise von druckfesten Kapselungen ist bereits auf dem Markt verfügbar [26].

2.2. Lithium-Ionen-Batterie

Lithium-Ionen-Batterien (LIBs) sind beliebte Energiespeicher, dessen Marktgröße weiter wächst. Zwischen 2022 und 2027 wird ihnen eine wirtschaftliche Wachstumsrate von 20 % und 2027 eine Marktgröße von 200 Milliarden US-Dollar vorhergesagt [27]. Aus dem heutigen Alltag sind LIBs nicht mehr wegzudenken. Sie befinden sich in Smartphones, Laptops oder in elektrischen Fahrzeugen und erreichen immer mehr Anwendungsgebiete. Im Vergleich zu anderen Energiespeichern haben LIBs einige Vorteile: geringe Selbstentladung, hoher Wirkungsgrad, hohe Energie- und Leistungsdichte mit einem zugleich geringen Gewicht. Allerdings kann von LIBs eine Brand- bzw. Explosionsgefahr ausgehen. Die Leistungsfähigkeit und Alterung ist bei LIBs von der Temperatur abhängig. Außerdem werden für die Produktion von LIBs knappe Ressourcen verwendet. Dieses Problem könnte sich durch entsprechendes Recycling lösen lassen, allerdings erfolgt die Verwertung bisher nur in geringem Maße. Die erste LIB wurde 1972 auf den Markt gebracht. Dabei handelte es sich um eine nicht wiederaufladbare Batterie (Primärbatterie). 1991 kam dann die erste wiederaufladbare LIB (Sekundärbatterie), auch Akkumulator genannt, in den Handel [5, 28].

Im Folgenden werden verschiedene Kenngrößen von LIBs vorgestellt. Die Menge an elektrischer Ladung, welche eine LIB abgeben kann, wird als Kapazität bezeichnet. Sie wird in Amperestunden (Ah) angegeben und hängt von Strom, Spannung, Temperatur und Aktivmaterial ab. Ermittelt werden kann die Kapazität einer LIB durch eine kontrollierte Entladung. Beim Laden einer LIB ist i. d. R. von C-Raten die Rede. Diese Größe beschreibt die Ladegeschwindigkeit. Bei einer Aufladung mit 1 C

ist eine „leere“ LIB (es kann kein Strom mehr abgegeben werden, da die LIB entladen ist) innerhalb einer Stunde vollständig aufgeladen. Die Spannung wird in Volt (V) angegeben und beschreibt die Arbeit, die verrichtet werden muss, um in einem elektrischen Feld eine Ladung zu verschieben. Die Ladeschlussspannung bezeichnet diejenige Spannung, ab welcher die LIB aus sicherheitstechnischen Gründen nicht mehr weiter geladen werden darf. Das Produkt aus Strom und Spannung beschreibt die Leistung einer LIB in der Einheit Watt (W). Aus der Kapazität C und der Spannung U kann die Energie der LIB E_{LIB} nach Gleichung 2.3 bestimmt werden. Diese wird in Wattstunden (Wh) angegeben. Aus ihr kann die spezifische Energie, bezogen auf das Gewicht der LIB, und die Energiedichte, bezogen auf das Volumen, ermittelt werden [3, 5, 29, 30].

$$E_{\text{LIB}} = U \cdot C \quad (2.3)$$

Eine LIB besteht, wie in Abb. 2.4 dargestellt, u. a. aus zwei Elektroden, der Anode und der Kathode. Zwischen diesen befindet sich ein Elektrolyt, welches Ionen von der Anode zur Kathode und umgekehrt transportieren kann. Um die Elektroden dabei voneinander zu isolieren, befindet sich zwischen diesen eine poröse Membran, der sogenannte Separator. Beim Entladen werden Lithium-Ionen aus der negativen

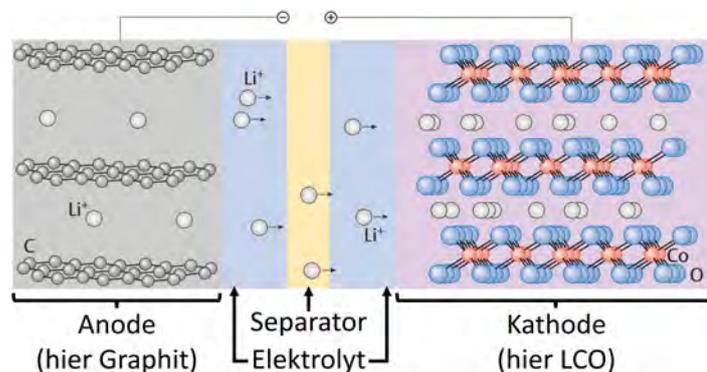


Abb. 2.4.: Aufbau und Prinzip einer LIB
(in Anlehnung an Abb. 22.14 aus [31])

Elektrode (Anode) zur positiven Elektrode (Kathode) weitergeleitet, wodurch ein elektrischer Strom erzeugt wird. Beim Aufladen geschieht dieser Vorgang umgekehrt. Als Material für die negative Elektrode kann z. B. Graphit (Kohlenstoff) verwendet werden. Das Material der positiven Elektrode liefert durch das Lithium die erforderlichen Ionen und definiert die Zellchemie der LIB. Das klassische Material der Kathode ist Lithium-Kobaltoxid (LCO). Es gibt aber auch kommerzielle Alternativen: Lithium-Manganoxid (LMO), Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminiumoxid (NCA), Lithium-Eisenphosphat (LFP) und Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid (NMC). Steht hinter der Abkürzung einer Zellchemie eine dreistellige Zahl z. B. NMC811, dann gibt diese die prozentualen Anteile der Einzelbestandteile an z. B. 80% Nickel, 10% Mangan und 10% Kobalt. Typische Verhältnisse bei

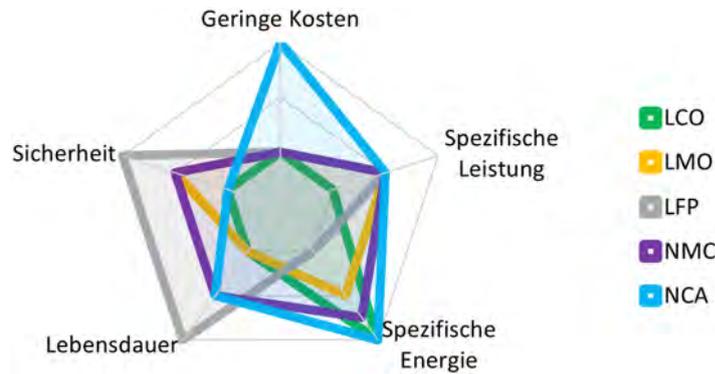


Abb. 2.5.: Eigenschaften von LIBs verschiedener Zellchemie [32]

NMC-Zellen sind 811, 622 oder 111. Mehrere relevante Eigenschaften einiger Kathodenmaterialien sind in Abb. 2.5 dargestellt. LFP-Zellen gelten unter den verschiedenen Zellchemien als sehr sicher. Eine Explosion ist aufgrund des fehlenden Oxids zur Sauerstofffreisetzung nahezu unmöglich. Außerdem ist diese Zellchemie bei höheren Temperaturen thermisch stabiler als die anderen Materialien. Ein weiterer Vorteil von LFP-Zellen im Vergleich zu den anderen Zellchemien ist deren Lebensdauer. Die LCO-Zellen schneiden im Bezug auf die Lebensdauer mitunter am schlechtesten ab. Infolge einer Überladung kann das Kobaltoxid mit dem Elektrolyten reagieren, wodurch ein Verlust an Leistung, Kapazität und Lebensdauer entstehen kann. Dabei reicht eine geringfügige Überladung aus. Diese kann leicht vorkommen, da der Unterschied zwischen normalem Laden und Überladen nur geringe Spannungswerte beträgt. Im Bezug auf die Kosten haben die LIBs der Zellchemie NCA einen Vorteil gegenüber den anderen LIBs aus Abb. 2.5. Die Zellchemien LCO, LMO, NMC und NCA erreichen aufgrund ihres Oxidanteils höhere spezifische Energien als die LFP-Zellen. Hinsichtlich der spezifischen Leistung haben die LCO-Zellen einen Nachteil gegenüber den anderen LIBs. Durch die verschiedenen Eigenschaften der unterschiedlichen Zellchemien ist die Wahl der sinnvollsten LIB von der jeweiligen Anwendung, z. B. Elektromobilität oder stationäre Speicherung, abhängig [5, 32].

Als Zelle wird die Anordnung aus u. a. Elektroden, Elektroyt und Umhüllung bezeichnet. Der Begriff Batterie bezeichnet eine oder mehrere Zellen, welche mit den zur Verwendung nötigen Einrichtungen, z. B. Anschlüssen, Kennzeichnung und Schutzeinrichtungen, ausgestattet ist. Es gibt verschiedene Bauformate um eine LIB zu konstruieren. Hardcase-Gehäuse bestehen aus festem Metall und können entweder in einem zylindrischen oder prismatischen Format gefertigt werden. Als Alternative kann auch metallische Folie verwendet werden. In diesem Fall handelt es sich um Pouch-Zellen. Allerdings sind die zylindrischen Rundzellen im 18650-Format die am Markt verbreitetsten. Die Zahlenfolge 18650 beschreibt dabei die Abmessungen der LIB, mit einem Durchmesser von 18 mm und einer Länge von 65,0 mm [3, 5, 33].

Der sicherheitstechnisch kritischste Fehlerfall einer wiederaufladbaren Batterie ist das thermische Durchgehen, thermal runaway (TR). Dabei entsteht ein unkontrollierbarer Temperaturanstieg infolge exothermer Reaktionen, wodurch toxische und brennbare Gase freigesetzt werden können und es zu einem Brand oder sogar einer Explosion kommen kann [34]. Dabei kann das Sechs- bis Zehnfache der elektrisch gespeicherten Energie frei gesetzt werden [35]. Ein Temperaturanstieg kann zu einer thermischen Zersetzung der Komponenten führen, wodurch die Temperatur weiter steigt und wiederum weitere Komponenten zersetzt werden können. Diese Reaktion ist selbstbeschleunigend und schwer kontrollierbar. Es kann dadurch auch zu einem Druckanstieg infolge einer Explosion kommen [5]. Bei der Zersetzung des Elektrolyten können, je nach Zusammensetzung, u. a. Flusssäure und weitere toxische und brennbare Gase, wie Wasserstoff, Kohlendioxid und -monoxid, freigesetzt werden. I. d. R. wird von zwei bis drei Litern Gasfreisetzung pro Amperestunde ausgegangen [36]. An der Kathode wird bei dessen Zersetzung Sauerstoff frei, wodurch eine starke exotherme Oxidation des Elektrolyten verursacht wird. Dies kann schließlich zu einem Brand führen, der nur schwer zu Löschen ist [5]. Durch die hohen Temperaturen und die Freisetzung von brennbaren Gasen und Sauerstoff bringt die LIB beim TR alle Komponenten mit, um weiter zu brennen oder ggf. zu explodieren. Im Bezug auf die Sauerstofffreigabe an der Kathode können die Zellchemien, wie erwähnt, sicherheitstechnisch eingeordnet werden: Im Vergleich gibt eine LCO-Zelle mehr Sauerstoff ab als eine LMO-Zelle. Aufgrund des fehlenden Oxids bei einer LFP-Zelle gibt diese den vergleichsweise geringsten Anteil an Sauerstoff frei [5]. Das TR kann durch verschiedenste externe und interne Ursachen hervorgerufen werden, wie in Abb. 2.6 dargestellt. Extern kann dieses beispielsweise mechanisch (Penetration/Verformung), elektrisch (Überladen/Kurzschluss) oder thermisch (Überhitzen) hervorgerufen werden. Abb. 2.6 zeigt außer den möglichen Ursachen auch vergangene Unfälle. Bislang gibt es keine repräsentative Methode, um reale Ausfälle durch einen internen Kurzschluss nachzuahmen. Aus diesem Grund wird häufig auf externe Methoden zurückgegriffen [34]. Bei dem Vergleich zwischen Überhitzen, Überladen und Nagelpenetration entstehen unterschiedlich hohe Drücke, Druckanstiegszeiten und freigesetzte Gasmengen beim TR [38]. Für NMC-Zellen mit einer Kapazität von 60 Ah wurde gezeigt, dass beim Überladen höhere Drücke entstehen als bei den anderen Methoden. Als Bauformen wurden dabei Pouch- und prismatische LIBs verwendet [38]. Das Auftreten und das Ausmaß des TR wird dabei von einigen Faktoren beeinflusst, dazu zählen u. a. der Ladezustand der LIB, deren Alterungszustand, deren Energiemenge und ggf. die C-Rate [34, 39]. Die Ausfallrate von LIBs kann aufgrund von fehlenden Statistiken nur geschätzt werden. In LARSSON werden mehrere Quellen genannt, bei denen die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls mit kleiner als 1:1 Million abgeschätzt wird [8]. Detaillierte Informationen sind in den zusammengefassten

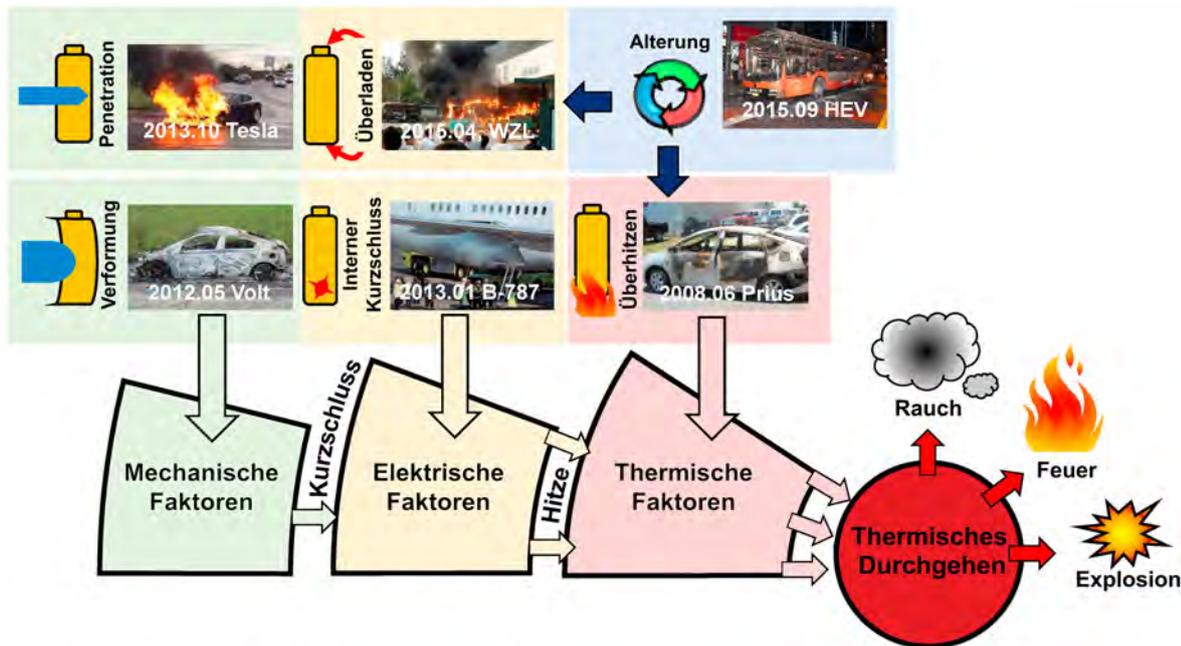


Abb. 2.6.: Ursachen für ein TR (in Anlehnung an [37])

Quellen nicht vorhanden. Die gleiche Ausfallrate wird auch von MEIER U. A. genannt [40]. Dort ist die Rede von nicht wiederherstellbaren Ausfällen, wobei das TR bei jedem zweiten Ausfall angenommen wird. DOUGHTY U. A. schätzt auf Grundlage weiterer Literatur die Ausfallrate trotz Sicherheitseinrichtungen, wie einem Batteriemanagementsystem, auf weniger als 1 : 10 Millionen bzw. auf weniger als 1 : 40 Millionen ein [7]. Besorgniserregende Zahlen liefert eine Literaturquelle aus der Flugzeugsicherheit [41]. Dort kam es bei 250.000 Flugstunden zu 3 Ereignissen bei denen die Zellen Wärme erzeugten. Dies entspricht einer Ausfallrate von ca. 1 : 83.000 Flugstunden. In der entsprechenden Musterzulassung wurde diese zuvor mit 1 : 10 Millionen Flugstunden abgeschätzt. Die Literatur zeigt eindeutig, dass eine Abschätzung der Ausfallrate von LIBs und damit deren Risikobewertung nur schwer möglich ist. Trotz dieser geringen Unfallquote stellen LIBs aufgrund des TR ein hohes Gefährdungspotential dar [42]. Dass dennoch diese geringe Unfallquote nicht unterschätzt werden sollte, zeigt beispielsweise die Anzahl der batterieassoziierten Brände in Vancouver, welche sich von 2016 bis 2022 verfünffacht hat [43].

Zwei der vielen Untersuchungen zum TR, die sich u. a. mit der Höhe des Drucks beschäftigen, werden im Folgenden genauer vorgestellt. In einer Untersuchung von WANG U. A. wurden LIBs der Zellchemien NMC811, NMC622, NMC523, NMC111 und LFP durch Überhitzen zum TR gebracht. Dabei hat sich gezeigt, dass die NMC811-Zellen den höchsten Explosionsdruck und den höchsten zeitlichen Explosionsdruckanstieg $(dp/dt)_{ex}$ verursacht haben. Die LFP-Zelle zeigte bei dieser Untersuchung die geringsten Werte [44]. Bei Untersuchungen von DUBANIEWICZ U. A. wurden NMC811-Zellen (18650, 3,2 Ah) und LFP-Zellen (26650, 3,8 Ah) durch Überhitzung zum TR gebracht. Für den Explosionsdruck p_{ex} wurden Regressionen

für die genannten LIBs über das Volumenverhältnis von freiem Volumen V_{frei} zu Zellvolumen V_{LIB} durchgeführt. Bei den NMC-Zellen wurden auch Regressionen für $(dp/dt)_{\text{ex}}$ und den K_{LIB} -Wert (siehe Gleichung 2.1) ermittelt. Bei diesen Versuchen war das Verhältnis zwischen freiem Volumen und Zellvolumen kleiner als 300. Die Regressionen für die NMC-Zellen sind in den Gleichungen 2.4 angegeben [11]. Die Versuchsdaten zu dieser Literaturquelle sind im Anhang in Tabelle A.9 zu finden. Dort sind zusätzlich auch die verwendeten inneren Oberflächen aufgeführt [45].

$$\begin{aligned} p_{\text{ex}} &= 1.019,4 \cdot (V_{\text{frei}}/V_{\text{LIB}})^{-0,824} \quad \text{bar} \\ (dp/dt)_{\text{ex}} &= 5.829,2 \cdot (V_{\text{frei}}/V_{\text{LIB}})^{-0,766} \quad \text{bar/s} \\ K_{\text{LIB}} &= 150,08 \cdot (V_{\text{frei}}/V_{\text{LIB}})^{-0,434} \quad \text{m} \cdot \text{bar/s} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Aktuelle Forschungsaktivitäten beschäftigen sich u. a. mit Sicherheitsvorkehrungen, um das TR zu verhindern. Dafür kann beispielsweise ein Shut-down-Separator in eine LIB eingesetzt werden. Dieser Separator schmilzt ab einer gewissen Temperatur und verhindert so einen Kontakt zwischen der Anode und der Kathode [5]. Auch Batteriemanagementsysteme, welche Spannung, Strom und Temperatur kontrollieren und managen, werden verwendet [7]. Diese können allerdings, so wie die LIB selbst, einem Ausfall unterliegen [46]. Aufgrund bisheriger Untersuchungen wird davon ausgegangen, dass es bei einer thermisch durchgehenden LIB innerhalb einer Inertatmosphäre, z. B. Stickstoff, durch den fehlenden Sauerstoff nicht zu einer Verbrennung, sondern lediglich zu einem Rauchausstoß kommt [47].

2.3. Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien in einer druckfesten Kapselung

In der Norm IEC 60079-0 und im Anhang der Norm IEC 60079-1 für druckfeste Kapselungen wird erläutert, unter welchen Bedingungen welche LIBs eingesetzt werden dürfen [3, 4]. Im Folgenden werden die relevanten normativen Anforderungen beschrieben. Eine entsprechende Kennzeichnung ist vorgeschrieben. Außerdem muss sichergestellt sein, dass die LIBs und ggf. deren Sicherheitseinrichtungen sicher befestigt sind und keine Relativbewegungen untereinander entstehen, welche die Zündschutzart beeinträchtigen könnten. Die LIBs dürfen nur in Reihe geschaltet werden und alle Zellen einer Batterie müssen dabei vom selben Typ und Hersteller sein. Dabei müssen Primärzellen von Sekundärzellen erkennbar unterschieden werden können. Es gibt eine Reihe von elektrochemischen Systemen, die für den Einsatz in druckfesten Kapselungen zulässig sind. Als positive Elektrode sind LCO, LFP, NCA, NMC

und LMO unter bestimmten Voraussetzungen erlaubt. Die negative Elektrode muss dabei entweder aus Kohlenstoff oder Lithium-Titan-Oxid bestehen. Als Elektrolyt sind nichtwässrige Lösungen oder Polimergele jeweils mit Lithium-Salz zulässig. Das Austreten des Elektrolyten muss verhindert werden, wenn dadurch die Zündschutzart oder sicherheitstechnische Bauteile beeinträchtigt würden. Deshalb dürfen die LIBs in einer druckfesten Kapselung im normalen Betrieb kein Elektrolysegas freisetzen. Der Betrieb oder Anschluss einer LIB in einer druckfesten Kapselung muss innerhalb der Herstellerangaben erfolgen. Beim Wiederaufladen von LIBs innerhalb einer druckfesten Kapselung muss dies durch eine geeignete Sicherheitseinrichtung nachgewiesen werden. Wenn die Überschreitung der Dauerbetriebstemperatur oder des maximalen Entladestroms nicht ausgeschlossen werden kann, muss so nah wie möglich an der LIB eine zusätzlich Sicherheitseinrichtung verwendet werden. Dafür können entweder ein bestimmter Widerstand bzw. eine Strombegrenzungseinrichtung oder eine bestimmte Sicherung zur Verhinderung der Überschreitung des maximalen Entladestroms und Zeitdauer nach Herstellerangaben zum Einsatz kommen. Wird eine LIB mit einer Kapazität oberhalb von 1,5 Ah verwendet oder weist diese ein höheres Volumen auf als 1 % des freien Volumens innerhalb der druckfesten Kapselung auf, dann sind zusätzliche Schutzeinrichtungen notwendig. Zum einen muss eine Zell- oder Ladungsumpolung verhindert werden. Dies kann durch die Überwachung der Zellspannung per Abschaltautomatik für die Versorgung umgesetzt werden. Ebenso ist die Verwendung von bestimmten Shunt-Dioden, welche die Spannung bei umgekehrter Polarität auf ein unkritisches Maß begrenzen, möglich. Zum anderen muss ein unbeabsichtigtes Laden der LIB durch andere Spannungsquellen innerhalb der druckfesten Kapselung unterbunden werden. Dafür muss die LIB von anderen Spannungsquellen, welches auch andere LIBs sein könnten, getrennt sein. Dies kann in Form von bestimmten Sperrdioden, bestimmten Anordnungen oder konstruktiven Maßnahmen innerhalb der druckfesten Kapselung geschehen. Des Weiteren muss beim Laden einer LIB sichergestellt werden, dass der Ladestrom abgeschaltet wird, sobald die LIB eine Spannung oberhalb der Herstellerangaben aufweist [3, 4].

Die genannten Vorgaben sollen dafür sorgen, dass kein TR innerhalb der druckfesten Kapselung stattfindet. Dass allerdings ein Ausfall und somit ein TR nicht vollständig ausgeschlossen werden kann, wurde in Abschnitt 2.2 bereits erläutert. Welch verheerendes Ausmaß ein solcher Unfall zur Folge hätte, zeigte ein Sicherheitstest für einen großen Automobilhersteller. Dabei wurde eine LIB mit 40 Ah, 3,7 V und einem Volumen von 0,36 l innerhalb einer druckfesten Kapselung mit einem freien Volumen von 3,4 l zum TR gebracht. Die Explosion dauerte Zehntelsekunden und das System wurde völlig zerstört. Der entstandene Explosionsdruck muss dabei über 50 bar betragen haben, da die druckfeste Kapselung vorher auf diesen Überdruck getestet

wurde und diesem standhielt. Die Vermutung liegt nahe, dass der tatsächliche Druck wesentlich höher war [6].

2.4. Messtechnik und deren Hintergründe

Im folgenden Abschnitt werden verschiedene physikalische Größen und die Art und Weise ihrer Messung vorgestellt. Bei der Messung der Größen ist relevant, wie sich die Messgröße zeitlich verändert. Bei statischen Prozessen ist der idealisierte Vorgang zeitlich unabhängig. Bei dynamischen Prozessen ist dies nicht der Fall [48].

2.4.1. Dehnung

Die mechanische Spannung σ eines Materials ist ein Maß für dessen Beanspruchung. Diese wird durch die Dehnung ε des Materials bestimmt. Die Beziehung zwischen Spannung und Dehnung kann durch ein genormtes Standardverfahren, dem Zugversuch, ermittelt werden. Die Fließgrenze beschreibt den Grenzbereich ab dem eine plastische Verformung, auch Fließen genannt, auftreten kann. Bei erhöhten Dehnungsgeschwindigkeiten kann die Festigkeit des Materials zunehmen und die Fließgrenze kann bei höheren Werten liegen. Wenn plastische Verformung aufgetreten ist, wird für eine weitere Verformung eine höhere Spannung bzw. Dehnung benötigt, als bei der im Vorfeld auftretenden Verformung. Dieser Effekt wird Kaltverfestigung genannt. Bei Werkstoffen, bei denen eine Fließgrenze ausgeprägt ist, wird diese (obere) Streckgrenze genannt. Bei Werkstoffen mit nicht ausgeprägter Fließgrenze kann die Grenze messtechnisch nicht eindeutig ermittelt werden. Deshalb wird häufig die 0,2 %-Dehngrenze ermittelt, wobei 0,2 % der Dehnung nach Entlastung des Materials erhalten bleiben. Abb. 2.7 zeigt den Unterschied zwischen einer ausgeprägten und einer nicht ausgeprägten Fließgrenze in einem Spannungs-Dehnungs-Diagramm. Unterhalb der Fließgrenze treten ausschließlich elastische Verformungen auf. In diesem Bereich, in dem plastische Verformung noch keine Rolle spielt, sind Dehnung und Spannung proportional zueinander und können durch das Hookesche Gesetz, siehe Gleichung 2.5, beschrieben werden. Der E-Modul des jeweiligen Werkstoffes ist dabei die Proportionalitätskonstante und beschreibt dessen elastisches Verformungsvermögen [48, 49, 50, 51, 52].

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad (2.5)$$

Im Rahmen der Festigkeitslehre kann die maximale Spannung σ im Zentrum einer Platte mit einer Höhe h bei einer Belastung durch einen Druck p ermittelt werden. Es wird dabei zwischen einer festen Einspannung und einer gelenkigen Lagerung der

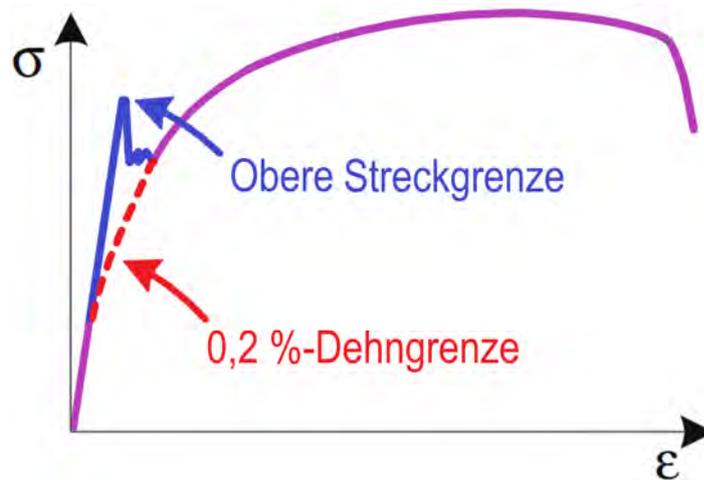


Abb. 2.7.: Unterschied zwischen einer ausgeprägten (obere Streckgrenze) und einer nicht ausgeprägten (0,2 %-Dehngrenze) Fließgrenze in einem Spannungs-Dehnungs-Diagramm (in Anlehnung an Abb. 1.33 aus [49])

Platte unterschieden. Werden die einwirkenden Kräfte durch Lager aufgenommen, handelt es sich um eine feste Einspannung. Ist dies nicht der Fall, handelt es sich um eine gelenkige Lagerung der Platte [53].

Gleichung 2.6 zeigt σ für eine rotationssymmetrische Kreisplatte unter Einzellast, wenn die Platte gelenkig gelagert und fest eingespannt ist. R ist dabei der Radius der Kreisplatte, welche innerhalb eines Radius von r belastet wird [53].

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{gelenkig}} &= 1,95 \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^2 \cdot \left(0,77 - 0,135 \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^2 - \log \frac{r}{R}\right) \cdot \frac{p \cdot R^2}{h^2} \\ \sigma_{\text{fest}} &= 1,95 \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^2 \cdot \left(0,25 \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^2 - \log \frac{r}{R}\right) \cdot \frac{p \cdot R^2}{h^2}\end{aligned}\quad (2.6)$$

Im Falle einer Rechteckplatte unter gleichmäßiger Belastung verhält sich die Spannung in der Plattenmitte nach Gleichung 2.7. Die Platte hat dabei eine Breite von b . Der Faktor c ist je nach Verhältnis zwischen Plattenlänge und -breite unterschiedlich. Beispielsweise ergibt sich bei einem Längenverhältnis von 1,06 ein Wert von 1,15 im Falle einer gelenkig gelagerten und 1,24 bei einer ringsum fest eingespannten Rechteckplatte. Bei Gleichung 2.7 handelt es sich jedoch lediglich um eine Näherung, da es für diese Plattenform keine klassische Lösung gibt. Diese Näherung gilt ausschließlich für eine geringe Plattendicke und eine geringe Durchbiegung im Vergleich zur dessen Flächenabmessung [53, 54].

$$\sigma = c \cdot \frac{p \cdot (b/2)^2}{h^2}\quad (2.7)$$

Um die mechanische Spannung zu ermitteln, können bei bekanntem E-Modul Dehnungsmessstreifen (DMS) verwendet werden. Diese bestehen aus einem oder mehreren Messgittern, welche auf einem Material appliziert werden. Dehnt sich

das Material, wird auch das Messgitter gedehnt. Durch die so entstehende Widerstandsänderung des Messgitters lässt sich die Dehnung ermitteln. Erfasst wird die Widerstandsänderung durch eine Wheatstonesche Brückenschaltung. Bei dieser Brückenschaltung sind zwei in Reihe geschaltete Widerstände parallel mit zwei weiteren in Reihe geschalteten Widerständen verbunden. Die Brückenausgangsspannung ist Null, wenn alle Widerstände gleich groß sind. Wird ein Widerstand durch einen DMS ersetzt, kann dessen Widerstandsänderung erfasst werden. In diesem Fall handelt es sich um eine Viertelbrücke. Sind alle vier Widerstände DMS, so wird von einer Vollbrücke gesprochen. In dem Datenblatt eines DMS wird ein k -Faktor angegeben, dies ist der Proportionalitätsfaktor zwischen Widerstandsänderung des Messgitters und dessen Dehnung.

Es gibt verschiedene Bauformen von DMS. Die einfachste Form hat ein Messgitter und wird Linear-DMS genannt. Bei drei Messgittern handelt es sich um eine DMS-Rosette, wodurch die Dehnung in mehrere Richtungen ermittelt werden kann. Die Messgitter können dabei verschiedene Anordnungen haben. Liegen die Messgitter nebeneinander, so handelt es sich um einen planaren DMS, liegen diese übereinander, dann ist von einem gekreuzten DMS die Rede. Bei einer planaren 45°-Rechtwinkel-Rosette sind die drei Messgitter nebeneinander im 45° Winkel angeordnet. Aus den Dehnungsmesswerten dieser DMS-Rosette ε_a , ε_b , ε_c können mittels Gleichung 2.8 die beiden Dehnungswerte, ε_1 und ε_2 , in den senkrecht zueinander liegenden Hauptdehnungsrichtungen bestimmt werden [51, 55].

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2} \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_c - \varepsilon_b)^2} \quad (2.8)$$

Es können verschiedene Festigkeitshypothesen angewendet werden, um die maximale Dehnung zu bestimmen. Welche dieser Hypothesen im Einzelfall geeignet ist, hängt u. a. von dem Material und der Belastungsart ab. Die Schubspannungs- und die Gestaltänderungsenergiehypothese werden bei Materialversagen durch Fließen genutzt. Die Normalspannungshypothese wird bei stoßartigen Belastungen angewendet und wenn kein Fließen stattfindet. In diesem Fall entspricht die maximale Dehnung ε_{\max} dem Maximum der Dehnungen in den Hauptdehnungsrichtungen, siehe Gleichung 2.9 [53, 56].

$$\varepsilon_{\max} = \max(\varepsilon_1, \varepsilon_2) \quad (2.9)$$

2.4.2. Druck

Als Druck wird das Verhältnis zwischen einer Kraft und der Oberfläche, auf welche diese Kraft wirkt, definiert [30]. Dabei können nicht nur Feststoffe und Flüssigkeiten einen Druck ausüben, sondern auch Gase. Um diesen Druck messtechnisch zu

erfassen, können u. a. piezoresistive oder piezoelektrische Drucksensoren verwendet werden. Beide Sensortypen nutzen dabei unterschiedliche physikalische Effekte, wie in Abb. 2.8 schematisch abgebildet. In beiden Fällen wird eine generelle Ansprechzeit von einem Viertel der Eigenfrequenz angenommen [57, 58].

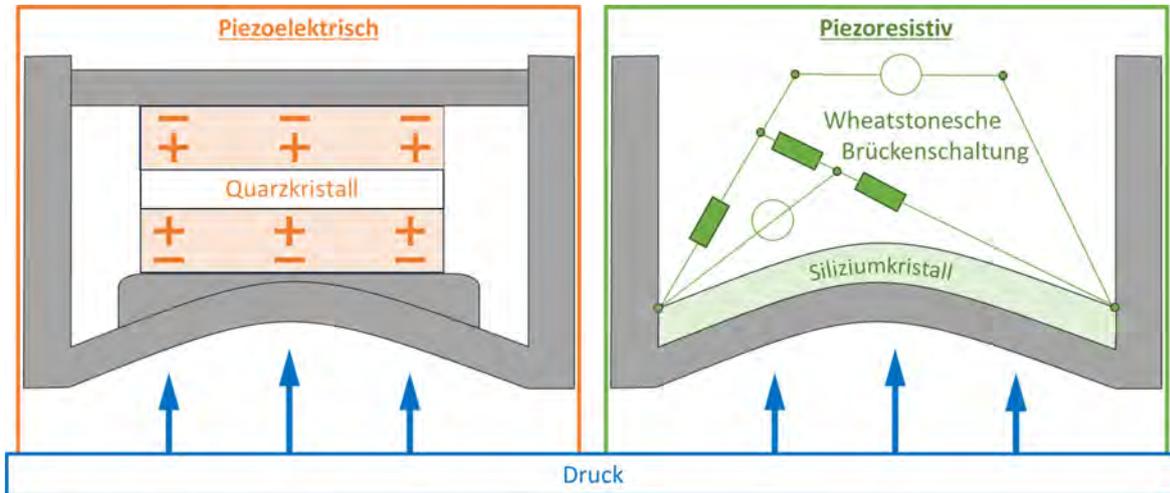


Abb. 2.8.: Funktionsprinzip eines piezoelektrischen und -resistiven Drucksensors

Bei piezoresistiven Sensoren entsteht durch eine Druckkraft eine Widerstandsänderung in einem Siliziumkristall. Durch dessen Proportionalität kann auf den aufgetragenen Druck geschlossen werden. Bei diesem Messverfahren entstehen allerdings Probleme bei hochfrequenten Vorgängen. Da es sich um eine Widerstandsänderung, wie in Abschnitt 2.4.1, handelt, kann als elektrisches Messsystem eine Brückenschaltung verwendet werden.

Ein piezoelektrischer Drucksensor besteht u. a. aus einem Quarzkristall. Unter mechanischem Druck werden durch diesen elektrische Ladungen frei. Die Menge dieser Ladungen kann messtechnisch erfasst werden und ist proportional zum Druck. Aufgrund von Ladungsverlusten unterliegen diese Drucksensoren einer zeitlichen Drift und es können nur dynamische Veränderungen, also Relativdrücke, gemessen werden [57]. Als elektrisches Messsystem kann in diesem Fall ein Ladungsverstärker, der gewisse Anforderungen erfüllen muss, verwendet werden [57, 59]. Des Weiteren muss beachtet werden, dass eine Erwärmung der Metallmembran druckentlastend wirkt und dadurch das Messergebnis verfälscht werden kann. Dieser Effekt wird als Thermoschock bezeichnet und kann verhindert werden, indem ein Wärmeschutz verwendet wird. Dazu kann eine dünne Silikonschicht auf dem Sensor dienen, die den Druck allerdings ungehindert an die Membran weitergeben muss [20, 59].

2.4.3. Temperatur

Als Temperatur wird das Maß für die mittlere kinetische Energie freier Gasatome bezeichnet. Um diese zu erfassen, können verschiedene Messmethoden verwendet werden. Zum Beispiel kann der temperaturabhängige Widerstand zwischen zwei sich berührenden Metallen genutzt werden. Diesen Effekt machen sich Thermoelemente zu Nutze. Diese bestehen aus zwei voneinander isolierten Drähten, welche sich ausschließlich an der Messstelle berühren. Die Typenbezeichnungen von Thermoelementen geben Auskunft über die verwendete Materialkombination. Beispielsweise besteht Typ K aus Nickel und Chrom. Ein Thermoelement nimmt eine Temperatur nur mit einer zeitlichen Verzögerung auf. Die Ansprechzeit einer sprunghaften Temperaturänderung ist abhängig von den Messbedingungen und dem Thermoelement selbst. Je höher der Durchmesser des Thermoelementes ist, desto länger ist dessen Ansprechzeit. Bei einem Mantelthermometer mit einem Manteldurchmesser von 1 mm dauert es z. B. in Luft 3 s bis 50 % der sprunghaften Temperaturänderung erfasst werden [22, 60].

3. Aufbau und Durchführung

In diesem Kapitel werden die Versuchsaufbauten zur Untersuchung der verschiedenen Belastungsarten beschrieben.

3.1. Verwendete druckfeste Kapselungen

Für die verschiedenen Belastungsarten werden unterschiedliche druckfeste Kapselungen verwendet, welche im Folgenden näher betrachtet werden.

3.1.1. Zylinderförmig

In diesen druckfesten Kapselungen werden die statischen und dynamischen Versuche durchgeführt. Dabei soll die Belastung von verschiedene Materialien und Wandstärken untersucht werden. Als Materialien können Aluminium (G-37), Baustahl (G-38) und Edelstahl (G-39) mit den Wandstärken 8 mm, 16 mm und 22 mm verwendet werden. Je nach Belastungsart werden mehr oder weniger Konfigurationen untersucht, siehe dazu Abschnitt 3.3.

3.1.1.1. Einzelkammer

Für einige Versuche wird eine zylindrische Kammer (G-1) mit einem Volumen von 5,56l verwendet, wie in Abb. 3.1 abgebildet. Diese stellt einen einfachen Fall einer Gehäusegeometrie dar und wurde im Rahmen eines Ringvergleiches von 37 internationalen Ex-Prüflaboratorien zur Validierung des gemessenen maximalen Explosionsdruckes verwendet [61].

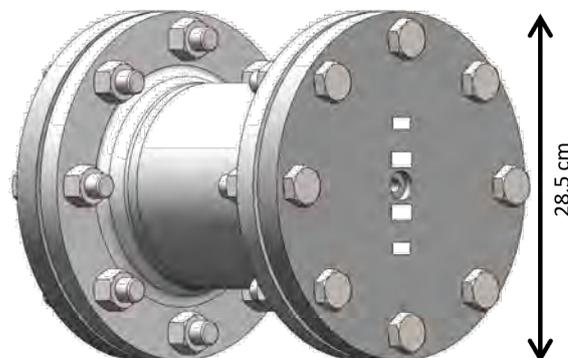


Abb. 3.1.: Zylindrische Einzelkammer (in Anlehnung an Abb. 1 aus [16])

Die druckfeste Kapselung besteht aus einem Rohr, welches mit zwei verschraubten Flanschen und Dichtungen gasdicht geschlossen ist. Vorversuche haben gezeigt, dass die Schrauben gleichmäßig mit 120 Nm angezogen werden sollten, um asymmetrische Verspannungen zu verhindern. Die Flanschverbindung sollte mit einem Dichtungsring statt mit einer Flachdichtung abgedichtet werden [62]. Die druckfeste Kapselung ist an einem der Flansche und am Rohr mit Bohrungen ausgestattet, damit ggf. eine Zündkerze, Gasein- und ausgänge oder ein Wasseranschluss installiert werden können. Der andere Flansch wird im Laufe der Versuche ausgetauscht, sodass verschiedene Materialien und Wandstärken, wie oben genannt, untersucht werden können. Teilweise besitzen die verschiedenen Flansche im Zentrum eine Bohrung, welche bei den dynamischen Versuchen für den entsprechenden Drucksensor vorgesehen ist.

3.1.1.2. Zweikammersystem

Diese druckfeste Kapselung wird verwendet, um im dynamischen Fall Drucküberhöhungen (PP) zu erzeugen. Dafür werden zwei gekoppelte Kammern verwendet, wie in Abb. 3.2 dargestellt. Die Einzelkammer aus Abschnitt 3.1.1.1 wird dabei um eine weitere Kammer erweitert, die die doppelte Länge besitzt, sodass ein Volumen von 16,69 l entsteht. An dem geschlossenen Ende der längeren Kammer ist eine Zündkerze eingebaut. Zwischen den beiden Kammer befindet sich eine Blende mit einem Durchmesser von 15 mm, wodurch PP hervorgerufen wird.



Abb. 3.2.: Zylindrisches Zweikammersystem
(in Anlehnung an Abb. 3 aus [16])

3.1.2. Quaderförmig

Die Versuche u. a. mit thermisch durchgehenden Lithium-Ionen-Batterien (LIBs) werden in folgenden druckfesten Kapselungen durchgeführt. Diese haben alle Anschlüsse für einen Gasein- und auslass, einen Drucksensor und Kabeldurchführungen u. a. für Thermoelemente. Außerdem sind sie mit mindestens einer Schauscheibe ausgestattet. Es besteht die Möglichkeit, das freie

Volumen und die Oberfläche innerhalb einer druckfesten Kapselung einzustellen, indem Aluminiumblöcke ins Innere gestellt werden. Diese Blöcke existieren in verschiedenen Größen.

3.1.2.1. Typ 8265

Diese druckfeste Kapselung (G-2) ist zum Großteil quaderförmig, aber zum Deckel hin zylindrisch, wobei sich ein Schauglas in dem runden Deckel befindet. Abb. 3.3 zeigt diese mit ihrer Kabeldurchführung und ihren inneren Elementen u. a. ein Ablagegitter und Stromanschlüsse. Das freie Volumen nach der oben genannten Abbildung wurde mittels Wasser gemessen und beträgt $19,7 \pm 0,6$ l.

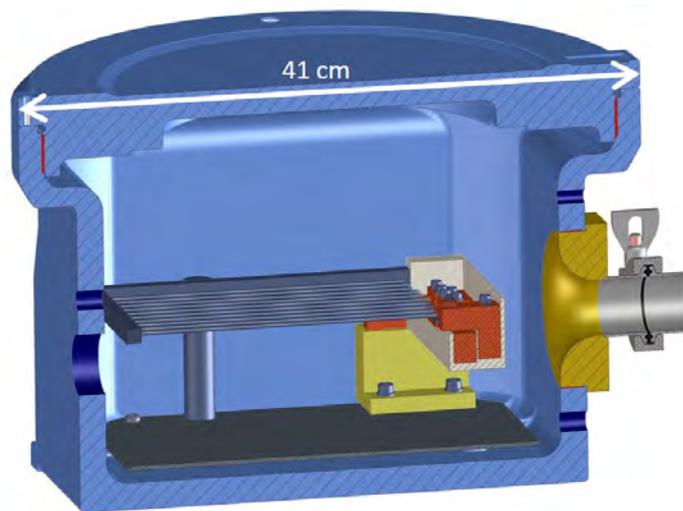


Abb. 3.3.: Druckfeste Kapselung vom Typ 8265 mit Schauglas
(in Anlehnung an [63])

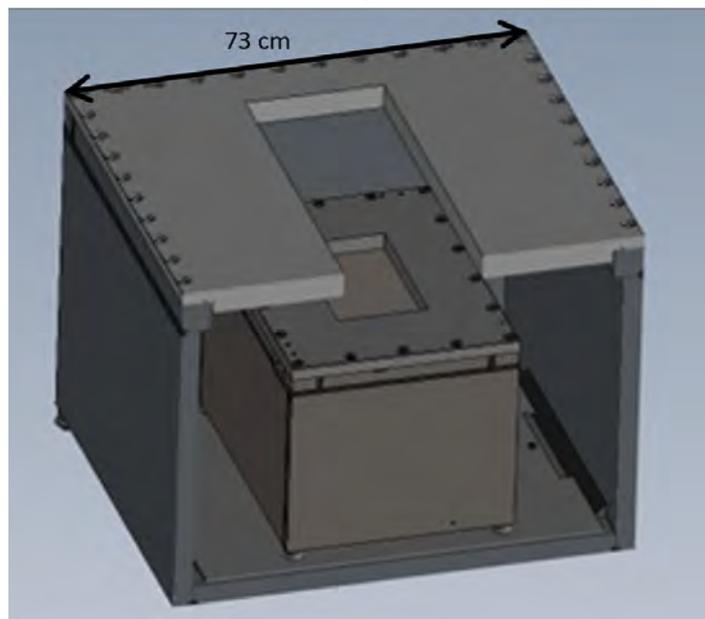
3.1.2.2. Typ 8264

Diese Art von druckfester Kapselung wird einerseits in einer kleinen Ausführung als Versuchshäuse (G-3) und andererseits in einer großen Ausführung als Umgehäuse (G-4) verwendet. Beide druckfeste Kapselungen haben Schaugläser im Deckel und an einer Seitenwand. Das Versuchshäuse, wie in Abb. 3.4a, hat ein Leervolumen von $39,5 \pm 0,9$ l [64]. Es kann mit einem Deckel aus Stahl oder Aluminium geschlossen werden. Je nach Deckel ändert sich die Dichtigkeit und Wärmeleitfähigkeit. Näheres dazu ist der Literatur von DARAGAN zu entnehmen [65]. Wenn im Text nicht explizit erwähnt, wird ein Deckel aus Stahl verwendet. Das Umgehäuse mit einem Leervolumen von 222 l dient dazu, dass in dieses eine andere druckfeste Kapselung hineingestellt werden kann, wie schematisch in Abb. 3.4b zu sehen [66]. Dies dient dazu, die Umwelt vor toxischen Stoffen zu schützen. Undichtigkeiten im Versuchshäuse können einerseits dadurch entstehen, dass die druckfeste

Kapselung dem thermischen Durchgehen (TR) ggf. nicht standhält, andererseits durch konstruktive Maßnahmen wie Spalte. Wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit von der druckfesten Kapselung vom Typ 8264 gesprochen, ist damit das Versuchsgehäuse und nicht das Umgehäuse gemeint, außer es wird explizit genannt.



(a) Versuchsgehäuse [67]



(b) Versuchsgehäuse mit Umgehäuse [67]

Abb. 3.4.: Druckfeste Kapselungen vom Typ 8264

3.1.2.3. Typ 8280

Diese druckfeste Kapselung (G-5) besitzt gegenüberliegende Druckentlastungselemente, wie in Abb. 3.5 dargestellt. Die Entlastungsfläche ist hierbei dauerhaft geöffnet. Des Weiteren besitzt die druckfeste Kapselung Schaugläser auf einer Seitenwand und im Deckel. Das Leervolumen beträgt $24,0 \pm 0,11$ [68]. Als Umgehäuse wird hier die druckfeste Kapselung aus

Abschnitt 3.1.2.2 (G-4) verwendet. Dadurch, dass diese druckfeste Kapselung durch die Druckentlastungselemente offen ist, beläuft sich das freie Volumen auch auf das freie Volumen des Umgehäuses, also insgesamt auf ca. 198 l.



Abb. 3.5.: Druckfeste Kapselung vom Typ 8280 [67]

3.2. Messtechniken und Unsicherheiten

In diesem Abschnitt wird erläutert, wie die Dehnung des Materials und der im Inneren der druckfesten Kapselung entstehende Druck und die Temperatur gemessen werden. Die Unsicherheiten der Messkette werden jeweils mittels der pythagoreischen Summe ermittelt. In weiteren Versuchen wurde die Dehnungs- und Druckmessung durch ein unabhängiges Messsystem (G-13) verifiziert, sodass davon ausgegangen werden kann, dass die gemessenen Werte nahe den tatsächlichen Werten liegen [16]. Diese Messergebnisse fließen in die Auswertung mit ein.

3.2.1. Dehnungsmessung

Um die Materialbeanspruchung einschätzen zu können, wird die Dehnung mittels Dehnungsmessstreifen (DMS) (G-14, G-15) gemessen. Beispielapplikationen von installierten planaren DMS sind in Abb. 3.6 dargestellt. Es handelt sich dabei um DMS-Rosetten mit jeweils drei Messgittern, um die maximale Dehnung bestimmen zu können. Die DMS werden auf der Metalloberfläche mit dem Bindemittel (G-40) appliziert, mit einer Zugentlastung versehen, an Brückenköpfen (G-16) angeschlossen, damit eine Wheatstonesche Messbrücke in Form einer Viertelbrücke entsteht, und mit Silikon abgedeckt um die Messstelle zu schützen. Die Brückenköpfe sind an einem Oszilloskop (G-17) mit einer entsprechenden Dehnungsmesskarte (G-18) angeschlossen, welches die Messdaten der einzelnen DMS-Gitter aufzeichnet. Teilweise werden die statischen und dynamischen Versuche

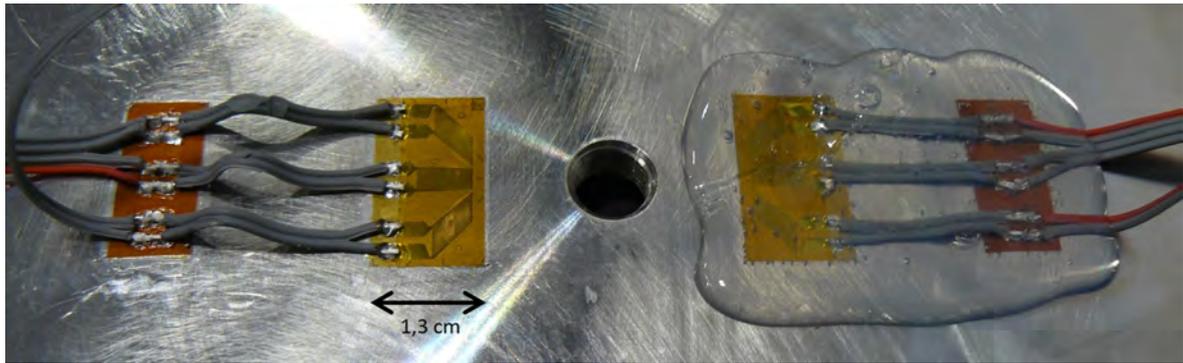


Abb. 3.6.: DMS-Applikation
(links ohne Silikon-, rechts mit Silikonabdeckung) [16]

auch mit einem anderen Messsystem (G-13) ohne separate Brückenköpfe und Oszilloskop durchgeführt. Die Abtastrate dieses Messsystems reicht allerdings nicht aus, um die Dehnungsspitzen bei den dynamischen Versuchen mit PP aufzuzeichnen, weswegen dieses Messsystem für diese Fälle nicht verwendet wird. Bei allen Versuchen kommen planare DMS zum Einsatz, außer bei den statischen Versuchen im Falle einer Dehnungsmessung im Zentrum des Flansches. Dort werden gekreuzte DMS verwendet. Vor jedem Versuch wird eine Nullpunktanpassung des DMS durchgeführt. In die Unsicherheitsbetrachtung fließen folgende potentielle Fehlerquellen ein:

- 5 % Abweichung durch die Klebung des DMS auf der Oberfläche [69],
- 1 % durch den k -Faktor des DMS (Angabe auf Datenblättern der DMS),
- 0,01 % durch die Temperaturabhängigkeit des k -Faktors des DMS pro Grad Celsius Temperaturunterschied während der Messung. Da bei den quasi-statischen Versuchen eine maximale Differenz von 11,2 °C an der Außenwand aufgetreten ist, wird eine Unsicherheit von 0,112 % angenommen.
- 0,1 % pro 1.000 $\mu\text{m}/\text{m}$ des Messgitters des DMS [70],
- 0,1 % und $\pm 5 \mu\text{m}/\text{m}$ sind die maximalen Fehler aufgrund der unterschiedlichen Messsysteme (G-13, G-18).

Somit entsteht eine maximale Unsicherheit der Einzeldehnungen von je

$$\Delta\varepsilon_i = 5 \frac{\mu\text{m}}{\text{m}} + (0,06212 + 10^{-6} \cdot \varepsilon_i) \cdot \varepsilon_i. \quad (3.1)$$

3.2.2. Druckmessung

Die Wahl des Drucksensors hängt von der jeweiligen Belastungsart ab. Die Drucksensoren werden für die Versuche bündig in die druckfeste Kapselung eingebaut. Im Falle einer Messung des Druckes p mittels des Oszilloskops (G-17) wird eine entsprechende Messkarte (G-19) (Unsicherheit 0,5 %) verwendet. In

dieser Arbeit wird immer der relative Druck betrachtet, außer es wird explizit der Absolutdruck genannt.

3.2.2.1. Piezoresistiv

Bei der piezoresistiven Druckmessung wird entweder ein Drucksensor (G-20) mit einem entsprechenden Verstärker (G-21) (zusammen eine Unsicherheit von 0,003 %) und der oben genannten Messkarte verwendet oder ein anderer Drucksensor (G-22) (Genauigkeitsklasse 0,3) mit einem Messsystem (G-13) (Genauigkeitsklasse 0,1). Der erstgenannte Aufbau ergibt eine Unsicherheit von 0,6 %, der Letztgenannte von 0,3 %. Deshalb wird im Laufe dieser Arbeit eine maximale Unsicherheit von 0,6 % bei der piezoresistiven Druckmessung angenommen.

3.2.2.2. Piezoelektrisch

Piezoelektrische Drucksensoren werden u. a. bei den dynamischen Versuchen verwendet. Die Membranen der Drucksensoren werden vor dem Einbau in die druckfeste Kapselung mit Silikon abgedeckt, um einen Thermoschock zu vermeiden.

Bei einigen Versuchen ohne PP wird ein Drucksensor (G-23) (Unsicherheit 0,5 %) mit einem entsprechenden Verstärker (G-13) (Unsicherheit von 0,05 %) verwendet. Dieser Aufbau hat somit eine Unsicherheit von 0,5 %. Bei einigen anderen Versuchen ohne PP wird ein anderer Drucksensor (G-24) mit entsprechendem Verstärker (G-25) (Gesamtunsicherheit von $\pm 0,75$ bar) und die oben genannte Messkarte verwendet. Daraus ergibt sich eine Unsicherheit von $0,75 \text{ bar} + 0,5 \% \cdot p$. Da diese Unsicherheit größer als die oben genannte ist, wird diese für die dynamischen Versuche ohne PP angenommen.

Im Falle von PP wird durch die schlagartige Beanspruchung die Beschleunigungsempfindlichkeit des jeweiligen Drucksensors relevant. Bei diesen Versuchen wird im Falle eines Aluminiumflansches ein Drucksensor (G-24) (Unsicherheit von 1 %, axiale Beschleunigungsempfindlichkeit 0,0001 bar/g), ein Verstärker (G-25) (Unsicherheit von 1 %) und die oben genannte Messkarte verwendet. Daraus entsteht eine Unsicherheit der Druckmessung ohne Beschleunigung von 1,5 %. Bei der Verwendung eines Baustahlflansches haben der Drucksensor (G-23) (Unsicherheit von 0,5 %, axiale Beschleunigungsempfindlichkeit 0,002 bar/g), der Verstärker (Unsicherheit von 1 %) und die oben genannte Messkarte zusammen eine Ungenauigkeit von 1,2 %, wenn keine Beschleunigung auftritt.

Bei der kombinierten Belastung aus Abschnitt 3.3.4.2 wird eine ähnliche Messkette verwendet, wie bei den dynamischen Versuchen mit PP und dem Aluminiumflansch.

Der Unterschied ist die Typenbezeichnung des Verstärkers. Allerdings weisen beide Verstärkertypen die gleiche Unsicherheit auf.

3.2.3. Temperaturmessung

Die Temperatur wird mittels Thermoelementen von Typ K (G-26) gemessen. Die Thermoelemente wurden von Hand verlötet, wobei die Messstelle unisoliert bleibt. Falls diese auf eine Oberfläche appliziert werden, wird auf die Messstellen Wärmeleitpaste aufgetragen. Anschließend wird das Thermoelement mittels Kupferklebeband auf der Oberfläche befestigt. Angeschlossen sind die Thermoelemente an einen Multiplexer (G-27).

Die Unsicherheit der Temperaturmessung beläuft sich auf $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ oder $0,4\%$ des Temperaturwertes, je nachdem welche Abweichung größer ist. Bei einem Temperatursprung werden 50% des tatsächlichen Endwertes nach $2,56\text{ s}$ erreicht [60]. Das bedeutet, dass der zeitliche Verlauf der Temperatur mit in die Unsicherheitsbetrachtung einfließt. Soll die Unsicherheit eines Temperaturmesswertes bestimmt werden, so wird dieser mit einem vorherigen Temperaturmesswert in Beziehung gesetzt. Diese beiden Messwerte haben einen zeitlichen Abstand, welcher der oben genannten Ansprechzeit entspricht. Die Temperaturdifferenz der beiden Messwerte ergibt die Unsicherheit des später gemessenen Temperaturwertes aufgrund eines Temperatursprunges. Zusätzlich beläuft sich die Abweichung durch den angeschlossenen Multiplexer auf $1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3.2.4. Sonstiges

Zur Bestimmung des Volumens und der Oberfläche der einzelnen Aufbauten werden teilweise die Daten aus den Datenblättern der druckfesten Kapselungen oder Daten aus persönlichen Mitteilungen [45] verwendet. Des Weiteren wird die Bestimmung auch teilweise durch Nachmessen durchgeführt. Wird dabei ein Messschieber verwendet, so beläuft sich die Unsicherheit auf $0,01\text{ mm}$, bei einem Maßband sind es $0,1\text{ mm}$.

Das Volumen der LIBs wird durch die Angaben im Datenblatt bestimmt. Darüber hinaus wird ihr Gewicht durch eine Feinwaage ermittelt, welche eine Unsicherheit von $0,2\text{ mg}$ aufweist. Um die Kapazität der LIBs im Vorfeld zu bestimmen, wird ein vorgefertigtes Softwaretool eines Potentiostaten/Galvanostaten (G-28) verwendet. Dieser hat eine Unsicherheit der Spannungsmessung von $0,3\%$, welche auch für die Kapazität angenommen wird. Vor dem zerstörerischen Versuch einer LIB wird dessen Spannung mittels eines Multimeters oder eines Multiplexers (G-27) bestimmt. Die Unsicherheiten belaufen sich bei dem Multimeter auf $0,03\%$ mit einem absoluten Fehler von $0,001\text{ V}$ bei einer Spannung unterhalb von 4 V und

0,01 V oberhalb von 4 V. Die Unsicherheit des Multiplexer beläuft sich dagegen bei 5 V auf 0,0225 %.

Bei den Versuchen mit Gasexplosionen wird die Unsicherheit der Brenngaskonzentration durch die vorgeschaltete Gasgemischaufbereitung bestimmt. Diese beläuft sich durch die Massendurchflussregler (G-29) auf unter 1 % [71]. Somit ergibt sich bei einem Brenngas-Luft-Gemisch mit 31 Vol.-% Brenngas eine Unsicherheit von 0,3 Vol.-% und mit 4,6 Vol.-% von 0,1 Vol.-%. Wird ein Sauerstoffanalysator (G-30) verwendet beträgt die Unsicherheit der Brenngaskonzentration 0,2 Vol.-% [72]. Im Folgenden wird i. d. R. kein Sauerstoffanalysator verwendet, außer es wird konkret erwähnt.

3.3. Aufbauten für die verschiedenen Belastungsarten

Für die verschiedenen Belastungsarten werden unterschiedliche Versuchsaufbauten benötigt, welche im Folgenden beschrieben werden.

3.3.1. Statische Belastung

Bei dieser Belastungsart wird die druckfeste Kapselung mittels einer Wasserpumpe mit Wasserdruck belastet. Der Druck wird dabei über mehrere Sekunden lang gehalten. Als druckfeste Kapselung wird hier die Einzelkammer aus Abschnitt 3.1.1.1 mit allen verfügbaren Flanschen (siehe Abschnitt 3.1.1) verwendet. Wenn der untersuchte Flansch eine Bohrung im Zentrum aufweist, dann ist diese mit einem Blindstopfen versehen, da der Druck bei diesen Versuchen am Gehäusemantel mittels eines piezoresistiven Drucksensors (G-20, G-22) inkl. Verstärker (G-21) gemessen wird. Die Dehnungsmessung am Flansch erfolgt, wie in Abschnitt 3.2.1 beschrieben, über DMS. Diese sind entweder im Zentrum (gekreuzte DMS) oder 2 cm neben dem Zentrum (planare DMS) appliziert.

3.3.2. Dynamische Belastung

Bei diesen Versuchen wird die druckfeste Kapselung mit einer Gasexplosion belastet. Dazu wird im Inneren ein Brenngas-Luft-Gemisch gezündet. Als Brenngas-Luft-Gemische werden entsprechend der Norm IEC 60079-1 Wasserstoff (H_2) und Propan (C_3H_8) in Luft verwendet [4]. Die jeweilige Konzentration wird durch einen Sauerstoffanalysator kontrolliert. Die Brenngase liegen dabei in einer normkonformen Konzentration vor, sodass der maximale

Explosionsdruck p_{\max} entsteht. Dies bedeutet eine Konzentration von 31 ± 1 Vol.-% H_2 in Luft bzw. $4,6 \pm 0,3$ Vol.-% C_3H_8 in Luft. Die Explosionseigenschaften der verwendeten Gase sind in Tabelle 2.1 aufgeführt. Es werden diese repräsentativen Brenngase und Gemische verwendet, da eine Explosion mit H_2 schneller abläuft als eine Explosion mit C_3H_8 . Dafür wird bei der Verwendung von C_3H_8 ein höher Explosionsdruck erzeugt als mit H_2 . Es werden Versuche durchgeführt unter atmosphärischem Druck von 0 bar und mit einem Vordruck von 0,5 bar. Durch eine Vorverdichtung des Gasgemisches auf 0,5 bar wird erreicht, dass der Explosionsdruck unter atmosphärischen Bedingungen um ca. 50 % erhöht wird. Dies entspricht der Bedingung für die Überdruckprüfung nach der Norm IEC 60079-1, welche mit dem 1,5-fachen des Bezugsdrucks durchgeführt werden soll [4].

Für diese Belastungsart werden die Flansche aus Aluminium und Baustahl in den Wandstärken 8 mm und 16 mm verwendet. Edelstahl wird nicht betrachtet, da sich dies im statischen Fall ähnlich zu Baustahl verhält, wie in Abschnitt 5.1.1 beschrieben. An dem jeweilig gegenüberliegenden Flansch befindet sich eine Zündkerze und der Gaseinlass. Der Gasauslass befindet sich an der Mantelfläche der druckfesten Kapselung. Die verwendeten Flansche weisen alle eine Bohrung auf. In dieser befindet sich ein bündig eingebauter piezoelektrischer Drucksensor. Die Dehnungsmessung erfolgt, wie in Abschnitt 3.2.1 beschrieben, über DMS 2 cm neben dem Zentrum der Flansche. Eine Temperaturmessung erfolgt nicht, da der Fokus hierbei auf der Druck-Dehnungs-Beziehung liegt.

Für die dynamischen Versuche ohne PP wird eine Einzelkammer als druckfeste Kapselung, wie in Abschnitt 3.1.1.1 beschrieben, verwendet. Die Druckmessung erfolgt hierbei über einen Drucksensor (G-24), siehe dazu Abschnitt 3.2.2.2.

Um PP zu erzeugen, wird ein Zweikammersystem, siehe Abschnitt 3.1.1.2, als druckfeste Kapselung verwendet. Für die Versuche wird ein beschleunigungsempfindlicher Drucksensor (G-23) zur Erfassung des Druckes verwendet. Im Falle eines Aluminiumflansches ist dies nicht sinnvoll, wie im Anhang in Abschnitt A.1.2 erläutert. Deshalb wird bei dieser Konfiguration ein beschleunigungsunempfindlicher Drucksensor (G-24) genutzt. Da die Dehnungsmessung von diesem Effekt unberührt bleibt, werden im weiteren Verlauf für diese Konfiguration die Dehnungsmesswerte, welche in den Vorversuchen mit dem Drucksensor (G-23) aufgenommen wurden, verwendet.

3.3.3. Quasi-statische Belastung

Die quasi-statische Belastung einer druckfesten Kapselung wird durch das TR einer LIB verursacht. Dabei werden u. a. der entstehende Druck und verschiedene Temperaturen aufgezeichnet. Der Versuchsaufbau ist schematisch in Abb. 3.7

dargestellt und wird im Folgenden beschrieben. Vor jedem Versuch wird mittels Druckluft akustisch getestet, ob alle Anschlüsse wie gewünscht appliziert sind. Bevor die neuwertigen LIBs für die Versuche verwendet werden, wird deren Gewicht durch eine Feinwaage bestimmt. Außerdem wird mit Hilfe eines Potentiostaten/Galvanostaten (G-28) die Kapazität jeder LIB ermittelt und eine elektrische Impedanzspektroskopie durchgeführt.

Die LIBs werden mittels Überhitzen zum TR gebracht. Überladen als Ursache des TR führte nicht zum Erfolg, wie im Anhang A.1.3 beschrieben. Die Methode des Überhitzens hat den Vorteil, dass diese eine thermische Propagation bei mehreren LIBs nachstellt. Die LIBs aller nachstehenden Versuche werden mittels eines Heizelementes (G-31, G-32) überhitzt. Das Heizelement selbst ist in einem Kupferblock eingelassen, auf welchem sich die LIB befindet.

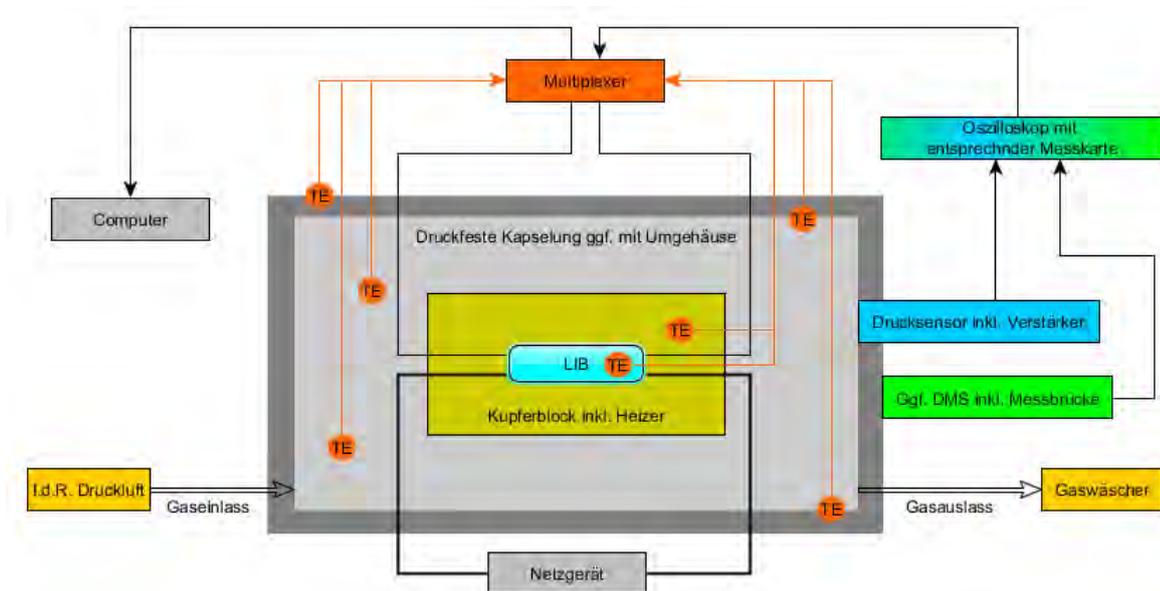


Abb. 3.7.: Schematischer Aufbau der quasi-statischen Versuche (TE: Thermoelemente)

Temperatur, Spannung und Strom werden durch einen Multiplexer (G-27) mit entsprechender Messkarte erfasst und können durch einen Computer ausgelesen und gespeichert werden. Dieser Multiplexer erfasst außerdem ein Triggersignal des Oszilloskops (G-17), welches signalisiert, dass in der druckfesten Kapselung ein Überdruck von 0,3 bar entstanden ist. Dieser Wert wird gewählt, um einen eindeutigen Überdruck zu verifizieren. Das Oszilloskop nimmt neben dem Druck ggf. auch die Dehnung auf. Findet bei den Versuchen eine Messung der Dehnung statt, dann ist auf einer Außenseite des Versuchshauses mittig ein planarer DMS (G-14) appliziert. Als Drucksensor und Verstärker werden, wenn nicht anders genannt, piezoresistive Geräte (G-21, G-20) verwendet.

Die LIB, welche zum TR gebracht werden soll, wird mit Kupferklebeband auf den Kupferblock, indem sich der Heizer befindet, fixiert, wie beispielhaft in Abb. 3.8

zu sehen. Als Anschlüsse dienen, je nachdem wie die Pole der LIB aufgebaut sind, Batterieclips in der entsprechenden Größe oder Krokodilklemmen. Die LIB kann damit einerseits inkl. eines Messshunts an den Multiplexer zur Messdatenaufnahme angeschlossen werden und andererseits an ein Netzgerät (G-28, G-33). Die LIB wird vor dem Überhitzen mit 1 C auf 110% der jeweiligen Ladeschlussspannung überladen. Anschließend wird mit einem Multimeter die Spannung der LIB gemessen.

Es wird von verschiedenen Positionen die Temperatur ermittelt. Zum einen wird die Temperatur an der Außenwand der druckfesten Kapselung gemessen, zum anderen an zwei Positionen der Innenwand, auf dem Kupferblock, in dem sich das Heizelement befindet, und mittig auf der Oberfläche der LIB. Letztere Position ist in Abb. 3.8 beispielhaft an einer NCA-Zelle dargestellt. Außerdem befinden sich zwei lose Thermoelemente in der druckfesten Kapselung, um die Gastemperatur zu erfassen und dessen Homogenität einschätzen zu können.

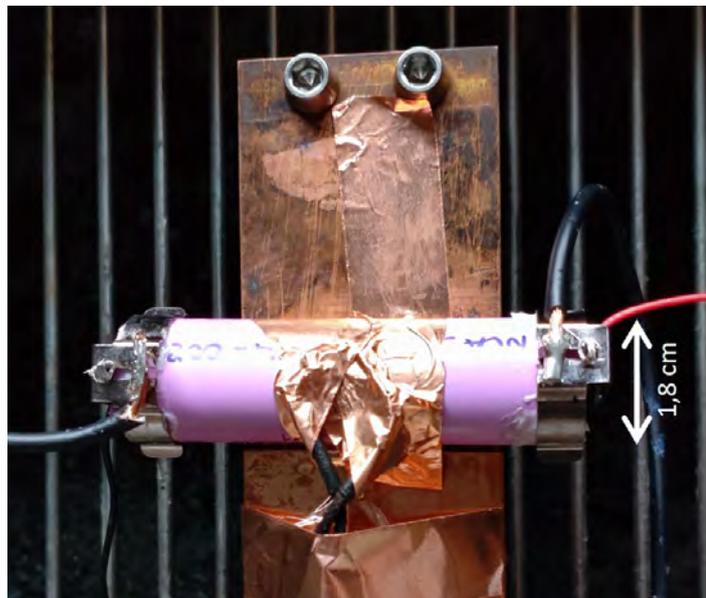


Abb. 3.8.: Thermoelementposition auf einer LIB

Um die Versuche optisch festzuhalten, wird mittels einer Kamera der Versuch außerhalb der druckfesten Kapselung hinter dem Schauglas aufgezeichnet. Gegebenenfalls befindet sich eine weitere Kamera (G-34) inkl. Schutzgehäuse innerhalb der druckfesten Kapselung, welche seitlich auf die LIB gerichtet ist. Dadurch lässt sich das Verhalten der LIB bei geringer Rauchentwicklung beobachten. Der Gaseinlass der druckfesten Kapselung ist i. d. R. an eine Druckluftquelle angeschlossen. Der Gasauslass führt zu einem Gaswäscher, welcher aus einer 10%igen Kalilauge besteht. Dadurch kann Flusssäure, welche durch das TR einer LIB entstehen kann, neutralisiert werden.

Nachdem die druckfeste Kapselung geschlossen wird, werden die Temperaturen und der Druck gemessen. Dadurch werden die Ausgangsbedingungen der Versuche

festgehalten. Nach jedem Versuch werden die Temperaturen und der Druck erneut gemessen. Danach erfolgt eine Druckluftspülung, die Reinigung der druckfesten Kapselung und die Entsorgung der LIB. Der Zeitaufwand für die arbeitsschutzkonforme Vor- und Nachbereitung eines Versuches ist nicht zu unterschätzen und bedarf mehrere Stunden, sodass an einem Tag nur ein Versuch durchgeführt werden kann. Aus diesem Grund können die Versuche nicht beliebig wiederholt werden. Jede Konfiguration wird deshalb i. d. R. dreimal getestet.

In Tabelle 3.1 sind einige Spezifikationen der verwendeten neuwertigen LIBs aufgelistet. In den folgenden Abschnitten wird erläutert, welche dieser LIBs in welcher Versuchsreihe verwendet werden.

Zellchemie	Bauform	Nominelle Kapazität	Gewicht	Geräteverzeichnis
LCO	26650	2,55 Ah	45,2±0,5 g	G-6
NCA	18650	3 Ah	45,9±0,1 g	G-7
LFP	18650	3 Ah	84,5±0,4 g	G-8
NMC	18650	2,2 Ah	45,7±0,9 g	G-9
NMC811	18650	3 Ah	45,8±0,1 g	G-10
	18650	3,5 Ah	46,8±0,1 g	G-11
	21700	5 Ah	69,3±0,1 g	G-12

Tabelle 3.1.: Übersicht über alle verwendeten LIBs

3.3.3.1. Zellchemie

Für die Untersuchung des Einflusses der Zellchemie auf die druckfeste Kapselung während des TR werden verschiedene LIBs verwendet. Auf Grundlage der Literatur aus Abschnitt 2.2 wurde sich auf kommerzielle Zellchemien Lithium-Kobaltoxid (LCO), Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminiumoxid (NCA), Lithium-Eisenphosphat (LFP) und Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid (NMC) beschränkt. Es wurden bei dieser Versuchsreihe LIBs unterschiedlicher Zellchemien mit ähnlicher Bauform und Kapazität verwendet. Es ergaben sich aufgrund der Verfügbarkeit folgende zylindrische LIBs aus Tabelle 3.1: LCO mit 2,55 Ah, NCA mit 3 Ah, LFP mit 3 Ah, NMC811 mit 3 Ah und 3,5 Ah.

Die genannten LIBs werden in der druckfesten Kapselung aus Abschnitt 3.1.2.1 zum TR gebracht. Ein beispielhafter Versuchsaufbau von einer NCA-Zelle ist in Tabelle 3.2 (Typ 8265) dargestellt. Eine Dehnungsmessung findet bei diesen Versuchen nicht statt, da der Fokus hier nicht auf der Materialbelastung der druckfesten Kapselung liegt, sondern auf dem Verhalten der unterschiedlichen Zellchemien beim TR.

3.3.3.2. Kapazitäten

Diese Versuchsreihe wird in dem Versuchsgehäuse, welches sich in einem Umgehäuse befindet, durchgeführt (siehe Abschnitt 3.1.2.2). Das freie Volumen und die innere Oberfläche der druckfesten Kapselung werden mittels zweier quaderförmiger Aluminiumblöcke angepasst und entspricht Typ 8264 „mittel“ in Tabelle 3.2. Als LIBs werden zylindrische NMC-Zellen aus Tabelle 3.1 verwendet, welche unterschiedliche nominale Kapazitäten aufweisen: 2,2 Ah, 3,0 Ah, 3,5 Ah und 5,0 Ah. Jede Konfiguration wird dreimal getestet.

3.3.3.3. Gehäusegeometrie und Inertatmosphäre

Durch diese Versuchsreihe soll der Einfluss des freien Volumens und der inneren Oberfläche, also der Gehäusegeometrie, untersucht werden. Tabelle 3.2 zeigt die unterschiedlichen druckfesten Kapselungen nach Typenbezeichnungen mit den entsprechenden Volumen V_{frei} und inneren Oberflächen A , die hier verwendet werden. Die Geometrie vom Typ 8264 wird ggf. mittels Aluminiumblöcken eingestellt. In Tabelle 3.2 werden diese Konfigurationen mit „klein“, „mittel“ und „groß“ (keine Aluminiumblöcke) bezeichnet. Des Weiteren wird auch eine Konfiguration untersucht, bei der Metallgitter (G-41) in die druckfeste Kapselung gestellt werden (in Tabelle 3.2 mit „Gitter“ bezeichnet). Diese Gitter dienen dazu die innere Oberfläche zu erhöhen, ohne dabei maßgeblich das freie Volumen zu beeinflussen. Die druckfeste Kapselung wird im Falle der Verwendung von Gittern mit einem Aluminiumdeckel geschlossen. Außerdem werden die Versuche in dem „großen“ Volumen vom Typ 8264 mit dem Standarddeckel aus Stahl und zusätzlich mit dem Aluminiumdeckel durchgeführt. Daneben werden auch die Ergebnisse aus den Versuchen mit unterschiedlicher Zellchemie (Abschnitt 3.1.2.1) für die hier verwendete LIB herangezogen. Darüber hinaus wird zusätzlich eine druckfeste Kapselung mit Druckentlastungselementen (Typ 8280), siehe Abschnitt 3.1.2.3, verwendet. Diese stellt den Fall dar, bei dem das Verhältnis zwischen freiem Volumen und Oberfläche am kleinsten ist. Bei dieser druckfesten Kapselung findet keine Dehnungsmessung statt. Aus Sicherheitsgründen befinden sich die druckfesten Kapselungen von Typ 8264 und Typ 8280 in einem Umgehäuse (siehe Abschnitt 3.1.2.2).

Es wird bei dieser Versuchsreihe eine LIB mit konstanter Zellchemie und Kapazität verwendet. Dazu dienen NMC811-Zellen (G-10) mit einer Kapazität von 3 Ah. Jede Konfiguration wird dreimal getestet. Dabei wird jeweils ein Versuch innerhalb der „kleinen“ und „großen“ druckfesten Kapselung von Typ 8264 durchgeführt, wobei sich innerhalb dieser reiner Stickstoff (N_2) befindet. Dadurch kann der Einfluss des Sauerstoffgehaltes eingeschätzt werden.

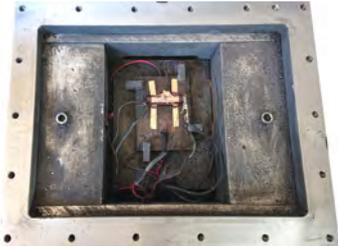
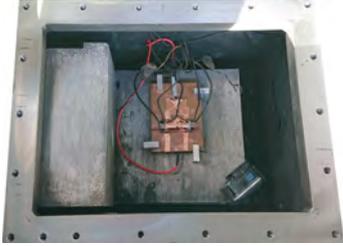
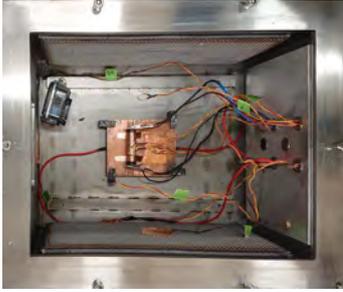
Typ	V_{frei} in Liter	A in m^2	Beispielhafte Fotografie
Typ 8265	$19,3 \pm 0,6$	$0,62 \pm 0,01$	
Typ 8264 „klein“	$4,7 \pm 2,0$	$1,60 \pm 0,01$	
Typ 8264 „mittel“	$21,6 \pm 0,9$	$0,83 \pm < 0,01$	
Typ 8264 „groß“	$38,1 \pm 0,9$	$0,69 \pm < 0,01$	
Typ 8264 „Gitter“	$37,3 \pm 0,9$	$10,24 \pm 0,19$	
Typ 8280	$22,7 \pm 0,2$	$11,33 \pm 0,53$	

Tabelle 3.2.: Eigenschaften der druckfesten Kapselungen der quasi-statischen Versuche nach Typen mit variabler Gehäusegeometrie

3.3.4. Kombinierte Belastungen

Hier werden die Versuchsaufbauten beschrieben, die nicht eindeutig einer der vorherigen Belastungsarten zuzuordnen sind.

3.3.4.1. Explosionsfähige Atmosphären

Bei diesen Versuchen soll der Einfluss der Gasgemischzusammensetzung innerhalb der druckfesten Kapselung auf die Auswirkungen des TR einer LIB untersucht werden. Dazu wird die druckfeste Kapselung aus Abschnitt 3.1.2.2 (Typ 8264) nicht mit Luft gefüllt, sondern mit einem H₂-Luft-Gemisch oder einem C₃H₈-Luft-Gemisch. Diese beiden Brenngas-Luft-Gemische werden untersucht, um einen möglichst realen Fall darzustellen. Außerdem soll aufgezeigt werden wie die beiden Effekte, das TR der LIB und eine Gasexplosion, sich gegenseitig beeinflussen. Dazu wird normenkonform, wie bei den dynamischen Versuchen aus Abschnitt 3.3.2, eine Brenngaskonzentration von 31±1 Vol.-% H₂ in Luft und 4,6±0,3 Vol.-% C₃H₈ in Luft verwendet. Die Versuche mit C₃H₈-Luft-Gemischen werden mit dem Deckel aus Aluminium durchgeführt. Bei diesen Untersuchungen wird die gleiche LIB verwendet wie in Abschnitt 3.3.3.3, eine NMC811-Zelle (G-10) mit einer Kapazität von 3 Ah.

Um die quasi-statischen Versuche in Brenngas-Luft-Gemischen mit einer Gasexplosion vergleichen zu können, werden in der druckfesten Kapselung die entsprechenden Brenngas-Luft-Gemische auch ohne eine LIB gezündet. Hierbei wird bei der druckfesten Kapselung ein Aluminiumdeckel verwendet. Als Zündquelle dient dabei eine Zündkerze, die sich unmittelbar neben dem Kupferblock befindet. Der Heizer in dem Kupferblock wird vor der Zündung soweit betrieben, dass auf dem Kupferblock eine Temperatur von 200 °C bis 250 °C herrscht. Dadurch wird erreicht, dass sich die Temperatur der Umgebung vor der Gasexplosion und die vor dem TR bei den Versuchen mit LIBs (200 °C bis 220 °C) im gleichen Bereich befindet.

3.3.4.2. Nachbildung der quasi-statischen Belastung

Bei diesen Versuchen soll die quasi-statische Druckbelastung der druckfesten Kapselung durch eine Gasexplosion nachgebildet werden. Dazu wird die druckfeste Kapselung aus Abschnitt 3.1.2.1 (Typ 8265) verwendet. An einer Gehäusewand befindet sich eine Zündkerze und ein piezoelektrischer Drucksensor. Als Brenngase werden Wasserstoff (H₂), Methan (CH₄), Propan (C₃H₈), Ethylen (C₂H₄) und Acetylen (C₂H₂) verwendet. Diese Brenngase befinden sich in verschiedenen hohen Konzentrationen in Luft innerhalb der druckfesten Kapselung und werden mittels eines Sauerstoffanalysators kontrolliert. Dieser Aufbau ist für die Bezugsdruckbestimmung und die dynamische Überdruckprüfung nach der

Norm IEC 60079-1 bei Zertifizierungsstellen von druckfesten Kapselungen i. d. R. vorhanden. Falls sich das Verfahren der Nachbildung von zerstörerischen Versuchen von LIBs durch Gasexplosionen durchsetzen sollte, wäre das benötigte Equipment somit bereits verfügbar. Als Grundlage dieser Versuche dienen die Explosionsdrücke p_{ex} und die zeitlichen Explosionsdruckanstiege $(dp/dt)_{\text{ex}}$ der NMC811-Zellen mit 3 Ah aus der Untersuchung verschiedener Zellchemien (Abschnitt 5.2.1). Eine Temperaturmessung findet an der Außen- und Innenwand der druckfesten Kapselung statt. Außerdem befinden sich zwei Thermoelemente lose im Innenraum. Allerdings wird die Temperatur nicht bei allen Versuchen mit aufgezeichnet. Die druckfeste Kapselung ist durch die zerstörenden Versuche mit LIBs stark verschmutzt, deshalb wird diese vor den Gasversuchen gereinigt.

4. Auswertungsmethoden

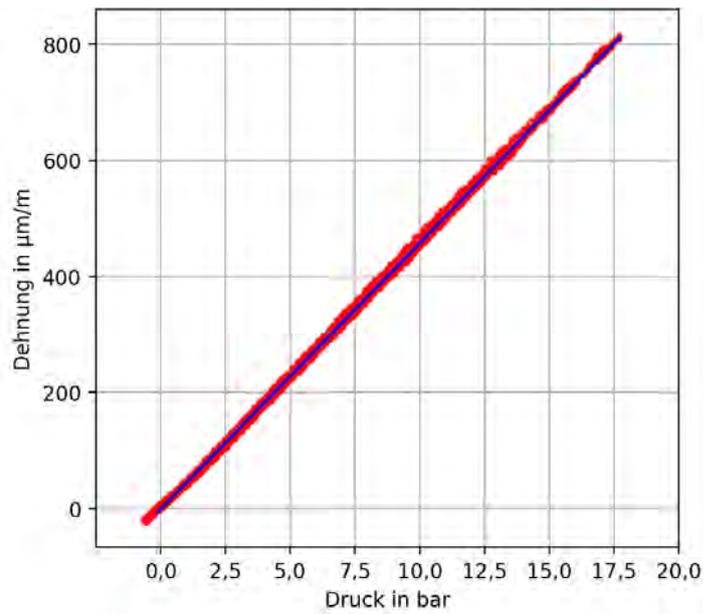
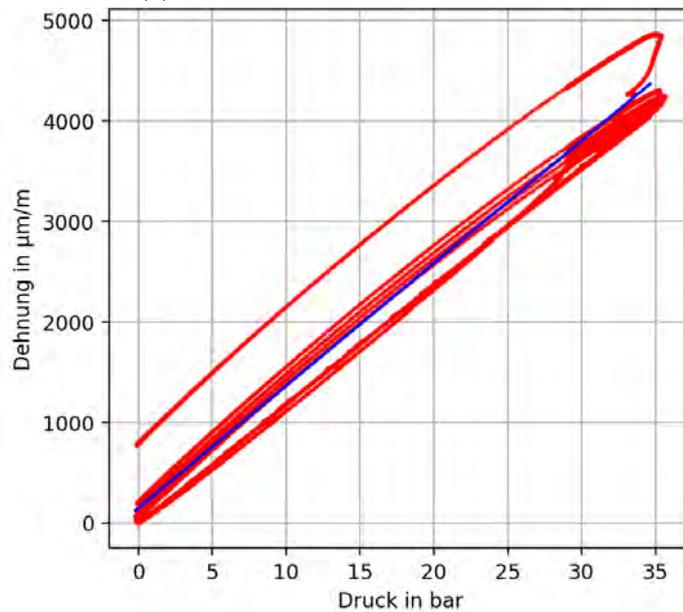
Im folgenden Kapitel werden die Methoden aufgeführt, welche für das Verständnis der Ergebnisse in Kapitel 5 relevant sind. Alle Messergebnisse werden dabei mittels Pythonskripten ausgewertet.

4.1. Dehnung

Die maximale Dehnung des Materials wird, wie in Abschnitt 3.2.1 beschrieben, über Dehnungsmessstreifen (DMS) unter Berücksichtigung der entsprechenden k -Faktoren ermittelt. Bei manchen Dehnungsverläufen der quasi-statischen Versuche kommt es zu plötzlichen Dehnungsspitzen. Da diese Signale zeitunabhängig auftreten, wird davon ausgegangen, dass es sich um EMV-Störungen, welche auf das Oszilloskop wirken, handelt. Um die Dehnungsspitzen nicht mit in die Auswertung einfließen zu lassen, werden die Datenverläufe auf dieses Verhalten hin kontrolliert und ggf. korrigiert. Dies geschieht indem das 90 %-Quantil von 10.000 Datenpunkten bestimmt wird und die Daten, welche darüber liegen, für die weitere Auswertung nicht berücksichtigt werden.

Wenn die Dehnung nach einem Versuch nicht auf den ursprünglichen Wert zurückfällt, ist dies ein Indiz dafür, dass plastische Verformung stattgefunden hat. Dies lässt sich allerdings nur bestätigen, wenn nachgewiesen werden kann, dass die Dehnung im zeitlichen Verlauf nicht wieder auf den Ursprungswert sinkt. Das kann z. B. im Nachhinein mittels einer Lehre belegt werden. Fällt die Dehnung während eines Versuchs auf ihren Ursprung zurück, handelt es sich lediglich um eine elastische Verformung.

Bei den statischen Versuchen verhalten sich Druck und Dehnung proportional zueinander, sodass durch die lineare Regression die sogenannte statische Gerade ermittelt werden kann. Diese beschreibt die druckabhängige Dehnung. Abb. 4.1 zeigt statische Geraden, welche durch mehrere Versuche ermittelt werden. Dabei zeigt Abb. 4.1a im Gegensatz zu Abb. 4.1b ein akzeptables Bestimmtheitsmaß (R^2). Das geringere R^2 ist darauf zurückzuführen, dass die Dehnungswerte in diesem Fall nach einem Versuch nicht mehr auf den Ursprung zurückgefallen sind.

(a) Baustahl, 8 mm, R^2 von 100 %(b) Aluminium, 8 mm, R^2 von 98,3 %

— Statische Gerade — Mehrere Einzelversuche

Abb. 4.1.: Ermittlung der statischen Geraden und dessen Bestimmtheitsmaß R^2 für die verschiedenen Flansche aus statischen Druck-Dehnungs-Messwerten mehrerer Versuche (in Anlehnung an Abb. 6 aus [16])

Im Falle der dynamischen Versuche mit Drucküberhöhung, pressure piling (PP), ist die Durchführung solcher Regression nicht sinnvoll, wie in Abb. 4.2 zu erkennen. Die Abbildung zeigt die Druckabhängigkeit der Dehnung eines Versuches (Aluminium 8 mm, H₂, mit Vordruck), wobei kein Zusammenhang dieser Größen sichtbar ist. Bei den quasi-statischen Versuchen und den dynamischen Versuchen ohne PP unterliegt die Druck-Dehnungsbeziehung einem Hysterese-Effekt, sodass eine Regression auch hier nicht sinnvoll ist.

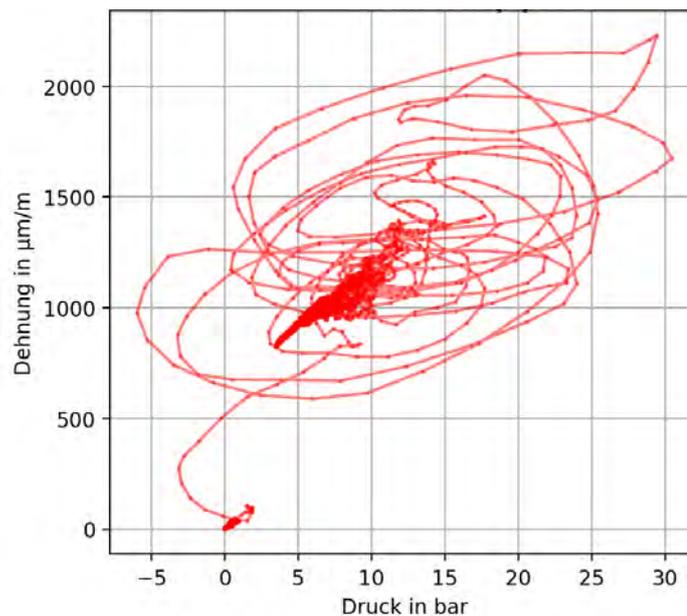


Abb. 4.2.: Druck-Dehnungsdiagramm eines dynamischen Versuches mit PP

Für die Versuche kann die theoretische maximale Dehnung für den entstandenen Druck berechnet werden. Bei den statischen und dynamischen Versuchen entsprechen die Flansche einer Kreisplatte. Da die Flansche mit dem Rohr nicht durch eine Schweißnaht, sondern durch eine Schraubverbindung verbunden sind (siehe Abschnitt 3.1.1.1), kann nicht von einer theoretisch einwandfreien, fest eingespannten Kreisplatte ausgegangen werden. Somit werden die beiden Extrema, eine festeingespannte und eine gelenkig gelagerte Kreisplatte aus Abschnitt 2.4.1, verwendet, um den theoretischen Bereich zu definieren. Die verwendeten Flansche haben einen Radius R von 109 mm und werden mit einem Radius r von 80,75 mm belastet. Die Wandstärke h variiert zwischen 8 mm, 16 mm und 22 mm, der E-Modul E variiert je nach verwendetem Material (siehe (G-37), (G-38), und (G-39)). Aus den Gleichungen 2.5 und 2.6 folgt mit den oben genannten Angaben Gleichung 4.1, woraus sich die untere und obere Grenze der theoretischen Steigungen der statischen

Geraden $(d\varepsilon/dp)_{\text{gelenkig}}$ und $(d\varepsilon/dp)_{\text{fest}}$ in $\frac{\mu\text{m}/\text{m}}{\text{bar}}$ ergeben, wenn E in der Einheit bar und h in mm eingesetzt werden.

$$\begin{aligned} \text{Kreisplatte: } (d\varepsilon/dp)_{\text{gelenkig}} &= \frac{12.663 \text{ mm}^2 \cdot 10^6 \mu\text{m}/\text{m}}{h^2 \cdot E} \\ (d\varepsilon/dp)_{\text{fest}} &= \frac{5.558,98 \text{ mm}^2 \cdot 10^6 \mu\text{m}/\text{m}}{h^2 \cdot E} \end{aligned} \quad (4.1)$$

Bei der Berechnung der theoretischen druckabhängigen Dehnung für die quasi-statischen Versuche in der druckfesten Kapselung (G-3) wird die Gleichung 2.7 aus Abschnitt 2.4.1 für eine Rechteckplatte verwendet, sodass für die theoretische Steigung der statischen Geraden die Grenzen aus Gleichung 4.2 gelten.

$$\begin{aligned} \text{Rechteckplatte: } (d\varepsilon/dp)_{\text{gelenkig}} &= 25,5 \frac{\mu\text{m}/\text{m}}{\text{bar}} \\ (d\varepsilon/dp)_{\text{fest}} &= 27,5 \frac{\mu\text{m}/\text{m}}{\text{bar}} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Bei der theoretischen Betrachtung der Materialien lassen sich die theoretischen Fließgrenzen bestimmen. Die materialabhängigen Grenzen werden ermittelt, indem die entsprechende Fließgrenze (G-37, G-38) in N/mm^2 durch den E-Modul in MPa dividiert wird. Anschließend erfolgt die Umrechnung dieser dimensionslosen Größe in $\mu\text{m}/\text{m}$.

4.2. Druck

Der Druck wird je nach Sensor bzw. Messtechnik als Absolutwert oder Relativwert aufgezeichnet. Im Falle des Absolutwerts wird dieser in einen Relativwert umgewandelt. Anschließend wird bei den dynamischen Versuchen normenkonform ein 5 kHz Butterworth Tiefpassfilter 2ter Ordnung angewendet [4]. Dies wird auch bei den quasi-statischen Versuchen durchgeführt. Der Zeitpunkt Null ist in dieser Arbeit definiert, an dem der Explosionsdruck p_{ex} auftritt.

Um den zeitlichen Explosionsdruckanstieg $(dp/dt)_{\text{ex}}$ zu bestimmen, wird bei den dynamischen Versuchen die Methode nach der Norm IEC 60079-1, wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, verwendet. Bei den quasi-statischen und kombinierten Versuchen variieren die Druckverläufe, welche diese Methode nicht zielführend erscheinen lässt. Aus diesem Grund wird bei der Ermittlung von $(dp/dt)_{\text{ex}}$ in diesen Fällen eine rekursive Fit-Methode verwendet [17]. In der Zeitspanne vor dem Druckanstieg und dem Explosionsdruck wird jeweils für ein Intervall von 500 oder 10.000 Messwerten eine lineare Regression durchgeführt. Die Anzahl der Messwerte innerhalb des Intervalls hängt von dem Druckverlauf selbst und

dessen Aufnahmezeit ab und wird so gewählt, dass es physikalisch sinnvoll ist. Der Maximalwert der ermittelten Steigungen aus den Regressionen entspricht schließlich $(dp/dt)_{ex}$. Abb. 4.3 zeigt beispielhaft einen zeitlichen Druckverlauf, die Steigungen der verschiedenen Regressionen und dessen Maximalwert $(dp/dt)_{ex}$ als Gerade. In diesem Fall wurde ein Intervall von 500 Werten verwendet.

Wird zusätzlich nach Gleichung 2.1 das freie Volumen der druckfesten Kapselung miteinbezogen, wird der K_G - bzw. K_{LIB} -Wert erhalten.

Um ggf. die Dauer der Druckbelastung einschätzen zu können, wird die Zeit ermittelt, die der Druck benötigt, um von 50 % des Explosionsdruckes wieder auf 50 % zu fallen.

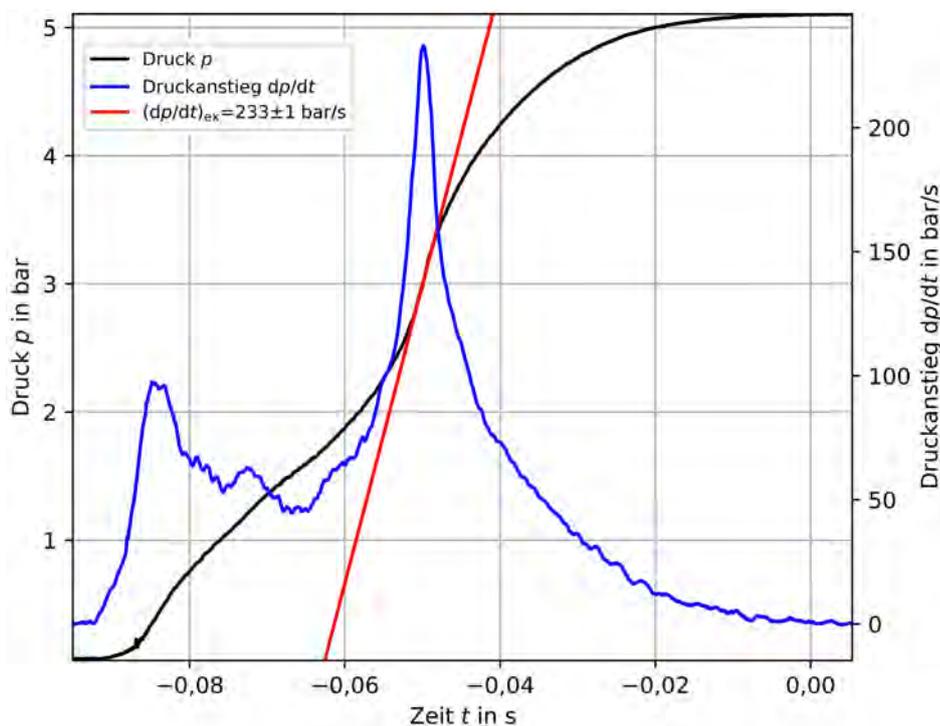


Abb. 4.3.: Bestimmung von $(dp/dt)_{ex}$ am Beispiel des Druckanstiegs des TR einer NMC811-Zelle (G-10)

4.3. Energiemenge der Lithium-Ionen-Batterie

Die Energiemenge der Lithium-Ionen-Batterie (LIB) wird durch Gleichung 2.3 bestimmt. Als Kapazität wird diejenige verwendet, die vor dem Versuch durch den Potentiostaten/Galvanostaten ermittelt wurde. Kommt es während des Versuches zu Kontaktierungsschwachstellen, sodass die Spannung der LIB über den Multiplexer nicht ermittelt werden kann, wird die Spannung verwendet, welche im Vorfeld durch ein Multimeter gemessen wurde.

4.4. Reproduzierbarkeit

Die Reproduzierbarkeit beschreibt die Präzision mehrerer Einzelmessungen derselben Größe unter gleichen Umgebungsbedingungen. Ein geeignetes Maß dafür ist die Standardabweichung [73]. Sollen zwei Versuchsreihen mit unterschiedlicher Versuchsanzahl verglichen werden, dann ist die Standardabweichung mit einer Unsicherheit nach der studentschen t-Verteilung behaftet. Die Standardabweichung wird dazu mit einem Faktor multipliziert, welcher von der Anzahl der Versuche abhängig ist [74]. Dieser Faktor kann in entsprechenden Tabellenwerken nachgeschlagen werden. Wird im Folgenden von der Reproduzierbarkeit gesprochen, ist damit die Standardabweichung inkl. dessen Unsicherheit gemeint. Als Wahrscheinlichkeit für das Vertrauensintervall wird 95 % gewählt.

5. Ergebnisse

Das folgende Kapitel stellt die gewonnenen Ergebnisse dieser Arbeit dar. Zunächst werden die beiden Extrema, statische und dynamische Belastung, erläutert und miteinander verglichen. Anschließend werden die Ergebnisse aus der quasi-statischen Belastung in Form einer thermisch durchgehenden Lithium-Ionen-Batterie (LIB) beschrieben. Des Weiteren werden die Folgen der kombinierten Belastungen für die druckfeste Kapselung geschildert. Schließlich wird die quasi-statische Belastung mit den anderen Belastungsarten verglichen. Am Ende jedes Abschnitts sind die jeweiligen Ergebnisse in einer farbigen Textbox zusammengefasst. Eine Übersicht über alle Versuchsdaten ist im Abschnitt A.1.1 des Anhangs zu finden. Bei einigen Abbildungen, wie beispielsweise in Abb. 5.10, sind Einzelversuche und deren Mittelwerte dargestellt. Die Grenzen, Mittelwert \pm Standardabweichung, sind dabei in der gleichen Farbe wie die Einzelversuche, aber mit mehr Transparenz, dargestellt.

5.1. Statische und dynamische Belastung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der statischen und dynamischen Versuche erläutert und miteinander verglichen.

5.1.1. Statische Belastung

Um einzuschätzen, wie das Material auf diese Belastung reagiert, werden bei dieser Belastungsart die Steigungen der statischen Geraden, also die druckabhängigen Dehnungen, aus Abschnitt 4.1 verglichen. Abb. 5.1 zeigt diese Steigungen und das Bestimmtheitsmaß für die ermittelten Geraden. Es sind die verschiedenen Materialien mit unterschiedlichen Wandstärken dargestellt. Außerdem wird zwischen Flanschen mit und ohne Bohrung im Zentrum unterschieden. Zusätzlich sind die Ergebnisse der Dehnungsmessung an den verschiedenen Messpositionen (mittig und seitlich) dargestellt.

Zwischen den Messpositionen der Dehnungsmessstreifen (DMS) seitlich und mittig auf dem Flansch lässt sich kein signifikanter Unterschied feststellen. Die gewählten Positionen sind demnach beide noch im Bereich der maximalen Dehnung, welche im Zentrum des Flansches auftritt. Zu erkennen ist, dass Flansche mit einer Bohrung generell geringfügig niedrigere Steigungen aufweisen als Flansche ohne Bohrung. Dies wird daran liegen, dass die dadurch hervorgerufene inhomogene Form die Stabilität des Flansches beeinträchtigt. Im Bezug auf die Wandstärke lässt sich

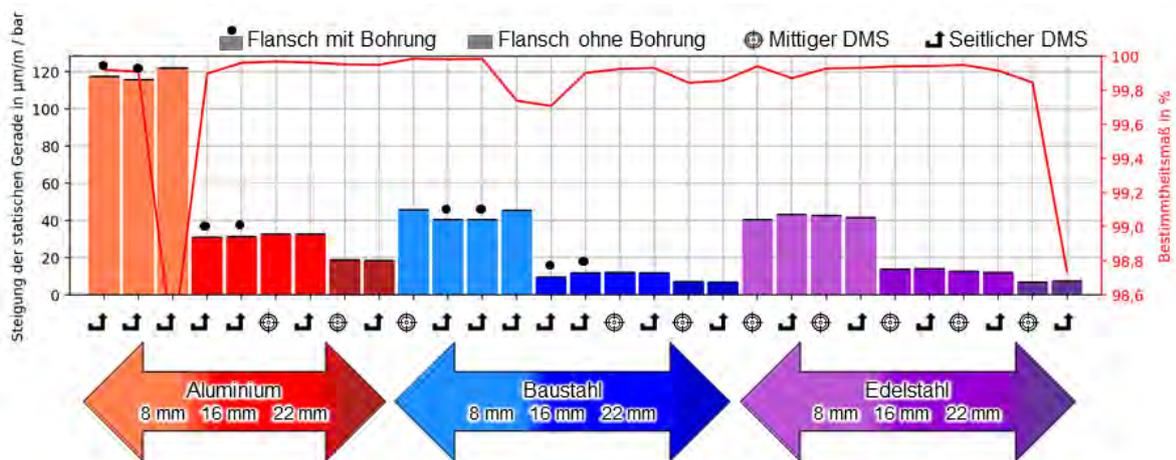


Abb. 5.1.: Steigungen der statischen Geraden und deren Bestimmtheitsmaß in Abhängigkeit der Flanscheigenschaften und Messposition (in Anlehnung an Abb. 8 aus [16])

feststellen, dass, je höher die Wandstärke ist, desto niedriger ist die Steigung. Dies lässt sich dadurch erklären, dass, je mehr Material zur Verfügung steht, desto stabiler ist der Flansch. Aluminium weist im Vergleich der untersuchten Materialien die höchsten Steigungen auf, wohingegen sich Baustahl und Edelstahl im gleichen druckabhängigen Dehnungsbereich befinden. Dies erklärt sich durch die unterschiedlichen E-Moduln der Materialien. Die rote Linie in der Abbildung zeigt das Bestimmtheitsmaß (R^2). Es fällt auf, dass der Versuch mit einem 8 mm starken Aluminiumflansch ohne zentrale Bohrung ein geringeres R^2 aufweist als die anderen Versuche. Dies liegt daran, dass die Differenz zwischen Dehnung vor

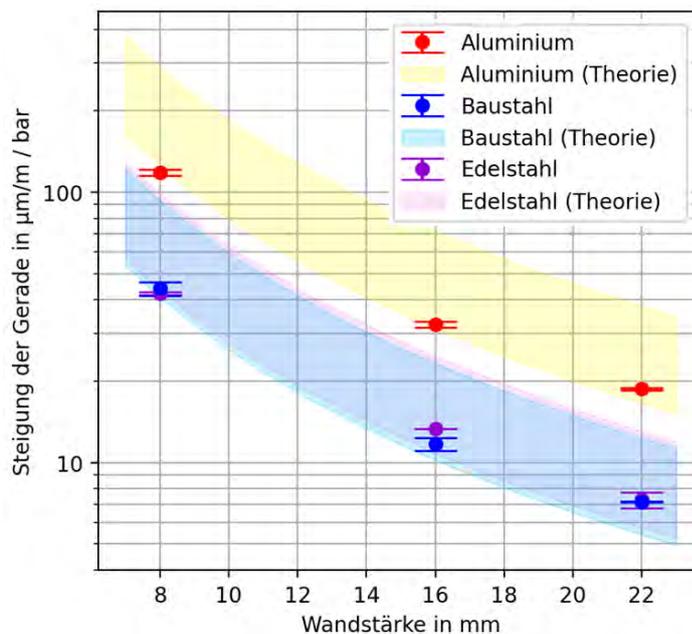


Abb. 5.2.: Druckabhängige Dehnung im Vergleich mit theoretischen Werten für die verwendeten Materialien nach Gleichung 4.1 (in Anlehnung an Abb. 9 aus [16])

und nach dem Versuch von Versuch zu Versuch gestiegen ist. Das heißt, dass der Flansch sich durch die statische Belastung kaltverfestigt hat.

Für den Literaturvergleich werden die Versuche mit Flanschen, mit und ohne Bohrung, sowie der DMS-Position mittig und seitlich zusammengefasst. Abb. 5.2 zeigt die mittleren Steigungen der statischen Geraden aus den Messergebnissen für die verschiedenen Materialien und dessen Wandstärken. Des Weiteren sind die Bereiche dargestellt, welche durch die Theorie nach Gleichung 4.1 bestimmt werden können. Die ermittelten Steigungen der statischen Geraden der Messwerte liegen nah an der theoretischen Dehnung einer fest eingespannten Kreisplatte. Das bedeutet, dass die druckabhängige Dehnung des hier verwendeten Versuchsaufbaues in Form einer Kreisplatte durch die theoretischen Grundlagen repräsentativ wiedergegeben wird.

5.1.2. Dynamische Belastung

Für diese Versuchsreihe werden die Versuchsaufbauten aus Abschnitt 3.3.2 verwendet. Der direkte zeitliche Vergleich zwischen einer Belastung der druckfesten Kapselung, mit und ohne Drucküberhöhung (PP), ist in Abb. 5.3 beispielhaft dargestellt. Der Zeitpunkt Null entspricht hier dem Start der Messaufzeichnung. Der Vergleich zeigt, dass bei den Versuchen mit PP die Messsignale des Druckes und der Dehnung für einige Millisekunden schwingen. Diese Schwingung hat ihre Ursache in dem schnelleren Druckanstieg, welcher bei PP auftritt. Dieser geschieht durch die Vorverdichtung des Brenngas-Luft-Gemisches.

Bei den Versuchen mit Wasserstoff (H_2), mit Vordruck und ohne PP ist eine Druckanstiegszeit (DAZ) unter 5 ms aufgetreten. Dies steht im Widerspruch zu den Kriterien für PP in der Norm IEC 60079-1, wonach bei einer DAZ von unter 5 ms von PP ausgegangen wird. Abb. 5.4 zeigt die normierten Fouriertransformierten der Druckverläufe aus Abb. 5.3. Diese zeigen die Amplituden der Schwingungen im Frequenzbereich auf. Ein deutlicherer Parameter, ob PP aufgetreten ist, ist in diesem Fall das Integral über die Fouriertransformation, welches größer wird, je mehr Frequenzen angeregt werden.

Abb. 5.5 zeigt die Mittelwerte und Literaturdaten des Explosionsdruckes und des K_G -Wertes nach Gleichung 2.1 [10, 15]. Die Versuche mit einem Vordruck weisen höhere Werte auf als ohne Vordruck. Im Fall von PP werden höhere Messwerte, welche dazu noch eine größere Standardabweichung aufweisen, erreicht als wenn kein PP auftritt. Durch die Abbildung wird deutlich, dass durch den zeitlichen Explosionsdruckanstieg $(dp/dt)_{ex}$ bzw. den K_G -Wert abgelesen werden kann, ob PP aufgetreten ist oder nicht. Dass der gemessene Explosionsdruck der Versuche ohne PP und ohne Vordruck geringer ist als die Literaturdaten, liegt an der Position der Zündung und der unterschiedlichen Gehäusegeometrie. Bei den Versuchen in

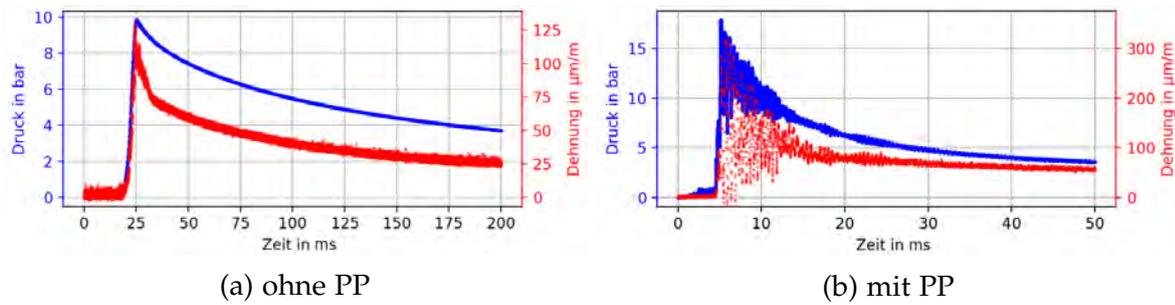


Abb. 5.3.: Dynamischer Druck-Dehnungsverlauf eines 16 mm starken Baustahlflansches, welcher durch H_2 mit Vordruck belastet wird (in Anlehnung an Abb. 10 aus [16])

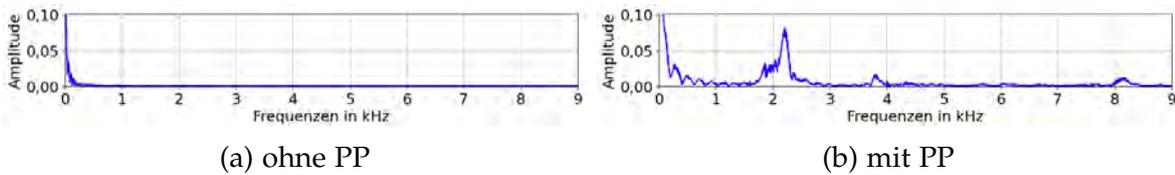


Abb. 5.4.: Normierte Fouriertransformierte des Druckverlaufs aus Abb. 5.3 von dynamischen Versuchen mit und ohne PP

der Literatur wurde das Gemisch mittig im Gehäuse gezündet, sodass die heißen Verbrennungsgase an die Gehäusewände erst im späteren Verlauf Wärme abgeben können, welches einen höheren Explosionsdruck erzeugt [75]. Des Weiteren wurden bei der Ermittlung der Literaturdaten mehrere Versuche durchgeführt und der jeweilige maximale Wert als Literaturwert festgelegt.

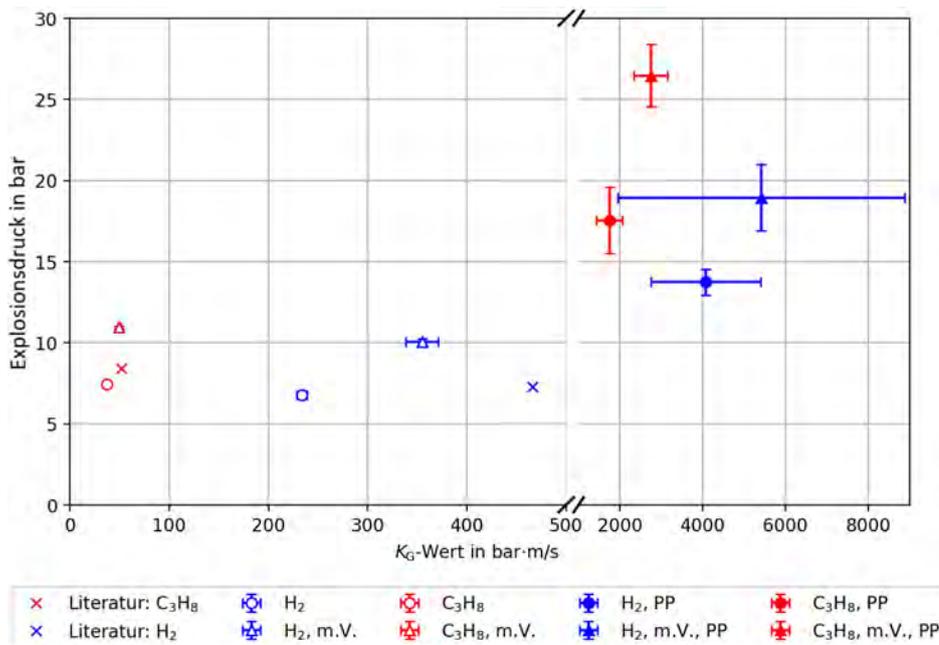


Abb. 5.5.: Literaturvergleich der Explosionsdrücke und der K_G -Werte von dynamischen Versuchen mit verschiedenen Brenngas-Luft-Gemischen (Literaturdaten aus Tabelle 2.1)

5.1.3. Vergleich der statischen und dynamischen Belastung

Abb. 5.6 zeigt die Druck-Dehnungs-Diagramme der verschiedenen Flanschmaterialien und -stärken. In grün dargestellt ist der Mittelwert der ermittelten statischen Geraden und dessen Standardabweichung aus Abschnitt 5.1.1. In grau ist der Bereich bis zur Fließgrenze des jeweiligen Materials abgebildet, wobei der Bereich, welcher durch die theoretisch möglichen Werte einer fest eingespannten und einer gelenkig gelagerten Kreisplatte nicht eingefärbt ist. Dadurch wird erreicht, dass der weiße Bereich die theoretisch möglichen Werte darstellt.

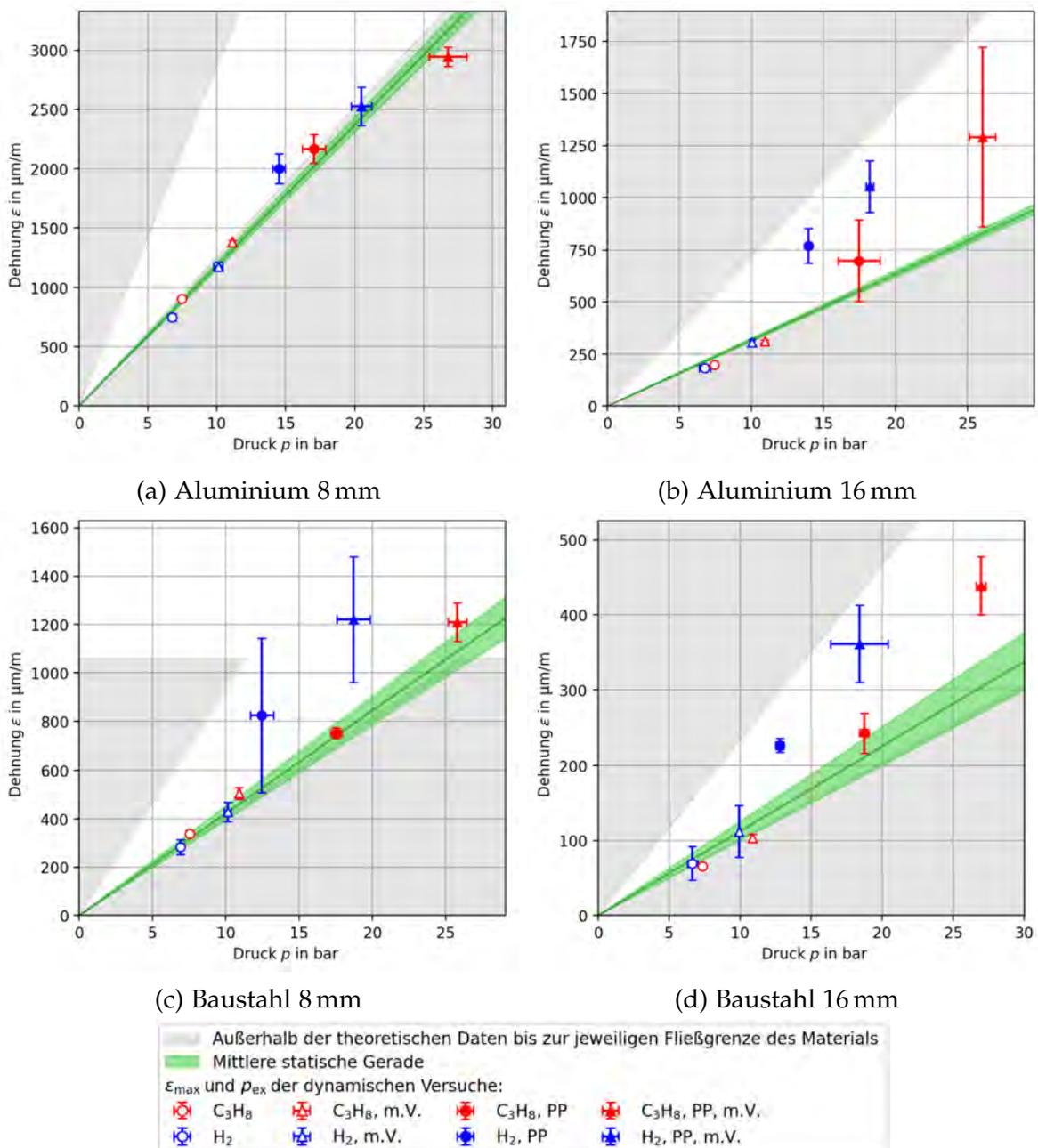


Abb. 5.6.: Druck-Dehnungsdiagramme der statischen und dynamischen Versuche (in Anlehnung an Abb. 14 aus [16])

Zusätzlich sind die Messergebnisse ε_{\max} und p_{ex} der dynamischen Versuche der verschiedenen Gasgemische mit und ohne Vordruck und mit und ohne PP dargestellt. Die Versuchsdaten der statischen Versuche liegen nahe dem Bereich der theoretisch möglichen Werte einer eingespannten Kreisplatte, wie schon in Abb. 5.2 gezeigt. Die dynamischen Versuche ohne PP liegen im Bereich der statischen Geraden. Das bedeutet, dass die statischen und die dynamischen Belastungen ohne PP als gleichwertig angesehen werden können in Bezug auf die Materialbeanspruchung, wie es die Norm IEC 60079-1 beschreibt. Somit haben $(dp/dt)_{\text{ex}}$, die Dauer des Druckes und die Temperatur hier keinen nennenswerten Einfluss auf die Materialbeanspruchung der druckfesten Kapselung. Die dynamischen Versuche mit PP haben generell eine höhere Standardabweichung in Bezug auf die Dehnung und den Druck untereinander als die dynamischen Versuche ohne PP. Einige Versuchsdaten liegen oberhalb der statischen Gerade, was für eine höhere Belastung des Materials durch die Frequenzanregung spricht (siehe dazu Abschnitt 5.1.2). Der Unterschied zwischen PP und kein PP lässt sich in den Messdaten an dem Explosionsdruck und $(dp/dt)_{\text{ex}}$ identifizieren.

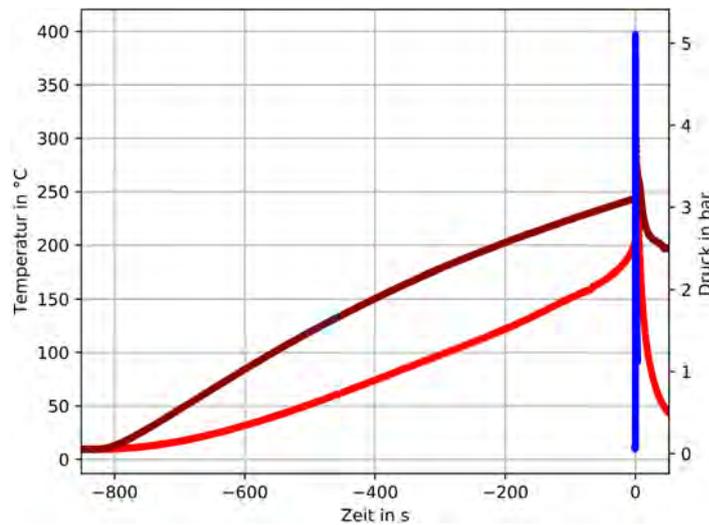
Im Nachhinein wurde festgestellt, dass die 8 mm starken Flansche sich während der Versuche plastisch verformt haben. Diese nicht rotationssymmetrischen Verformungen sind vermutlich auf Vorversuche mit unterschiedlich starken Anzugmomenten der Verbindungsschrauben zurückzuführen. Bei den 16 mm starken Flanschen ist dies nicht aufgetreten.

Statische und dynamische Belastung

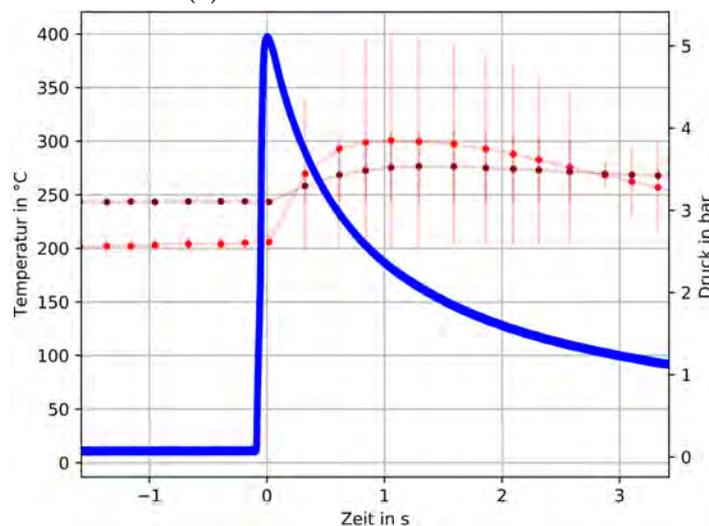
- Es gibt keinen signifikanten Unterschied zwischen den Dehnungswerten an der seitlichen und mittigen Messposition.
- Flansche mit einer mittigen Bohrung erfahren eine etwas niedrigere druckabhängige Dehnung als Flansche ohne Bohrung.
- Je höher die Wandstärke ist, desto niedriger ist die druckabhängige Dehnung.
- Baustahl und Edelstahl befinden sich im gleichen Bereich der druckabhängigen Dehnung.
- Theoretische Dehnungswerte einer Kreisplatte können die Messergebnisse repräsentieren.
- Bei PP treten Schwingungen auf. Der Explosionsdruck und dessen Standardabweichung sind höher als ohne PP.
- Die DAZ ist keine geeignete Größe, um von PP auszugehen. Geeignete Parameter wären: Explosionsdruck, dessen Standardabweichung, das Integral der Fouriertransformation des Druckverlaufs, $(dp/dt)_{ex}$ bzw. K_G -Wert.
- Dynamische Versuche mit Vordruck erreichen einen höheren Explosionsdruck als ohne.
- Die Druckbelastung der dynamischen Versuche ist geringer als die gemäß den Explosionskennzahlen der Literatur.
- Die statische und dynamische Belastung ohne PP können unterhalb der Fließgrenze des Materials als gleichwertig angesehen werden. Das heißt, dass $(dp/dt)_{ex}$, Dauer des Druckes und Temperatur hier nicht relevant für die Materialbeanspruchung sind. Mit PP kann durch die Materialschwingung eine höhere Belastung auftreten.

5.2. Quasi-statische Belastung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der quasi-statischen Versuche erläutert. Dabei werden verschiedene Versuchsaufbauten verwendet, wie in Abschnitt 3.3.3 beschrieben.



(a) Gesamte Versuchsdauer



(b) Bereich des Druckanstieges



Abb. 5.7.: Zeitlicher Temperatur- und Druckverlauf des TR einer NMC-Zelle (G-10)

Abb. 5.7 zeigt am Beispiel einer LIB der Zellchemie Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid (NMC) den zeitlichen Temperaturverlauf auf dem Kupferblock, in dem sich das Heizelement befindet, und auf der Oberfläche der LIB. Des Weiteren ist der Druckverlauf während des thermischen Durchgehens (TR) dargestellt. Dieser ist in dem zeitlichen Zoom in Abb. 5.7b deutlicher zu erkennen als in der Abbildung über die gesamte Versuchsdauer (Abb. 5.7a). Der Zeitpunkt des Explosionsdruckes entspricht in den Abbildungen dem Zeitpunkt Null. Zu

Beginn des Versuchs wird das Heizelement in Betrieb genommen. Die Temperatur des Kupferblocks steigt dadurch stetig an, wodurch die LIB erhitzt wird. Ab einem gewissen Zeitpunkt steigt die Temperatur der Zelloberfläche schneller an. In dieser Zeit geschieht auch der Druckanstieg. Dies ist das TR der LIB. Nach dem TR sinken die Temperaturen und der Druck wieder. Das Heizelement wird ausgeschaltet, wodurch dessen Temperatur ebenso abklingt. Bei den Versuchen ist durch die verwendeten LIBs eine maximale Außenwandtemperatur von $34\pm 3\text{ °C}$ und eine maximale Temperaturerhöhung der Außenwand um $11\pm 4\text{ °C}$ aufgetreten. Diese Temperatur würde nicht ausreichen, um eine Zündung außerhalb der verwendeten druckfesten Kapselung zu verursachen, wenn dort explosionsfähige Atmosphäre vorhanden wäre.

Wenn Versuche in der druckfesten Kapselung vom Typ 8264 (Abschnitt 3.1.2.2) durchgeführt werden, wird in einigen Fällen die Dehnung des Materials erfasst. Die gemessenen Explosionsdrücke sind in Abb. 5.8 über die gemessenen maximalen Dehnungen aufgetragen. Die Dehnung steigt dabei stetig mit dem Druck. Aus den gemessenen Daten wird eine lineare Regression durchgeführt, welche ein Bestimmtheitsmaß von 96 % besitzt. Neben dieser Regression sind die theoretischen Werte für eine gelenkig gelagerte und eine fest eingespannte Rechteckplatte aus Gleichung 4.2 dargestellt. Die Theorie nach Gleichung 4.2 sagt eine wesentlich niedrigere Dehnung voraus, als bei den Versuchen gemessen wurde. Die theoretische Berechnung der Dehnung ist für diese druckfeste Kapselung somit nicht zielführend, da die tatsächliche Dehnung weitaus größer ist. Der Grund dafür ist, dass es sich bei den theoretischen Gleichungen für eine Rechteckplatte lediglich um Näherungsformeln handelt [53, 54].

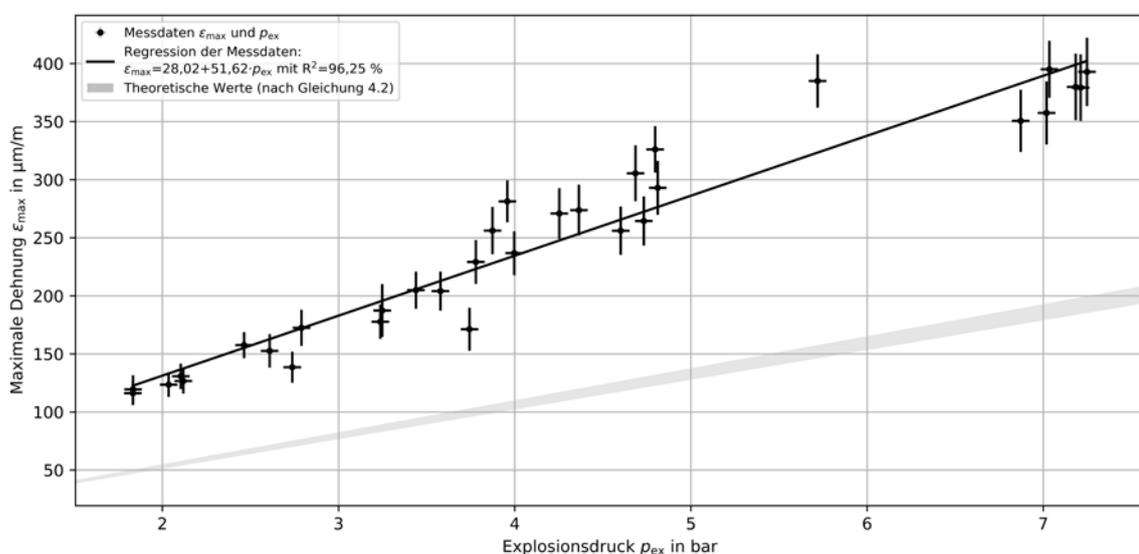


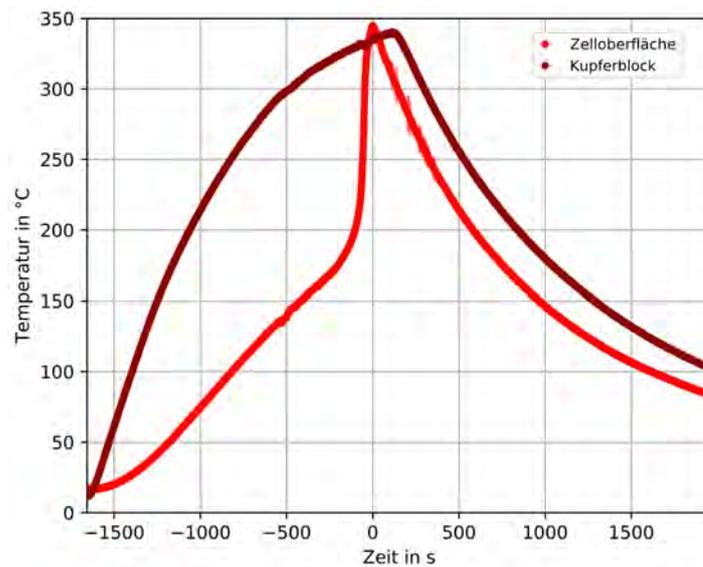
Abb. 5.8.: Druckabhängige Dehnung der quasi-statischen Versuche im Vergleich mit den theoretischen Werten nach Gleichung 4.2

Die freigesetzte Gasmenge der LIBs kann nicht durch die Gasgleichung (Gleichung 2.2) bestimmt werden. Durch die konstruktionsbedingte Gasdurchlässigkeit der druckfesten Kapselung kann nicht von einem konstanten Volumen ausgegangen werden. Somit ergibt die Bestimmung der freigesetzten Gasmenge i. d. R. physikalisch keine sinnvollen Werte.

5.2.1. Zellchemie

Bei dieser Versuchsreihe wird der Einfluss der Zellchemie auf die Materialbeanspruchung der druckfesten Kapselung untersucht. Das Ziel ist es, für die weiteren Versuchsreihen die Zellchemie zu finden, welche im Fall eines TR die stärkste Belastung für die druckfeste Kapselung ergibt. Als Kriterien dafür werden der entstehende Explosionsdruck und $(dp/dt)_{ex}$ in Abhängigkeit der Energiemenge der LIB und die Reproduzierbarkeit dieser Werte verwendet. Die Reproduzierbarkeit ist für die Qualität der Ergebnisse entscheidend und wird jeweils für Versuche unter den gleichen Rahmenbedingungen bestimmt. Das Vorgehen dafür ist in Abschnitt 4.4 beschrieben.

Bei dem Versuch mit der Zellchemie Lithium-Eisenphosphat (LFP) entstand keine wesentliche Druckerhöhung. Der zeitliche Temperaturverlauf der Zelloberfläche in Abb. 5.9a zeigt allerdings den typischen Verlauf des TR. Zunächst steigt die Temperatur der Zelloberfläche mit der Erhitzung des Kupferblocks an, wonach der steilere Anstieg der Temperatur durch das TR folgt. Der Zeitpunkt der maximalen Temperatur auf der Zelloberfläche entspricht in der Abbildung dem Zeitpunkt Null. Die Kameraaufnahmen zeigen TR-typisches Austreten von Gas und Flüssigkeiten aus der Anode, wie in Abb. 5.9b zu sehen. Dort ist auch zu sehen, dass die LIB sich zudem deformiert hat. Die äußere Hülle hat sich gelöst und die Kontaktierung ist nicht mehr gegeben. Nach dem Versuch wurde festgestellt, dass sich die LIB schwarz verfärbt hat. Deshalb ist davon auszugehen, dass die LIB trotz der nicht erkennbaren Druckerhöhung thermisch durchgegangen ist. Dass der höchste entstehende Druck bei dem TR einer LFP-Zelle wesentlich niedriger ist als beispielsweise bei einer NMC-Zelle, stimmt mit der Literatur von DUBANIEWICZ U. A. und WANG U. A. überein [11, 44]. Der Grund dafür ist, dass durch das fehlende Oxid kein zusätzlicher Sauerstoff beim TR entsteht, wie bei den anderen verwendeten Zellchemien [28]. Dass bei diesem Versuch kein Druckanstieg registriert wurde, liegt an der konstruktionsbedingt beeinträchtigten Dichtigkeit der druckfesten Kapselung. Dadurch wird die grundsätzliche Annahme bestätigt, dass LIBs dieser Zellchemie vergleichsweise sicher sind, siehe dazu Abschnitt 2.2. Aus diesem Grund wird auf weitere Versuche mit dieser Zellchemie verzichtet.



(a) Zeitlicher Temperaturverlauf



(b) Seitliche Kameraaufnahme

Abb. 5.9.: TR einer LFP-Zelle

Die anderen LIBs der zu untersuchenden Zellchemien weisen einen messbaren Druckverlauf auf. Abb. 5.10 zeigt $(dp/dt)_{ex}$ über den Explosionsdruck innerhalb der druckfesten Kapselung. Da nicht alle dargestellten Zellchemien dieselbe elektrochemisch gespeicherte Energie aufweisen, wird auf diese normiert. Dadurch können die verschiedenen Zellchemien untereinander verglichen werden. Die Messergebnisse zeigen, dass die Zellchemie Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminiumoxid (NCA) im Mittel unterdurchschnittliche Werte aufweisen. In Bezug auf den Explosionsdruck pro Energiemenge sind die LIBs der Zellchemie Lithium-Kobaltoxid (LCO) am kritischsten, wobei die Werte der NMC-Zellen in der Streubreite der LCO-Zellen liegen. Bei den NMC-Zellen erreichen die LIBs mit 3 Ah höhere Werte als die mit 3,5 Ah. Die NMC-Zellen mit 3,5 Ah weisen allerdings

die beste Reproduzierbarkeit der untersuchten LIBs auf, als nächst bessere folgen die NMC-Zellen mit 3 Ah. In Bezug auf $(dp/dt)_{ex}$ pro Energiemenge sind die NMC-Zellen mit 3 Ah am höchsten. Ein Literaturvergleich der Messdaten von den NMC-Zellen untereinander erfolgt in Abschnitt 5.2.3. Die Versuche zeigen, dass bei den untersuchten LIBs die NMC- und die LCO-Zellen am kritischsten für die druckfeste Kapselung sind. Für die weiteren Versuche wird, aufgrund der Reproduzierbarkeit und der hohen Druckbelastung, die Zellchemie NMC weiter verwendet.

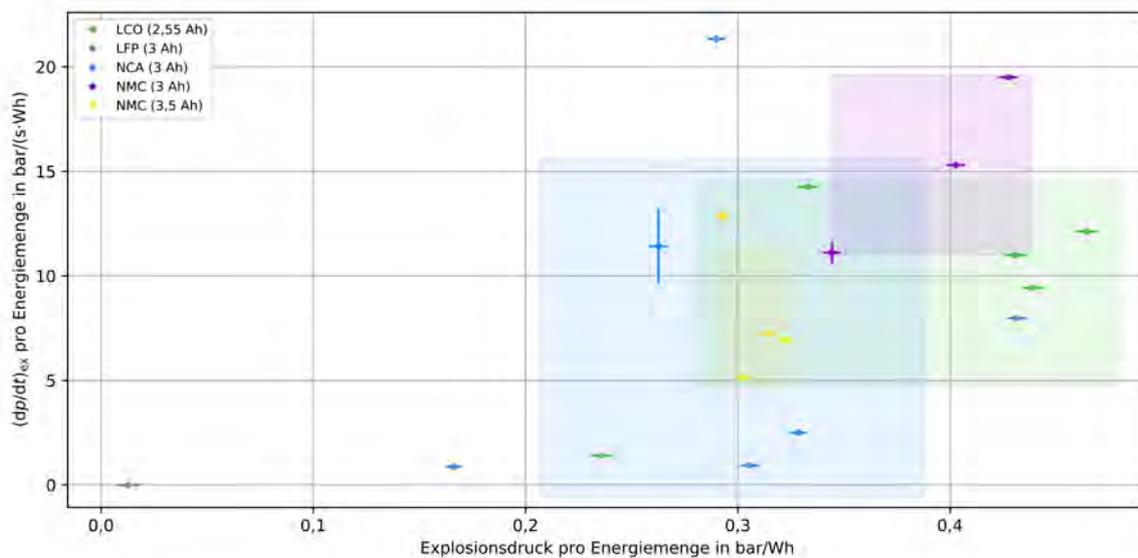


Abb. 5.10.: Explosionsdruck über $(dp/dt)_{ex}$ verschiedener Zellchemien normiert auf die Energiemenge

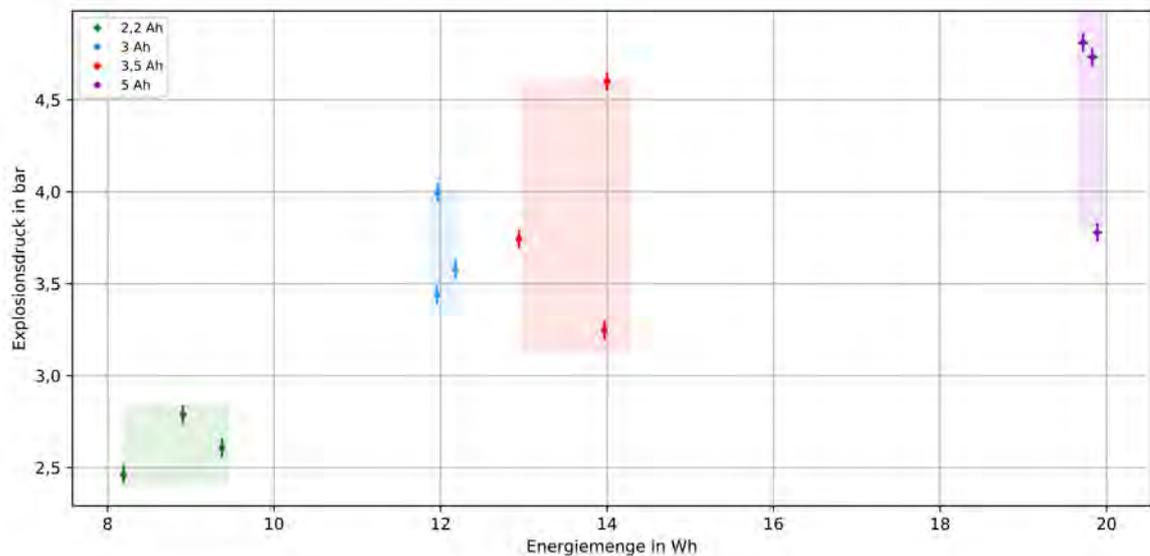
5.2.2. Kapazitäten

Um den Einfluss der Kapazität auf die Belastung der druckfesten Kapselung einschätzen zu können, werden NMC-Zellen unterschiedlicher Kapazität bei gleichem freiem Volumen und innerer Oberfläche untersucht. Abb. 5.11 zeigt die Druckbelastung der druckfesten Kapselung in Abhängigkeit der verwendeten Energiemenge der LIB. In der Legende ist die entsprechende Kapazität der LIBs von 2,2 Ah, 3 Ah, 3,5 Ah und 5 Ah zu finden.

In Abb. 5.11a ist der Explosionsdruck über die Energiemenge für die untersuchten Kapazitäten aufgetragen. Es zeigt sich, dass der Explosionsdruck mit der Kapazität bzw. Energiemenge steigt. Dieser Trend findet sich in der Literatur wieder [35, 39]. Je mehr Energie in der LIB gespeichert ist, desto mehr Energie kann auch freiwerden. Bei den hier gezeigten Versuchen ergeben sich dabei Werte zwischen 0,2 bar/Wh und 0,3 bar/Wh.

$(dp/dt)_{ex}$ ist in Abb. 5.11b dargestellt. Durch die geringe Reproduzierbarkeit

von $(dp/dt)_{ex}$ kann kein eindeutiger Trend von niedrigen Energiemengen zu höheren identifiziert werden. Im Mittel ist $(dp/dt)_{ex}$ nahezu für alle untersuchten Kapazitäten konstant. $(dp/dt)_{ex}$ scheint somit bei den untersuchten LIBs nicht von der Kapazität abhängig zu sein.



(a) Explosionsdruck

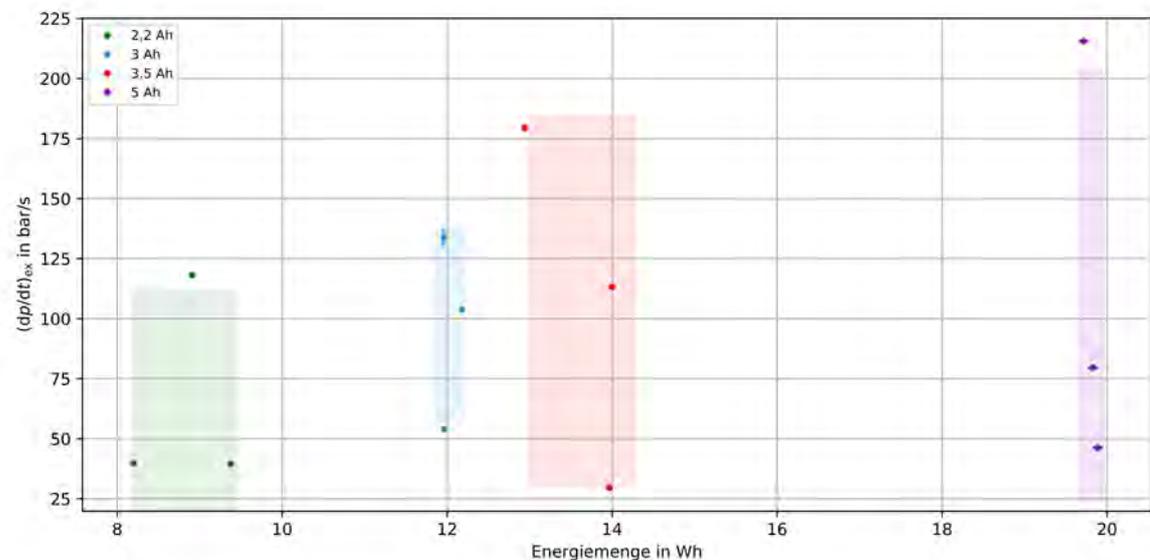
(b) $(dp/dt)_{ex}$

Abb. 5.11.: Druckbelastung von NMC-Zellen mit unterschiedlichen Kapazitäten bzw. Energiemengen

5.2.3. Gehäusegeometrie und Inertatmosphäre

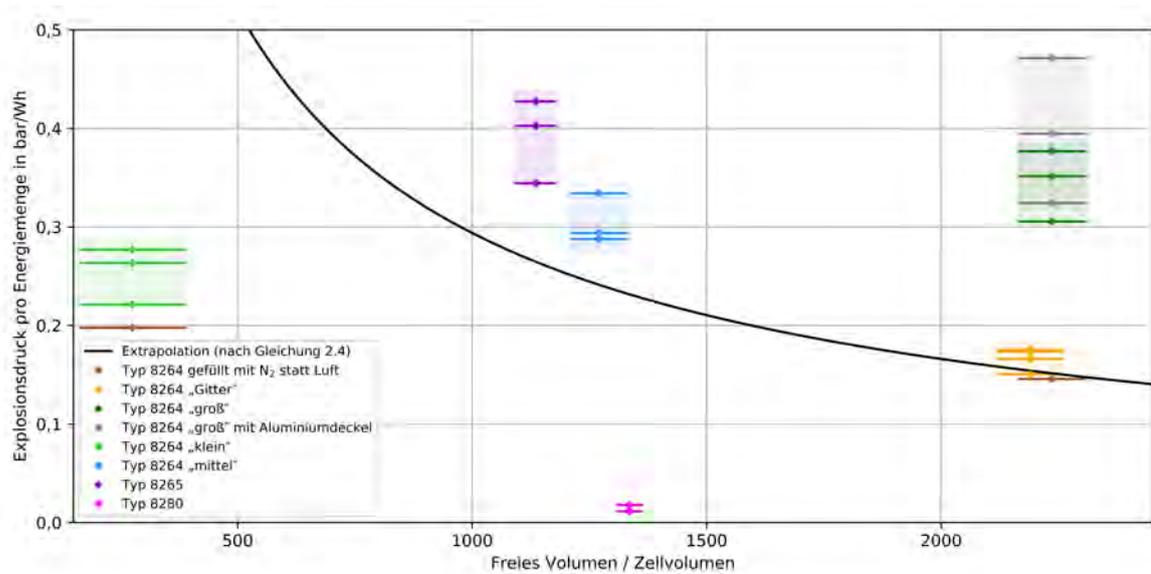
In dieser Versuchsreihe wird die Gehäusegeometrie in Form des freien Volumens und der inneren Oberfläche innerhalb der druckfesten Kapselung variiert. Die

Abhängigkeit des Explosionsdruckes p_{ex} pro Energiemenge E_{LIB} von dem Volumenverhältnis aus freiem Volumen und Zellvolumen ist in Abb. 5.12a zu sehen. Zusätzlich zu den Messergebnissen dieser Versuchsreihe sind die Ergebnisse der NMC811-Zellen mit 3 Ah aus den Versuchen aus Abschnitt 5.2.1 dargestellt. Außerdem sind die Versuchsergebnisse gezeigt, welche in Stickstoff (N_2) statt in Luft durchgeführt wurden, um den Einfluss des zusätzlichen Sauerstoffs abzubilden. In schwarz ist außerdem eine Extrapolation von Literaturdaten von DUBANIEWICZ u. A. [11] nach Gleichung 2.4 abgebildet. Obwohl die druckfeste Kapselung von Typ 8280 mit Druckentlastungselementen ein offenes System darstellt, beläuft sich das dargestellte freie Volumen auf das Innere der druckfesten Kapselung. Bei zwei von drei Versuchen konnte der Explosionsdruck gemessen werden. Bei einem Versuch wurde die Schwelle von 0,3 bar nicht überschritten, welches im Einklang mit den anderen beiden Versuchen ist.

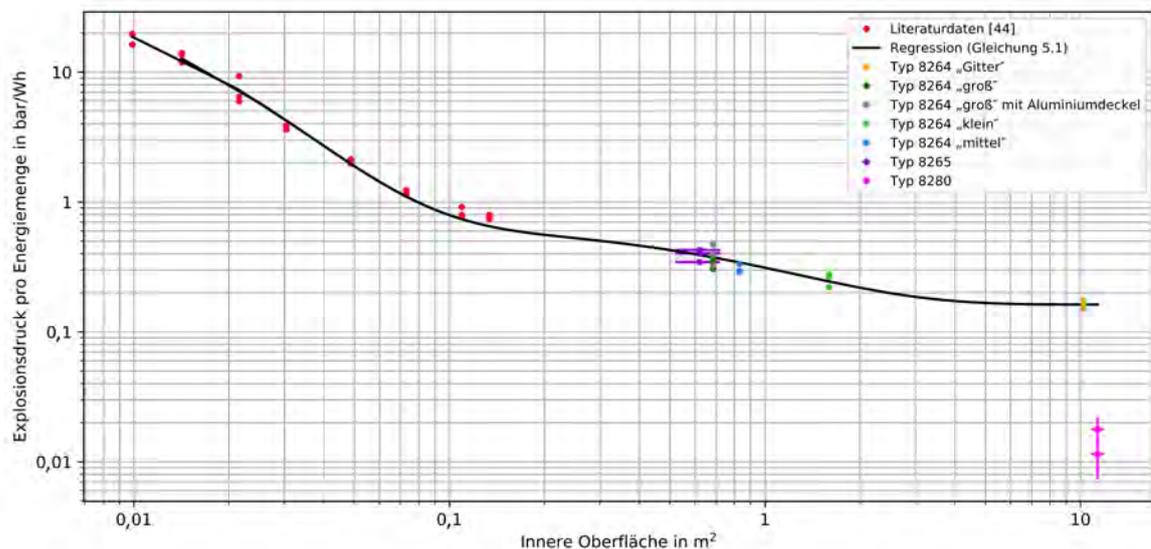
In Bezug auf die verschiedenen Dichtigkeiten und Wärmeleitfähigkeiten der Deckel der druckfesten Kapselung von Typ 8264 zeigen die Ergebnisse keine relevanten Abhängigkeiten. Das heißt, dass die Wärmeleitfähigkeit und der Masseverlust durch die konstruktiven Gegebenheiten in diesen beiden Fällen als gleichwertig anzusehen sind. Näheres dazu ist bei DARAGAN zu finden [65].

Bei nahezu gleichen Volumenverhältnissen zeigen die Versuche in einem geschlossenen System wesentlich höhere Druckwerte als in der druckfesten Kapselung mit Druckentlastungselementen. Dies liegt neben der Dichtigkeit auch, wie später erläutert, an der inneren Oberfläche der druckfesten Kapselung.

Nach GARCÍA u. A. sollte es in N_2 lediglich zu einem Rauchausstoß kommen [47]. Bei den Versuchen hier ist es allerdings zu einer Explosion gekommen, wie in den Kameraaufnahmen in Tabelle 5.1 zu erkennen ist. Bei den Versuchen mit N_2 zeigt sich, dass bei dem kleinen Volumen der druckfesten Kapselung des Typs 8264 eine geringere Abweichung zu den Versuchen in Luft entsteht, als bei dem großen Volumen. Generell zeigen beide Versuche mit N_2 in unterschiedlichen Geometrien einen Explosionsdruck in gleicher Größenordnung. Aufgrund des höheren Sauerstoffgehalts im großen Volumen in Luft steht der LIB beim TR mehr Oxid zur exothermen Reaktion zur Verfügung als bei dem kleinen Volumen oder in N_2 . Das heißt, dass der entscheidende Einflussfaktor hier die Stoffmenge an Sauerstoff ist. Somit sollte das Luftvolumen bei der Konstruktion von druckfesten Kapselungen möglichst klein gehalten werden. Dabei gilt es aber zu beachten, dass bei einer luftdichten druckfesten Kapselung ein zu kleines Volumen auch zu einem unerwünscht hohen Druck führen kann, wie es die Literaturdaten von DUBANIEWICZ u. A. zeigen. Durch die freiwerdenden Gase, welche ggf. nicht entweichen können, kann ein gewisser Vordruck in der druckfesten Kapselung entstehen, der einen erhöhten Druck zur Folge hätte (siehe auch dynamische Versuche mit und ohne Vordruck in Abschnitt 5.1). Das Volumen, ab dem dieser Effekt zum Tragen kommt,



(a) Abhängigkeit vom Verhältnis freies Volumen zu Zellvolumen [11]



(b) Über die innere Oberfläche [45]

Abb. 5.12.: Abhängigkeit des Explosionsdruckes pro Energiemenge von der Geometrie der druckfesten Kapselung für NMC811-Zellen mit 3 Ah

ist von der Menge der freigesetzten Gase, also von der LIB selbst, abhängig. Die Versuche zeigen bei steigendem Volumenverhältnis keinen Trend zu niedrigeren Explosionsdrücken. Dies entspricht nicht der Erwartung nach DUBANIEWICZ U. A., wonach der Explosionsdruck eigentlich sinken sollte [11]. Bei DUBANIEWICZ U. A. wurde ein selbstähnliches Gehäuse verwendet, das bedeutet, dass ein linearer Zusammenhang zwischen freiem Volumen und innerer Oberfläche bestand. Bei den Versuchen in dieser Arbeit ist dies nicht der Fall, da das Volumen mit Einselementen angepasst wurde. Das heißt, der Unterschied zwischen den Literaturdaten von DUBANIEWICZ U. A. und den Messdaten ist u. a. neben der geringeren Dichtigkeit und dem Volumen auch die innere Oberfläche der

druckfesten Kapselung. Da der Druck nach dem Gasgesetz, siehe Gleichung 2.2, von der Temperatur abhängig ist und diese wiederum durch die Wärmeabgabe des Materials beeinflusst wird, ist es naheliegend, dass dieser auch von der Oberfläche abhängig ist. Beachtet werden sollte dennoch, dass das Gasgesetz nicht das komplette Verhalten abbildet, da in dem Fall von einem geschlossenen System ausgegangen wird. In dem hier verwendeten Versuchsaufbau haben allerdings Wärme- und Massenströme einen nicht vernachlässigbaren Einfluss [65].

Wird von den Messdaten und den Literaturdaten von DUBANIEWICZ u. A. eine Regression statt über das Volumenverhältnis über die innere Oberfläche A der druckfesten Kapselung durchgeführt, wird Gleichung 5.1 erhalten [11]. Die Versuche in N_2 und in der druckfesten Kapselung von Typ 8280 mit Druckentlastungselementen werden hier nicht mit einbezogen. Die Regression ist physikalisch an den Grenzwerten gegen Null und Unendlich nicht korrekt, hat dafür aber ein geeignetes R^2 in Bezug auf die Literatur- und Messdaten. Für eine Abschätzung der Werte zwischen den Daten ist diese Regression dennoch ausreichend.

$$p_{\text{ex}}/E_{\text{LIB}} = 10^{1,91} \cdot \exp(-28,1 \text{ m}^{-2} \cdot A) + 0,62 \cdot \exp(-0,78 \text{ m}^{-2} \cdot A) - 0,79 \text{ bar/Wh} \quad (5.1)$$

mit $R^2 = 98,58 \%$

Abb. 5.12b zeigt diese Regression und die Literatur- und Messdaten des Explosionsdruckes p_{ex} normiert auf die Energiemenge E_{LIB} über die innere Oberfläche A . Durch eine fast 14-fache Vergrößerung der inneren Oberfläche bei nahezu gleichbleibendem freiem Volumen konnte eine Reduzierung des Explosionsdruckes um 58 % erreicht werden. Bei der druckfesten Kapselung von Typ 8280 mit Druckentlastungselementen konnte durch eine fast 16-fache Oberflächenvergrößerung eine 96 %-ige Reduzierung ermittelt werden. Dabei ist allerdings zu beachten, dass es sich bei dieser druckfesten Kapselung um ein offenes System handelt und somit auch mit größeren Masseverlusten gerechnet werden muss, als bei den anderen Messdaten. Es lässt sich allerdings daraus schließen, dass das Konzept von Druckentlastungselementen auch für die effektive Druckentlastung von thermisch durchgehenden LIBs in druckfesten Kapselungen verwendet werden kann.

Die Abhängigkeit des Explosionsdruckes von der inneren Oberfläche ist damit zu erklären, dass diese durch die Wärmeableitung druckentlastend wirkt, wie es auch bei klassischen Druckentlastungselementen der Fall ist. Durch die Oberfläche kann die Temperatur des Gases innerhalb der druckfesten Kapselung soweit gesenkt werden, dass dies zu einem reduzierten Druck führt. Näheres hierzu ist in der Literatur von DARAGAN zu finden [65].

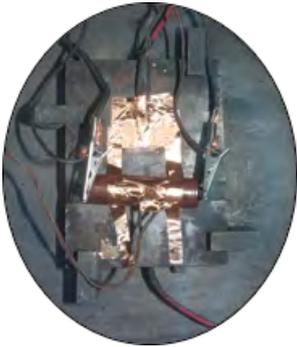
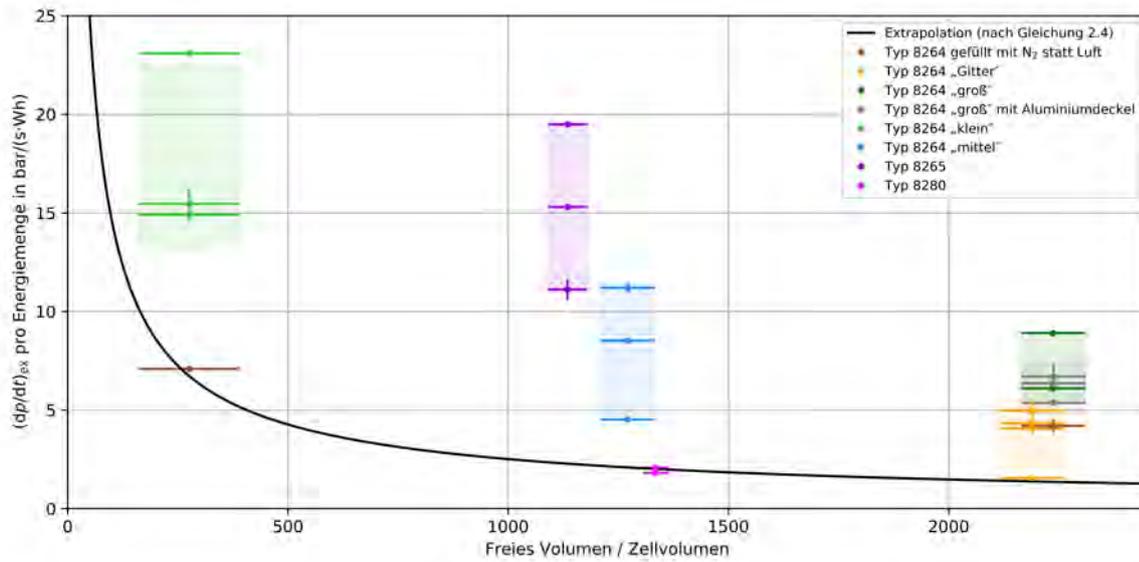
Druckfeste Kapselung	Kameraaufnahmen zu verschiedenen Zeitpunkten		
	Vor Versuch	Nach einiger Zeit	+ weitere 500 ms
Typ 8264 „klein“			
Typ 8264 „groß“			

Tabelle 5.1.: Kameraaufnahmen vom TR in N₂

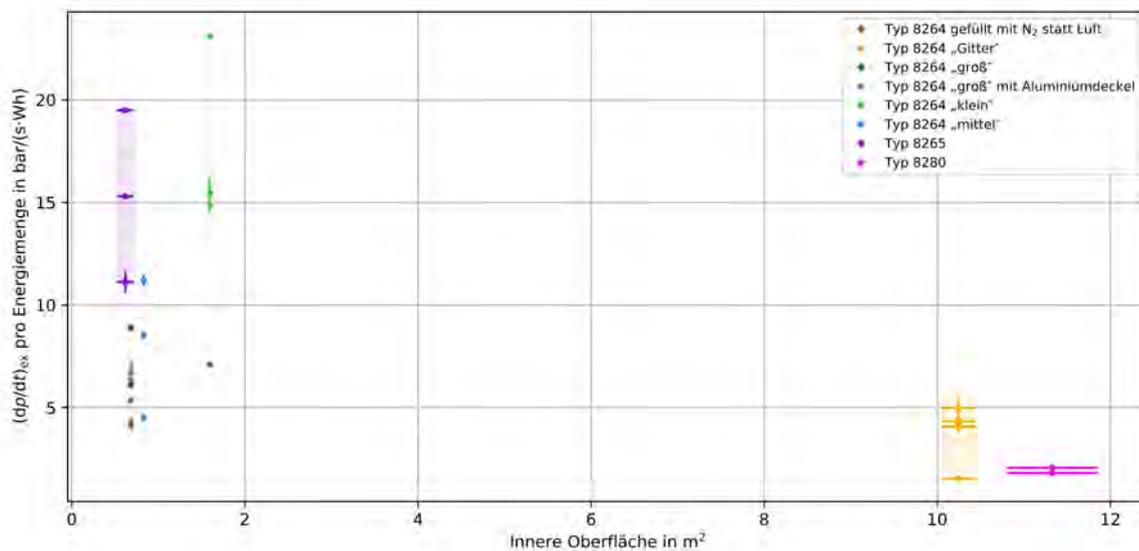
Die Abb. 5.13a zeigt $(dp/dt)_{ex}$ normiert auf die Energiemenge über das Verhältnis von freiem Volumen zu Zellvolumen. Neben den Messwerten ist auch eine Extrapolation nach Gleichung 2.4 aus der Literatur von DUBANIEWICZ U. A. dargestellt [11]. Es zeigt sich der Trend zu niedrigeren $(dp/dt)_{ex}$ bei steigendem Volumenverhältnis, wie es auch nach Gleichung 2.4 der Fall ist. Generell liegen die Messwerte in Luft ohne Druckentlastungselemente über der Extrapolation. Die Versuche in N₂ zeigen bei unterschiedlich großen druckfesten Kapselungen nahezu die gleichen Ergebnisse. Dies spricht dafür, dass $(dp/dt)_{ex}$ vom Sauerstoffgehalt in der druckfesten Kapselung abhängt. Diese Abhängigkeit ist bereits für reine Gasexplosionen durch die Literatur bekannt [2].

In Abb. 5.13b ist die Abhängigkeit von $(dp/dt)_{ex}$ pro Energiemenge von der inneren Oberfläche dargestellt. Von der inneren Oberfläche scheint $(dp/dt)_{ex}$ weniger beeinflusst zu sein, da sich die Versuche mit und ohne Gitter bei gleichem Volumenverhältnis nur im geringen Maße unterscheiden. Generell lässt sich kein Trend der Daten in Bezug auf die innere Oberfläche erkennen. Somit ist auch die Abhängigkeit $(dp/dt)_{ex}$ von dem Verhältnis zwischen innerer Oberfläche und Volumen, wie es bei Gasexplosionen angenommen wird [2, 13], nicht gegeben.

Es sei hier erwähnt, dass bei einem Versuch in der druckfesten Kapselung vom Typ 8264 „klein“ eine DAZ von 16,1 ms ermittelt wurde. Dies liegt nahe bei der Bedingung von 5 ms für PP nach der Norm IEC 60079-1 [4].



(a) Abhängigkeit vom Verhältnis freies Volumen zu Zellvolumen [11]



(b) Abhängigkeit von der inneren Oberfläche

Abb. 5.13.: Abhängigkeit $(dp/dt)_{\text{ex}}$ pro Energiemenge von der Geometrie der druckfesten Kapselung für NMC811-Zellen mit 3 Ah

Quasi-statische Belastung

- Die Temperaturerhöhung der Außenwand hätte bei den verwendeten Versuchsaufbauten nicht ausgereicht, um eine explosionsfähige Atmosphäre außerhalb der druckfesten Kapselung zu zünden.
- Die theoretische Bestimmung der Dehnung einer Rechteckplatte ist nicht sinnvoll, da diese unterschätzt wird.
- Die Bestimmung der freigesetzten Gasmenge ist bei druckfesten Kapselungen durch die Gasgleichung (Gleichung 2.2) nicht möglich.
- Die LFP-Zelle hat keinen relevanten Druck verursacht.
- Die NMC- und LCO-Zellen stellen die kritischste Belastung dar, wobei die NMC-Zellen eine bessere Reproduzierbarkeit aufweisen.
- Höhere Kapazitäten bzw. Energiemengen verursachen einen höheren Explosionsdruck und somit eine höhere Dehnung des Materials. Auf $(dp/dt)_{ex}$ hatte bei diesen Versuchen die Kapazität bzw. Energiemenge der LIB keinen merklichen Einfluss.
- Die verwendeten Deckel mit unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten und Dichtigkeiten hatten keinen merklichen Einfluss auf die Druckbelastung.
- In Inertatmosphäre ist es zu einer vom Volumen unabhängigen Explosion gekommen. Diese zeigt aber durch den geringeren Sauerstoffanteil einen geringeren Explosionsdruck.
- Ein größeres Volumen führt durch den höheren Sauerstoffanteil zu einem höheren Explosionsdruck.
- Ein kleines Volumen kann durch die nicht entweichende freigesetzte Gasmenge zu einem erhöhten Explosionsdruck führen.
- Durch die Vergrößerung der inneren Oberfläche kann der Explosionsdruck reduziert werden.
- Das Konzept von Druckentlastungselementen bei Gasexplosionen kann auf thermisch durchgehende LIBs übertragen werden.
- $(dp/dt)_{ex}$ ist vom Sauerstoffgehalt abhängig und nicht von der inneren Oberfläche.

5.3. Kombinierte Belastungen

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Belastungen beschrieben, welche nicht spezifisch einer Belastungsart zuzuordnen sind. Dies sind einerseits die quasi-statischen Versuche mit verschiedenen Brenngas-Luft-Gemischen innerhalb der druckfesten Kapselung und andererseits die dynamischen Versuche, in denen eine quasi-statische Belastung nachgebildet werden soll.

5.3.1. Explosionsfähige Atmosphären

Bei dieser Versuchsreihe befindet sich statt Luft eine explosionsfähige Atmosphäre in der druckfesten Kapselung, wie es im Realfall in einer verwendeten druckfesten Kapselung der Fall sein kann. Im vorherigen Abschnitt wurde bereits gezeigt, dass eine Inertatmosphäre mit Stickstoff (N_2) zu einer Druckreduzierung führen kann. Im Gegensatz dazu werden nun Brenngas-Luft-Gemische verwendet. Als Brenngase dienen hier Wasserstoff (H_2) und Propan (C_3H_8) in den Konzentrationen 31 ± 1 Vol.-% (H_2) und $4,6 \pm 0,3$ Vol.-% (C_3H_8). Die Ergebnisse dieser Druckbelastungen sind in Abb. 5.14 dargestellt. Außerdem sind die Versuche abgebildet, welche in Luft (siehe Abschnitt 5.2.3) durchgeführt wurden. Des Weiteren sind die Ergebnisse der Gasexplosionen ohne LIB in derselben druckfesten Kapselung, mit der gleichen Brenngaskonzentration wie bei den dargestellten quasi-statischen Versuchen, aufgeführt.

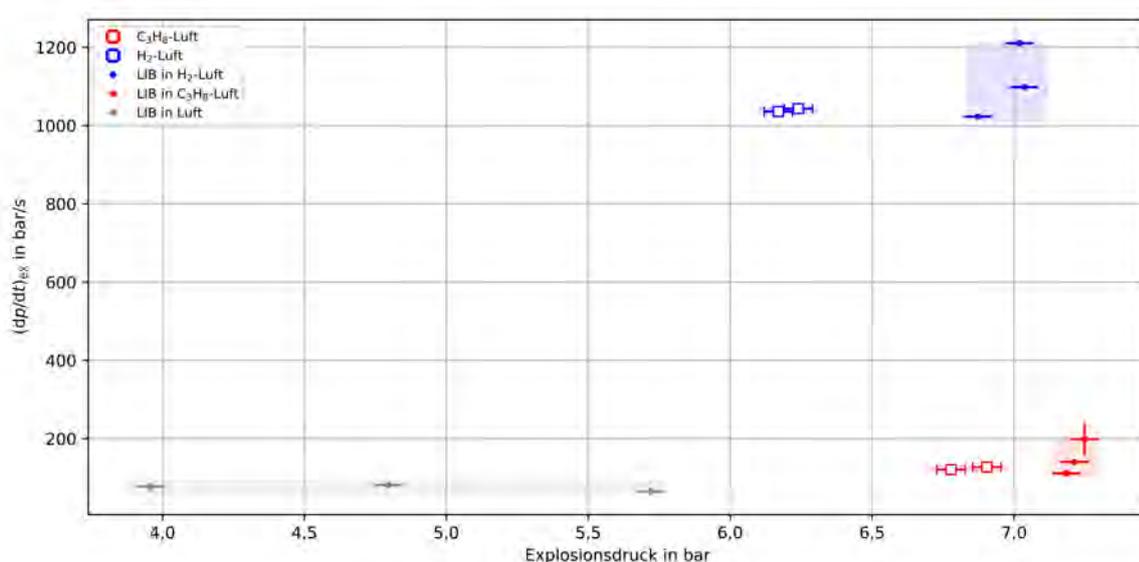


Abb. 5.14.: $(dp/dt)_{ex}$ über dem Explosionsdruck in unterschiedlichen Gasmischungszusammensetzungen mit und ohne thermisch durchgehender NMC811-Zelle (G-10)

Die quasi-statischen Versuche in explosionsfähiger Atmosphäre weisen einen höheren Explosionsdruck und bei H_2 ein wesentlich höheren $(dp/dt)_{\text{ex}}$ auf als in Luft. Bei diesen Versuchen hat das TR der LIB die Atmosphäre entzündet, wodurch ein höherer Explosionsdruck entsteht, als durch das TR der LIB allein. Bei den Gasexplosionen mit LIB fällt auf, dass der Explosionsdruck höher ist als bei den reinen Gasexplosionen. $(dp/dt)_{\text{ex}}$ ist allerdings im gleichen Bereich. Das bedeutet, dass die Druckbelastung im Falle einer thermisch durchgehenden LIB innerhalb einer druckfesten Kapselung mit explosionsfähiger Atmosphäre höher sein kann, als ohne die LIB.

Es wurde bei den Versuchen festgestellt, dass zeitlich nur ein einzelner Temperaturanstieg aufgetreten ist, somit zeigt sich, dass die Prozesse des TR der LIB und der Gasexplosion gleichzeitig auftreten.

5.3.2. Nachbildung der quasi-statischen Belastung

Bei diesen dynamischen Versuchen wird versucht, die Druckbelastung der quasi-statischen Versuche in einer luftgefüllten druckfesten Kapselung vom Typ 8265 mit NMC811-Zellen mit 3 Ah nachzubilden. Dazu wurden die Messergebnisse aus Abschnitt 5.2.1 verwendet. Die Explosionsdrücke und die zeitlichen Explosionsdruckanstiege $(dp/dt)_{\text{ex}}$ der quasi-statischen und dynamischen Versuche mit verschiedenen Brenngas-Luft-Gemischen sind in Abb. 5.15 dargestellt. Die Ergebnisse der Gasexplosionen sind dabei mit Linien zur nächst höheren Brenngaskonzentration verbunden, sodass durch diese eingeschätzt werden kann, wie sich Brenngaskonzentrationen zwischen den Messpunkten verhalten würden. Das stöchiometrische Gemisch ist dabei gesondert gekennzeichnet. Auf Fehlerbalken der Gasexplosionen wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet. Diese können der entsprechenden Tabelle im Anhang entnommen werden. In Bezug auf den Explosionsdruck erreichen die stöchiometrischen Gemische von Propan (C_3H_8), Wasserstoff (H_2), Ethylen (C_2H_4) und Acetylen (C_2H_2) höhere Explosionsdrücke als die quasi-statischen Versuche. Lediglich Methan (CH_4) liegt bei der stöchiometrischen Konzentration innerhalb der Streubreite. Allerdings lassen sich durch die Variation der Brenngaskonzentration mit allen untersuchten Brenngasen Drücke erreichen, die innerhalb der Streubreite liegen.

Ein $(dp/dt)_{\text{ex}}$ innerhalb der Streubreite der quasi-statischen Versuche konnte mittels der Brenngase C_2H_2 , C_2H_4 und C_3H_8 erreicht werden. Mit H_2 könnte dies eventuell auch mit einer geeigneten Konzentration gelingen. Die Gasexplosionen der Versuche mit C_3H_8 hatten einen zu langsamen Druckanstieg.

Es gibt lediglich einen Messwert, welcher sich innerhalb der Streubreite der quasi-statischen Versuche im Bezug auf den Explosionsdruck und $(dp/dt)_{\text{ex}}$

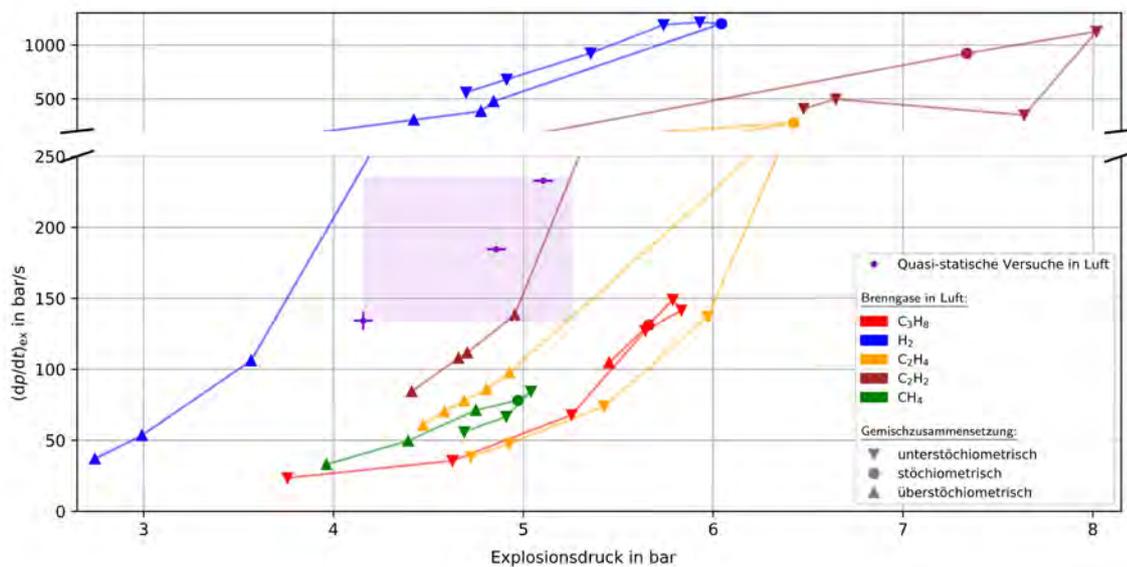


Abb. 5.15.: $(dp/dt)_{\text{ex}}$ und der Explosionsdruck von den quasi-statischen Versuchen und dynamischen Versuchen zur Nachbildung

befindet. Dabei handelt es sich um eine Explosion mit einem C_2H_2 -Luft-Gemisch, wobei die Brenngaskonzentration $4,7 \pm 0,2$ Vol.-% betrug. Andere potentielle Brenngase sind H_2 und C_2H_4 , wobei allerdings noch weitere Versuche mit anderen Gemischzusammensetzungen durchgeführt werden müssten.

Es sei erwähnt, dass die Dauer der Druckbelastung bei den Gasexplosionen eine andere ist als bei den quasi-statischen Versuchen. Bei keiner Gasexplosion konnte ein so lang andauernder Druck verursacht werden, wie es bei dem TR der NMC-Zellen der Fall war. Allerdings wurde bereits in Abschnitt 5.1.3 gezeigt, dass die Dauer der Druckbelastung keinen wesentlichen Einfluss auf die Materialbeanspruchung hat. Bei einigen Versuchen wurde eine Temperaturmessung durchgeführt. Die Außenwand hatte dabei eine maximale Temperatur von 23 ± 3 °C und eine maximale Temperaturerhöhung von 1 ± 4 °C. Das heißt, wenn eine explosionsfähige Atmosphäre außerhalb der druckfesten Kapselung vorhanden wäre, dann wäre es nicht zu einer Zündung gekommen. Für weitergehende Informationen zu diesen Versuchen wird auf die Literatur von PESCHEL verwiesen [72].

Kombinierte Belastungen

- Es entsteht durch eine thermisch durchgehende LIB in einem Brenngas-Luft-Gemisch ein höherer Explosionsdruck als in Luft. Die Prozesse der Gasexplosion und dem TR laufen gleichzeitig ab.
- In explosionsfähiger Atmosphäre kann mit einer thermisch durchgehenden LIB ein höherer Explosionsdruck entstehen als durch eine reine Gasexplosion.
- Mithilfe von Gasexplosionen lässt sich die Druckbelastung einer druckfesten Kapselung durch eine thermisch durchgehende LIB nachbilden. Ein geeignetes Brenngas-Luft-Gemisch ist für die hier untersuchten LIBs beispielsweise C_2H_2 mit einer Konzentration von $4,7 \pm 0,2$ Vol.-% in Luft. Die Temperaturerhöhung der Außenwand hätte bei diesen Versuchen nicht ausgereicht, um eine explosionsfähige Atmosphäre außerhalb der druckfesten Kapselung zu zünden.

5.4. Vergleich der quasi-statischen Belastung mit anderen Belastungen

In diesem Abschnitt wird die quasi-statische Belastung der druckfesten Kapselung zu den anderen Belastungsarten in Beziehung gesetzt und Schlussfolgerungen daraus gezogen. Um diesen Vergleich durchzuführen, wird zunächst die dynamische Belastung aus Abschnitt 5.1 mit den Gasexplosionen aus Abschnitt 5.3 verglichen.

Außerdem wird eine Methode präsentiert, mit der die Druckfestigkeit einer druckfesten Kapselung, in welcher eine LIB thermisch durchgeht, geprüft werden kann.

5.4.1. Vergleich der dynamischen Belastungen

Im Folgenden werden die dynamischen Versuche aus Abschnitt 5.1 mit denen ohne LIB aus Abschnitt 5.3 verglichen. Abb. 5.16 zeigt die Explosionsdrücke und die K_G -Werte aus den Abschnitten 5.1.2 (Literaturdaten und zylindrische Einzelkammer), 5.3.2 (Typ 8265) und 5.3.1 (Typ 8264 „groß“) für C_3H_8 - und H_2 -Luft-Explosionen. Da es sich um unterschiedlich große Volumina handelt, wird hier der K_G -Wert statt, wie zuvor, $(dp/dt)_{ex}$ dargestellt. Bei den Messwerten handelt es sich dabei um ein Brenngas-Luft-Gemisch mit entweder 31 ± 1 Vol.-% H_2 oder $4,6 \pm 0,3$ Vol.-% C_3H_8 . Die Literaturdaten wurden innerhalb einer 20 l-Kugel mit Zündung in der Mitte ermittelt. Bei den Versuchen in der zylindrischen Einzelkammer (5,6 l) und der druckfesten Kapselung von Typ 8265 (20 l) wurde eine Zündkerze, welche sich an der Wandung befindet, eingesetzt. Bei den Versuchen in Typ 8264 „groß“ (39 l) wurde die druckfeste Kapselung vor der Zündung erhitzt, wobei sich die Zündkerze auf dem Grund der druckfesten Kapselung befand.

Dass die Literaturwerte höher sind als die Messwerte wurde bereits in Abschnitt 5.1.2 erläutert. Die Explosion mit C_3H_8 hat generell immer einen höheren Explosionsdruck und mit H_2 einen höheren K_G -Wert. Dies war nach den Literaturdaten zu erwarten. Bei den Gasexplosionen in der druckfesten Kapselung von Typ 8265 entsteht allerdings mit H_2 ein geringfügig höherer Explosionsdruck als mit C_3H_8 . Dies kann an der komplizierteren Geometrie der druckfesten Kapselung liegen.

Nach der Gasgleichung (Gleichung 2.2) hängt der Druck von der Temperatur und dem Volumen ab, wenn die Stoffmenge konstant bleibt. Es sei gesagt, dass die Gasgleichung eine Vereinfachung darstellt und wesentliche Einflüsse bei dem dynamischen Prozess hier ggf. unzureichend abdeckt. Die Temperaturerhöhung des Gases in der druckfesten Kapselung von Typ 8264 „groß“ scheint keinen nennenswerten Einfluss auf den Explosionsdruck und den K_G -Wert zu haben,

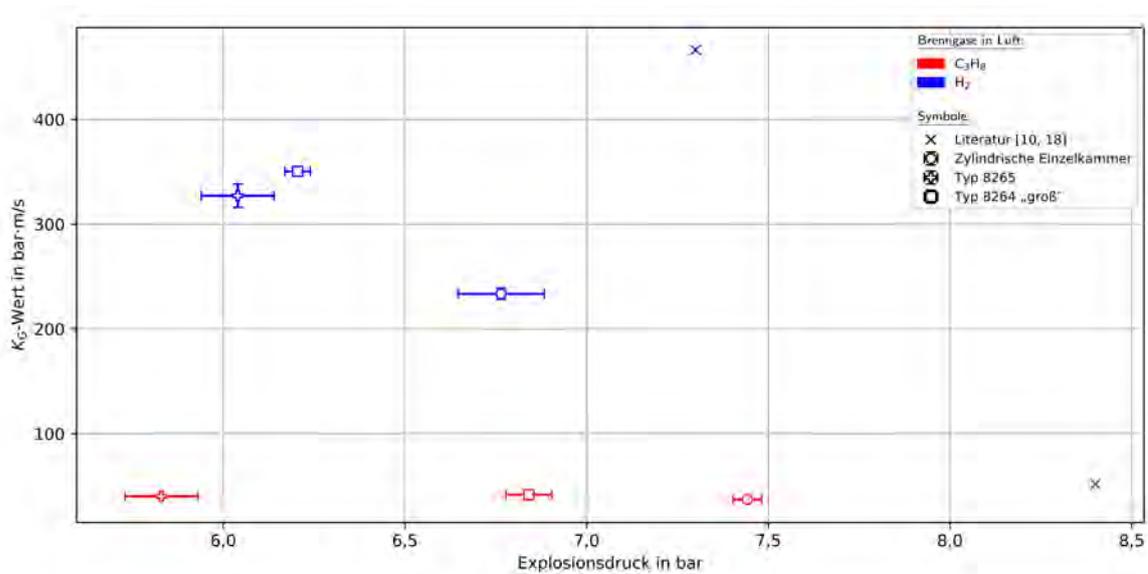


Abb. 5.16.: Explosionsdrücke und K_G -Werte von dynamischen Versuchen in unterschiedlichen druckfesten Kapselungen mit verschiedenen Gasmischzusammensetzungen (teilweise aus Abb. 5.14 und Abb. 5.5)

da sich dieser entweder zwischen oder nahe der anderen Messergebnisse befindet. Das Volumen, die Zündposition und/oder die Geometrie scheinen hingegen einen größeren Einfluss auf den Explosionsdruck zu haben. Die Messwerte innerhalb der druckfesten Kapselung von Typ 8265 sind mehr als 2 bar geringer als die Literaturwerte. Da das Volumen hierbei ähnlich ist, hat diese Abweichung ihren Ursprung in der Zündposition oder der Geometrie der druckfesten Kapselung. Bei dem K_G -Wert mit einer H₂-Luft-Explosion ist eine Abhängigkeit deutlicher zu erkennen als mit C₃H₈.

Der Theorie nach sollte der K_G -Wert für ein bestimmtes Brenngas-Luft-Gemisch eine Konstante sein, wobei $(dp/dt)_{ex}$ auf das Volumen normiert wird. Die Versuche mit H₂ zeigen deutlich, dass es sich dabei nicht um einen konstanten Faktor handelt. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die Verwendung des K_G -Wert in dem Zusammenhang nicht zielführend ist und dass die Voraussetzungen für Gleichung 2.1 nicht erfüllt werden. Dies ist im Einklang mit der Literatur, in der Untersuchungen gezeigt haben, dass der K_G -Wert volumenabhängig bei Gasexplosionen ist [18].

5.4.2. Einordnung der quasi-statischen Belastung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der quasi-statischen Belastung einer druckfesten Kapselung mit der dynamischen Belastung durch eine Gasexplosion verglichen. Die statische Belastung ist hier als gleichwertig mit einer dynamischen Belastung ohne PP anzusehen, siehe dazu Abschnitt 5.1.3.

In Bezug auf die thermische Belastung stellt bei den durchgeführten Versuchen das TR einer LIB eine größere Belastung dar als eine reine Gasexplosion. Die Außenwand hat sich bei der druckfesten Kapselung von Typ 8264 „groß“ durch eine Gasexplosion um 1 ± 4 °C erwärmt. Durch eine thermisch durchgehende LIB belief sich die Temperaturerhöhung auf 11 ± 4 °C. Diese würde bei dieser druckfesten Kapselung nicht dessen Zündschutzart außer Kraft setzen, allerdings ist dies für andere druckfeste Kapselungen zu beachten.

Die Abschnitte 5.2.3 und 5.4.1 haben gezeigt, dass die Druckbelastung nicht nur von der Explosion, sondern auch von der Geometrie der druckfesten Kapselung abhängig ist. Dies gilt für Gasexplosionen sowie für Explosionen durch das TR einer LIB.

Der Explosionsdruck bei der quasi-statischen Belastung ist in dieser Arbeit immer niedriger gewesen als bei der dynamischen Belastung ohne Vordruck und ohne PP bei einer Gaszusammensetzung aus 31 ± 1 Vol.-% H_2 und $4,6\pm 0,3$ Vol.-% C_3H_8 . Bei anderen Gaskonzentrationen und Brenngasen kann auch ein niedrigerer Explosionsdruck auftreten als bei dem TR einer LIB. In Kombination der beiden Belastungsarten traten etwas höhere Explosionsdrücke auf als bei den reinen Gasexplosionen.

Die quasi-statischen Versuche können in das Druck-Dehnungsdiagramm (Abb. 5.6) der statischen und dynamische Versuche eingeordnet werden. Dabei wird die Regression aus Gleichung 5.1 für die untersuchten NMC811-Zellen mit 3 Ah bzw. 12,2 Wh verwendet. Das heißt, für die druckfeste Kapselung aus Abschnitt 3.1.1.1 (zylindrische Einzelkammer), welche bei den statischen und dynamischen Belastungsversuchen verwendet wurde, ergibt sich nach der Regression ein höchster theoretischer Explosionsdruck für einen quasi-statischen Versuch in Luft von 7,1 bar. Dieser Druck entspricht nach den statischen Versuchen aus Abb. 5.6 einer Dehnung unterhalb der Fließgrenzen der untersuchten Materialien. Somit hätte diese druckfeste Kapselung mit den verwendeten Flanschen auch einer thermisch durchgehenden LIB in Luft standgehalten.

Die Dauer des Druckes ist bei den quasi-statischen Versuchen immer länger als die durch eine Gasexplosion. Dies ist nach Abschnitt 5.1.3 allerdings keine relevante Größe für die Belastung der druckfesten Kapselung. $(dp/dt)_{ex}$ kann bei Gasexplosionen über denen der quasi-statischen Versuchen liegen. Je

nach Brenngaskonzentration und Gaszusammensetzung, kann allerdings die Gasexplosion jedoch auch langsamer verlaufen. Die Betrachtung des K_G -Werts hat gezeigt, dass dieser keine sinnvolle Vergleichsgröße darstellt.

5.4.3. Druckfestigkeit der druckfesten Kapselung

Um eine druckfeste Kapselung auf dessen Druckfestigkeit im Falle eines TR einer LIB zu überprüfen, wird in diesem Abschnitt eine mögliche Methode vorgestellt. Dabei wird von einer luftgefüllten druckfesten Kapselung ausgegangen, wobei die vorhandenen Überdruckprüfungen der Norm IEC 60079-1 herangezogen werden [4].

Das Vorgehen ist wie folgt:

- Der Explosionsdruck beim TR der LIB p_{LIB} innerhalb dieser druckfesten Kapselung muss bekannt sein oder abgeschätzt werden können. Dieser hängt im Wesentlichen von der Zellchemie, der Energiemenge der LIB, der Geometrie der druckfesten Kapselung und ggf. der Verwendung von Druckentlastungselementen ab. Derzeit gibt es keine zuverlässige Methode, um den entstehenden Explosionsdruck abschätzen zu können.
- Wenn ...
 - ... der minimale theoretische Druck zur plastischen Verformung p_{theo} für das Material aus der Fließgrenze und den Konstruktionseigenschaften abgeschätzt werden kann, dann muss $p_{theo} > p_{LIB}$...
 - ... bei der Bezugsdruckprüfung nach IEC 60079-1 ermittelt wird, dass kein PP entsteht: Muss der entstehende statische bzw. dynamische Druck $p_{stat/dyn}$ bei der gewählten Überdruckprüfung gemessen werden. Es muss gelten $p_{stat/dyn} > p_{LIB}$...
 - ... bei der Bezugsdruckprüfung nach IEC 60079-1 festgestellt wird, dass PP entsteht: Müssen die entstehenden Drücke bei der statischen und dynamischen Überdruckprüfung, p_{stat} und p_{dyn} , gemessen werden. Es muss gelten $p_{stat} > p_{LIB}$ und $p_{dyn} > p_{LIB}$...
 - ... damit sichergestellt ist, dass die druckfeste Kapselung der thermisch durchgehenden LIB in Luft standhält.

Kann statt Luft auch ein anderes Gasgemisch in der druckfesten Kapselung auftreten, dann muss dieses mit berücksichtigt werden.

Vergleich der quasi-statischen Belastung mit anderen Belastungen

- Der Explosionsdruck und der K_G -Wert einer Gasexplosion sind im relevanten Maße von der Geometrie und von der Zündposition abhängig.
- Der K_G -Wert ist keine sinnvolle Vergleichsgröße bei dem Vergleich von unterschiedlichen Geometrien.
- Thermisch gesehen stellt das TR einer LIB eine größere Belastung dar als die untersuchten Gasexplosionen. Bei diesen Versuchen war diese Erwärmung allerdings nicht relevant für die Zündschutzart.
- Die Druckbelastung ist von der Geometrie der druckfesten Kapselung abhängig.
- Der Explosionsdruck und $(dp/dt)_{ex}$ kann durch eine Gasexplosion niedriger, aber auch höher sein als durch eine thermisch durchgehende LIB.
- Die Druckbelastung hält bei einer thermisch durchgehenden LIB länger an als bei den untersuchten Gasexplosionen.
- Durch die Kenntnis des Explosionsdruckes beim TR einer LIB unter bestimmten Bedingungen ist es möglich, mittels theoretischer Überlegungen oder experimenteller Prüfungen ohne LIB, die Druckfestigkeit der druckfesten Kapselung einzuschätzen.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit war es, die Belastung einer druckfesten Kapselung durch ein thermisches Durchgehen (TR) einer Lithium-Ionen-Batterie (LIB) mit anderen Belastungsarten zu vergleichen und sicherheitstechnisch einzuordnen. Laut der Norm IEC 60079-1 [4] gibt es keine Begrenzungen bei der Verwendung von LIBs in druckfesten Kapselungen, wenn durch Schutzeinrichtungen sichergestellt werden kann, dass kein Elektrolysegas freigesetzt wird. Ein möglicher Fehlerfall, also das TR, wird dabei ausgeschlossen. Dies ist dennoch im Bereich des Möglichen. Deshalb sollten druckfeste Kapselungen so ausgelegt werden, dass diese einem Fehlerfall standhalten, um einen verheerenden Unfall zu vermeiden. Der Explosionsdruck durch das TR einer LIB ist schwieriger einzuschätzen als bei Brenngas-Luft-Explosionen, da die LIB alle Komponenten für eine Explosion bereits von sich aus mitbringt. Diese Arbeit dient dem Zweck, Erkenntnisse zu sammeln, wie sich das TR einer LIB auf eine druckfeste Kapselung auswirkt. Um diese Auswirkung sicherheitstechnisch einzuordnen, wurde diese Belastung mit bekannten Belastungsarten verglichen. Dafür wurden hier die statische und dynamische Prüfung aus der Norm IEC 60079-1 [4] verwendet. Die verschiedenen druckfesten Kapselungen wurden statisch durch Wasserdruck, dynamisch durch Gasexplosionen und quasi-statisch durch das TR von LIBs belastet. Dabei wurden die internen Druckverläufe und ggf. die Dehnungen, sowie verschiedene Temperaturen gemessen.

Um die Materialbelastung einschätzen zu können, wurden bei einigen Versuchen die Dehnungen an der Außenwand der druckfesten Kapselung gemessen. Es hat sich gezeigt, dass die theoretische Bestimmung der Dehnung durch den Druck bei einer Kreisplatte mit den Messwerten übereinstimmt. Bei einer Rechteckplatte kann die Dehnung um den Faktor 2 unterschätzt werden. Deshalb sollte zusätzlich zum Druck die Dehnung bei der Beurteilung der Materialbeanspruchung von druckfesten Kapselungen mit betrachtet werden.

Bei einer Belastung einer druckfesten Kapselung unterhalb der Fließgrenze hat sich gezeigt, dass die statische und dynamische Belastung bei einfachen Geometrien, bei denen keine Drucküberhöhungen (PP) entstehen, normenkonform als gleichwertig angesehen werden können. Das bedeutet, dass der zeitliche Explosionsdruckanstieg $(dp/dt)_{ex}$, die Dauer des Druckes und die thermische Belastung in diesen Fällen nicht relevant für die Materialbeanspruchung ist. Im Fall von komplexen Geometrien, bei denen PP entstehen kann, kann die dynamische Belastung aufgrund der Schwingungsanregung des Materials eine höhere Beanspruchung zur Folge haben, als die statische Belastung. Als Indikator, ob PP auftritt, können der Explosionsdruck,

dessen Standardabweichung, das Integral der Fouriertransformation des zeitlichen Druckverlaufs und ein erhöhter $(dp/dt)_{ex}$ bzw. der K_G -Wert verwendet werden. Die Druckanstiegszeit (DAZ) ist kein signifikanter Parameter.

Für die quasi-statischen Belastungen wurden einzelne zylindrische LIBs durch Überhitzen in verschiedenen druckfesten Kapselungen zum TR gebracht. Von den untersuchten Zellchemien Lithium-Eisenphosphat (LFP), Lithium-Kobaltoxid (LCO), Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminiumoxid (NCA) und Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid (NMC) haben die LCO- und die NMC-Zellen die größte Druckbelastung für die druckfeste Kapselung verursacht. Die Zellchemie NMC zeigt dabei einen höheren $(dp/dt)_{ex}$ und eine bessere Reproduzierbarkeit als die LCO. Bei höheren Kapazitäten der NMC-Zellen wurde ein höherer Explosionsdruck und dadurch eine entsprechende höhere Materialdehnung verursacht. $(dp/dt)_{ex}$ ist von der Kapazität nicht relevant beeinflusst worden.

Es hat sich gezeigt, dass eine Vergrößerung der inneren Oberfläche der druckfesten Kapselung eine effiziente Variante ist, den Explosionsdruck zu reduzieren. Das Prinzip der druckfesten Kapselungen mit Druckentlastungselementen als offenes System, reduziert den Druck signifikant und ist somit nicht nur für Gasexplosionen einsetzbar, sondern auch im Falle einer thermisch durchgehenden LIB.

Bei der Verringerung des Sauerstoffgehalts in der druckfesten Kapselung wird der Explosionsdruck ebenso gemindert. Dies kann in Form von Inertatmosphäre oder durch Verringerung des freien Luftvolumens entstehen. Da Erstgenanntes für die Zündschutzart von druckfesten Kapselungen nicht in Frage kommt, bleibt Letztgenanntes. Dabei muss aber darauf geachtet werden, dass das Volumen nicht so klein gewählt wird, dass der Effekt der freigesetzten Gasmenge, welche einen gewissen Vordruck entstehen lassen kann, nicht mehr vernachlässigt werden darf. In Luft trat bei den Versuchen kein merklicher Unterschied zwischen den Explosionsdrücken bei verschiedenen Deckeln, also Dichtigkeiten und Wärmeleitfähigkeiten, der druckfesten Kapselung auf.

Befindet sich explosionsfähige Atmosphäre innerhalb der druckfesten Kapselung und geht eine LIB thermisch durch, dann laufen die Prozesse gleichzeitig ab und es entsteht ein höherer Explosionsdruck als wenn die LIB in Luft thermisch durchgehen würde. Der Explosionsdruck bei dem TR einer LIB innerhalb einer explosionsfähigen Atmosphäre ist geringfügig höher als bei einer reinen Gasexplosion des Gemisches.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde des Weiteren eine Methode vorgestellt, mit der die Druckfestigkeit einer druckfesten Kapselung, in welcher eine bestimmte LIB thermisch durchgeht, bewertet werden kann. Dazu ist allerdings das Wissen notwendig, wie hoch der Explosionsdruck ist, wenn diese LIB in genau dieser druckfesten Kapselung bei Vorliegen einer bestimmten Gasgemischzusammensetzung thermisch durchgeht. Da dies aktuell theoretisch

noch nicht möglich ist vorherzusagen, sind entsprechende Experimente vonnöten. Gezeigt wurde, dass diese nicht nur von der LIB selbst, also u. a. Zellchemie und Energiemenge, abhängt, sondern auch von den Umgebungsbedingungen wie Geometrie und der Gasgemischzusammensetzung innerhalb der druckfesten Kapselung.

Um in ferner Zukunft auf zerstörende Versuche mit LIBs verzichten zu können, wurde versucht, die Druckbelastung beim TR durch Gasexplosionen nachzubilden. Dazu wurden dynamische Versuche mit den Brenngasen Wasserstoff, Methan, Propan, Ethylen und Acetylen in verschiedensten Konzentrationen durchgeführt. Die Ergebnisse wurden dann mit quasi-statischen Versuchen in Luft verglichen. Für die verwendete druckfeste Kapselung und die untersuchten NMC811-Zellen konnte Acetylen mit einer Konzentration von $4,7 \pm 0,2$ Vol.-% in Luft die Druckbelastung in Form vom Explosionsdruck und $(dp/dt)_{ex}$ am ehesten nachbilden. Daneben sind Wasserstoff und Ethylen weitere potentielle Brenngase, welche zur Nachbildung verwendet werden könnten. Die vergleichsweise lange Dauer der Druckbelastung konnte durch keine der Gasexplosionen erreicht werden. Dieser Parameter ist allerdings nicht relevant für die Materialbeanspruchung. Die thermische Belastung kann bei LIBs größer sein als bei Gasexplosionen. Dieses Ergebnis zeigt, dass es zukünftig mit weiterführenden Untersuchungen möglich sein könnte, auf zerstörerische Versuche zu verzichten.

Diese Arbeit war der erste Schritt auf dem Weg zu der sicheren Auslegung von druckfesten Kapselungen, in denen LIBs sicher thermisch durchgehen dürfen. In Rahmen der vorgestellten Ergebnisse sind neue Fragestellungen entstanden, welche beantwortet werden sollten. Ziel dabei ist es, LIBs sicher in druckfesten Kapselungen einsetzen zu können. Eine dieser Fragen ist: Wie lässt sich der Explosionsdruck einer thermisch durchgehenden LIB innerhalb einer bestimmten druckfesten Kapselung zuverlässig vorhersagen? Zur Zeit sollte noch durch Experimente bewiesen werden, dass die gewählte druckfeste Kapselung der Belastung durch das TR der gewünschten LIB standhält. Der Explosionsdruck hängt, wie diese Arbeit gezeigt hat, von der Zellchemie, der Energiemenge, der Geometrie der druckfesten Kapselung und der Gasgemischzusammensetzung ab. Weitere Parameter sollten näher untersucht werden, wie zum Beispiel die Abhängigkeit von der Bauform und Positionierung der LIB, der Turbulenzen innerhalb der druckfesten Kapselung, der Methode zum Auslösen des TR und der Dichtigkeit und Wärmeleitfähigkeit der druckfesten Kapselung. Außerdem ist die Frage interessant, ob mehrere LIBs einen höheren Explosionsdruck erzeugen, als eine einzelne LIB mit gleicher Energiemenge. Des Weiteren sollte weiter an der Reduzierung des Druckes in Form von freiem Volumen und innerer Oberfläche der druckfesten Kapselung geforscht werden. Unter welchen Bedingungen rückt welcher Effekt mehr in den

Vordergrund? Und welche Abhängigkeiten entstehen dabei? Ab welchem Volumen ist der Effekt der freigesetzten Gasmenge einer LIB nicht mehr vernachlässigbar? Der Sauerstoffgehalt der Gasgemischzusammensetzung und das Material inkl. Wandstärke der Oberflächen sollte genauer untersucht werden. Das Ziel sollte dabei sein, die druckfeste Kapselung möglichst klein und leicht zu konstruieren, sodass Ressourcen gespart werden können.

Eine weitere interessante Frage ist, ob eine LIB auch PP hervorrufen kann, wie es in komplexen Geometrien bei Gasexplosionen vorkommen kann. Vor allem bei kleinen Volumen könnte es passieren, dass die freigesetzte Gasmenge relevant wird und es zu einer Vorkompression dieser explosionsfähigen Gase vor einer Zündung kommt. Dazu sollte auch überprüft werden, ob der Explosionsdruck in einer explosionsfähigen Atmosphäre höher ist als in Luft.

Durch die Klärung der noch offenen Fragen lassen sich weitere Konstruktionsbedingungen ermitteln, welche für eine sichere Verwendung von LIBs in druckfesten Kapselungen nötig sind.

A. Anhang

A.1. Fachliche Ergänzungen

A.1.1. Versuchsdaten

In diesem Abschnitt sind die Versuchsdaten aus den Abbildungen dieser Arbeit aufgeführt. Alle Explosionsdrücke p_{ex} sind, wie erwähnt, als Relativdrücke zu verstehen.

Tabelle A.1.: Messdaten zu Abschnitt 5.1.1 „Statische Belastung“

Material	Stärke in mm	Versuchs- anzahl	Statische Geraden $\varepsilon=a+b \cdot p$		
			a in $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$	b in $\frac{\mu\text{m}}{\text{m} \cdot \text{bar}}$	R^2 in %
Aluminium	8	5	117,459±0,023	15,732	99,92
		5	115,767±0,024	16,579	99,91
		5	121,974±0,088	144,737	98,30
	16	5	31,134±0,008	-8,568	99,90
		5	31,538±0,005	-2,149	99,96
		5	32,949±0,004	-10,865	99,97
		5	32,709±0,004	-11,382	99,96
	22	5	18,835±0,003	-8,316	99,95
		5	18,617±0,003	-8,289	99,95
Baustahl	8	5	45,854±0,004	-1,270	99,99
		5	40,491±0,005	-1,452	99,98
		5	40,561±0,004	-2,103	99,99
		5	45,601±0,014	12,130	99,74
	16	5	9,782±0,004	-5,866	99,71
		5	12,055±0,003	-3,894	99,90
		5	12,157±0,003	-7,230	99,93
		5	11,932±0,003	-7,526	99,93
	22	5	7,170±0,002	-5,371	99,84
		5	7,151±0,002	-4,971	99,86
		5	7,151±0,002	-4,971	99,86
Edelstahl	8	6	40,614±0,006	-3,617	99,94
		6	43,384±0,010	-4,586	99,87
		5	42,836±0,007	2,074	99,93
		5	41,706±0,007	0,175	99,93
	16	6	13,942±0,002	-2,035	99,94
		6	14,369±0,003	-2,269	99,94
		10	12,778±0,002	-2,424	99,95
		10	12,373±0,002	-2,709	99,92
	22	12	6,934±0,001	-1,530	99,85
		12	7,622±0,005	-1,944	98,74
		12	7,622±0,005	-1,944	98,74

Tabelle A.2.: Messdaten zu Abschnitt 5.1.2 „Dynamische Belastung“
mit Aluminium

Stärke in mm	PP	Brenngas in Luft	Vordruck	Versuchs- anzahl	ϵ_{\max} in um/m	p_{ex} in bar	DAZ in ms	$(dp/dt)_{\text{ex}}^*$ in bar/s
8	ja	C ₃ H ₈	ohne	5	907±2	7,46±0,02	20,9±0,2	286±3
			mit	5	1382±13	11,12±0,09	25,4±0,5	350±7
		H ₂	ohne	5	751±3	6,90±0,02	4,2±0,1	1307±23
			mit	5	1187±9	10,27±0,06	4,3±0,1	1921±27
			ohne	5	747±8	6,61±0,12	4,0±0,1	1313±30
			mit	5	1169±9	9,92±0,18	3,8±0,2	2093±92
	nein	C ₃ H ₈	ohne	5	2224±18	17,04±1,20	1,7±0,1	7929±880
			mit	5	2110±45	17,04±1,20	1,7±0,1	7929±880
			ohne	5	2556±50	26,75±1,93	1,8±0,2	11902±1374
			mit	5	2570±63	26,75±1,93	1,8±0,2	11902±1374
		H ₂	ohne	5	1943±73	14,51±0,63	0,5±0,1	22537±2589
			mit	5	2056±96	14,51±0,63	0,5±0,1	22537±2589
			ohne	6	2294±105	20,49±0,74	0,9±0,2	17768±3600
			mit	6	2294±105	20,49±0,74	0,9±0,2	17768±3600
16	ja	C ₃ H ₈	ohne	5	165±2	7,42±0,04	32,5±0,5	183±3
			mit	5	249±4	10,92±0,03	34,4±0,7	254±5
		H ₂	ohne	5	156±6	7,01±0,03	4,3±0,1	1295±29
			mit	5	237±7	10,00±0,17	4,2±0,1	1890±64
			ohne	5	185±1	6,50±0,04	4,0±0,1	1303±26
			mit	5	312±2	10,05±0,06	3,7±0,1	2156±68
	nein	C ₃ H ₈	ohne	5	713±99	17,45±2,04	1,8±0,2	7738±1397
			mit	5	683±198	17,45±2,04	1,8±0,2	7738±1397
			ohne	5	1290±210	26,02±0,91	1,8±0,3	11696±1820
			mit	5	1290±210	26,02±0,91	1,8±0,3	11696±1820
		H ₂	ohne	4	726±34	13,96±0,33	0,7±0,2	16869±5926
			mit	4	824±12	13,96±0,33	0,7±0,2	16869±5926
			ohne	4	758±15	13,96±0,33	0,7±0,2	16869±5926
			mit	4	758±15	13,96±0,33	0,7±0,2	16869±5926
mit	5	1053±29	18,21±0,26	0,5±0,2	31727±15562			

* $(dp/dt)_{\text{ex}}$ wurde durch die Methode aus der Norm IEC 60079-1 [4] ermittelt.

Tabelle A.3.: Messdaten zu Abschnitt 5.1.2 „Dynamische Belastung“
mit Baustahl

Stärke in mm	PP	Brenngas in Luft	Vordruck	Versuchs- anzahl	ϵ_{\max} in um/m	p_{ex} in bar	DAZ in ms	$(dp/dt)_{\text{ex}}^*$ in bar/s
8	ja	C ₃ H ₈	ohne	5	337±1	7,52±0,04	32,5±0,5	185±3
			mit	5	505±5	10,88±0,09	33,9±1,0	257±8
		H ₂	ohne	5	307±2	7,01±0,01	4,3±0,0	1307±11
			mit	5	454±12	10,01±0,18	4,2±0,1	1889±48
			ohne	5	257±2	6,80±0,09	4,1±0,1	1333±26
			mit	5	401±1	10,23±0,06	3,8±0,0	2140±21
	nein	C ₃ H ₈	ohne	5	549±11	17,53±0,37	1,8±0,2	7954±724
			mit	5	864±40	25,79±0,64	1,7±0,1	11904±745
		H ₂	ohne	7	569±159	12,45±0,78	0,7±0,1	14378±1617
			mit	6	844±130	18,70±1,13	0,7±0,0	20965±1368
16	ja	C ₃ H ₈	ohne	5	66±1	7,37±0,01	31,4±0,2	188±1
			mit	3	103±4	10,86±0,01	33,4±0,5	260±4
		H ₂	ohne	5	74±13	6,88±0,05	4,3±0,0	1273±13
			mit	5	112±14	9,92±0,07	4,1±0,1	1929±58
			ohne	4	65±1	6,40±0,03	3,6±0,0	1415±15
			mit	4	65±1	6,40±0,03	3,6±0,0	1415±15
	nein	C ₃ H ₈	ohne	6	154±13	18,73±0,31	2,0±0,1	7545±295
			mit	5	270±19	26,96±0,35	1,5±0,0	14101±292
		H ₂	ohne	5	142±5	12,79±0,28	0,6±0,0	17642±642
			mit	6	230±27	18,39±2,03	0,6±0,0	26599±3229

* $(dp/dt)_{\text{ex}}$ wurde durch die Methode aus der Norm IEC 60079-1 [4] ermittelt.

Tabelle A.4.: Messdaten zu Abschnitt 5.2.1 „Zellchemie“ in der luftgefüllten druckfesten Kapselung von Typ 8265

Zellchemie	C in $\pm 0,01$ Ah	U in $\pm < 0,04$ V	V_{frei} in $\pm 0,641$	p_{ex} in $\pm 0,05$ bar	DAZ in $\pm < 1$ ms	Druckdauer in $\pm < 1$ ms	$(dp/dt)_{ex}$ in bar/s	Temperaturen in °C									
								LIB		Kupferblock		Lose		Innenwand		Außenwand	
								vor TR	Max.	Max.	Max.	Max.	Max.	Max.	Max.	Min.	Max.
LCO (G-6)	2,44	4,25	19,52	4,47	112	1107	114,1 \pm 0,1	179 \pm 3	406 \pm 228	262 \pm 24	347 \pm 315 349 \pm 320	161 \pm 143 93 \pm 75	22 \pm 3	16 \pm 3			
	2,47	4,14	19,52	4,49	104	1197	96,4 \pm 0,1	204 \pm 4	416 \pm 213	266 \pm 31	345 \pm 317 296 \pm 271	172 \pm 154 89 \pm 72	21 \pm 3	15 \pm 3			
	2,44	4,08	19,52	4,63	58	612	120,7 \pm 0,1	221 \pm 5	719 \pm 6	277 \pm 3	467 \pm 432 254 \pm 225	148 \pm 131 85 \pm 69	20 \pm 3	14 \pm 3			
	2,48	4,33	19,32	3,58	106	1365	153,3 \pm 0,1	157 \pm 3	505 \pm 350	305 \pm 38	321 \pm 298 345 \pm 320	160 \pm 152 39 \pm 32	12 \pm 3	6 \pm 3			
	2,49	4,05	19,32	2,38	526	2080	14,3 \pm 0,4	193 \pm 5	261 \pm 70	291 \pm 17	331 \pm 301 246 \pm 221	125 \pm 115 47 \pm 40	12 \pm 3	6 \pm 3			
NCA (G-7)	3,00	4,11	19,52	4,06	184	967	30,9 \pm 1,1	202 \pm 5	302 \pm 100	320 \pm 33	416 \pm 381 297 \pm 262	181 \pm 159 82 \pm 45	27 \pm 3	20 \pm 3			
	3,00	4,09	19,52	3,75	828	1167	11,5 \pm 0,7	189 \pm 4	607 \pm 6	279 \pm 3	453 \pm 420 314 \pm 288	492 \pm 476 30 \pm 4	25 \pm 3	14 \pm 3			
	3,00	4,09	19,52	5,30	248	849	98,1 \pm 0,1	188 \pm 3	417 \pm 230	316 \pm 70	418 \pm 390 310 \pm 284	96 \pm 81 47 \pm 32	20 \pm 3	13 \pm 3			
	3,02	4,22	19,32	3,70	113	1651	272,1 \pm 2,2	191 \pm 5	476 \pm 287	271 \pm 27	323 \pm 300 326 \pm 310	141 \pm 137 175 \pm 173	7 \pm 3	2 \pm 3			
	3,01	4,52	19,32	2,27	642	2971	11,8 \pm 0,8	177 \pm 3	639 \pm 14	249 \pm 3	348 \pm 332 240 \pm 227	229 \pm 221 12 \pm 12	7 \pm 3	0 \pm 3			
3,01	4,05	19,32	3,20	208	2432	139,3 \pm 2,1	188 \pm 4	424 \pm 237	288 \pm 17	321 \pm 205 406 \pm 388	127 \pm 121 65 \pm 60	9 \pm 3	5 \pm 3				
NMC (G-10, G-11)	3,32	4,30	19,52	4,34	60	1322	73,4 \pm 0,2	200 \pm 6	476 \pm 278	275 \pm 29	362 \pm 340 387 \pm 362	137 \pm 128 68 \pm 60	13 \pm 3	7 \pm 3			
	3,33	4,50	19,50	4,41	70	1139	193,6 \pm 3,4	193 \pm 7	394 \pm 203	297 \pm 56	338 \pm 310 368 \pm 336	259 \pm 242 66 \pm 50	21 \pm 3	15 \pm 3			
	3,33	4,40	19,50	4,62	82	1029	106,6 \pm 0,1	170 \pm 4	528 \pm 360	346 \pm 85	339 \pm 325 301 \pm 279	81 \pm 73 195 \pm 190	9 \pm 3	3 \pm 3			
	3,31	4,16	19,30	4,45	63	951	95,8 \pm 0,2	207 \pm 9	391 \pm 190	274 \pm 30	333 \pm 300 333 \pm 291	130 \pm 113 85 \pm 72	18 \pm 3	13 \pm 3			
	2,84	4,24	19,32	4,86	42	1014	184,5 \pm 1	198 \pm 6	336 \pm 141	277 \pm 47	388 \pm 358 356 \pm 331	79 \pm 42 87 \pm 77	14 \pm 3	10 \pm 3			
2,85	4,18	19,32	5,10	48	886	232,8 \pm 1,1	204 \pm 7	301 \pm 100	276 \pm 34	331 \pm 304 362 \pm 339	90 \pm 81 115 \pm 106	12 \pm 3	8 \pm 3				
2,87	4,20	19,30	4,16	56	1141	134,2 \pm 6,3	200 \pm 7	338 \pm 140	289 \pm 42	320 \pm 278 403 \pm 362	250 \pm 236 84 \pm 72	18 \pm 3	11 \pm 3				

* $(dp/dt)_{ex}$ wurde durch die rekursive Fit-Methode [17] mit einem Intervall von 500 Messwerten ermittelt.

Tabelle A.5.: Messdaten zu Abschnitt 5.2.2 „Kapazitäten“
in der luftgefüllten druckfesten Kapselung von Typ 8264 „mittel“ mit NMC-Zellen (G-9, G-10, G-11, G-12)

C in $\pm 0,01$ Ah	U in $\pm < 0,04$ V	V _{frei} in $\pm 0,91$	p _{ex} in $\pm 0,1$ bar	DAZ in $\pm < 1$ ms	Druck- dauer in $\pm < 1$ ms	(dp/dt) _{ex} * in bar/s	ε _{max} in µm/m	Temperaturen in °C								
								LIB		Kupferblock	Lose		Innenwand		Außenwand	
								vor TR	Max.	Max.	Max.	Max.	Max.	Min.	Max.	
3,36	3,85	21,6	3,74	58	741	179,5±1,6	171±19	207±7	454±250	278±38	357±310 353±305	134±119 262±247	15±3	20±3		
3,37	4,14	21,6	3,25	211	945	29,6±0,4	187±23	198±7	405±209	279±33	425±376 322±277	193±178 172±157	16±3	21±3		
3,37	4,16	21,6	4,6	48	622	113,2±0,2	256±21	199±7	462±267	266±31	353±313 367±322	187±166 328±56	20±3	25±3		
2,86	4,18	21,6	4	111	706	54,1±0,3	237±19	201±7	408±210	448±188	381±341 380±344	125±110 141±126	15±3	20±3		
2,86	4,26	21,6	3,58	57	816	103,9±0,7	204±17	191±5	417±228	289±47	405±376 197±150	141±124 55±38	16±3	21±3		
2,86	4,18	21,6	3,44	75	869	133,9±3,2	205±16	193±6	425±235	287±43	364±334 312±280	152±133 58±40	17±3	18±3		
4,7	4,23	21,6	3,78	242	1203	46,3±0,2	229±19	191±6	469±281	454±203	649±603 376±331	357±336 43±22	20±3	31±3		
4,7	4,19	21,6	4,81	73	670	215,5±0,3	293±23	191±5	469±280	314±77	482±435 341±292	115±90 317±288	26±3	34±3		
4,7	4,22	21,6	4,73	108	756	79,6±0,1	264±21	189±4	808±622	466±219	396±351 392±350	129±106 328±306	21±3	27±3		
2,23	4,2	21,8	2,61	67	694	39,6±0,3	153±14	186±3	508±9	268±16	331±277 196±150	201±179 51±27	21±3	29±3		
2,09	4,26	21,8	2,79	102	1187	118,2±0,1	172±16	180±4	469±291	270±16	369±326 324±284	136±118 55±37	17±3	22±3		
1,96	4,18	21,6	2,46	92	609	39,9±0,4	158±11	186±3	308±124	301±43	295±252 366±319	97±74 125±102	22±3	26±3		

* (dp/dt)_{ex} wurde durch die rekursive Fit-Methode [17] mit einem Intervall von 500 Messwerten ermittelt.

Tabelle A.6.: Messdaten zu Abschnitt 5.2.3 „Gehäusegeometrie und Inertatmosphäre“ in einer N₂-gefüllten druckfesten Kapselung mit NMC-Zellen (G-10)

Druckfeste Kapselung	C in ±0,01 Ah	U in ±<0,01 V	p _{ex} in ±0,05 bar	DAZ in ±<1 ms	Druckdauer in ±<1 ms	(dp/dt) _{ex} in in bar/s	ε _{max} in in µm/m	Temperaturen in °C									
								LIB		Kupferblock		Lose		Innenwand		Außenwand	
								vor TR	Max.	Max.	Max.	Max.	Max.	Max.	Max.	Min.	Max.
Typ 8264 „klein“	2,87	4,3	2,44	63	939	87,5±0,9	129±13	198±6	263±66	260±23	31±3	55±32	129±65	23±3	24±3		
Typ 8264 „groß“	2,89	4,35	1,83	70	1928	52,9±4,1	120±12	193±6	266±75	319±70	44±3	43±14	200±63	27±3	31±3		

* (dp/dt)_{ex} wurde durch die rekursive Fit-Methode [17] mit einem Intervall von 500 Messwerten ermittelt.

Tabelle A.7.: Messdaten zu Abschnitt 5.2.3 „Gehäusegeometrie und Inertatmosphäre“ in einer luftgefüllten druckfesten Kapselung mit Aluminiumdeckel und NMC-Zellen (G-10)

Druckfeste Kapselung	C in ±0,01 Ah	U in ±<0,01 V	p _{ex} in ±0,05 bar	DAZ in ±<1 ms	Druckdauer in ±<1 ms	(dp/dt) _{ex} in in bar/s	ε _{max} in in µm/m	Temperaturen in °C									
								LIB		Kupferblock		Lose		Innenwand		Außenwand	
								vor TR	Max.	Max.	Max.	Max.	Max.	Max.	Max.	Min.	Max.
Typ 8264 „groß“	2,84	4,29	4,8	100	1023	81,5±7,6	326±20	197±5	590±395	233±26	408±388	100±89	11±3	18±3			
												522±503			17±7		
												436±416			128±117		
Typ 8264 „Gitter“	2,83	4,28	2,12	106	1205	49,2±2,8	127±11	190±5	378±191	217±11	257±234	23±3	9±3	11±3			
												346±320			11±3		
												330±301			24±3		
Typ 8264 „Gitter“	2,83	4,3	1,83	155	1540	18,8±0,4	116±10	185±6	437±252	314±50	267±236	29±5	10±3	12±3			
												337±302			24±13		
												326±297			24±3		
Typ 8264 „Gitter“	2,82	4,3	2,1	97	1309	60,3±5,5	131±11	177±6	421±245	308±63	358±326	42±32	9±3	11±3			

* (dp/dt)_{ex} wurde durch die rekursive Fit-Methode [17] mit einem Intervall von 500 Messwerten ermittelt.

Tabelle A.8.: Messdaten zu Abschnitt 5.2.3 „Gehäusegeometrie und Inertatmosphäre“
in einer luftgefüllten druckfesten Kapselung mit NMC-Zellen (G-10)

Druckfeste Kapselung	C in ±0,01 Ah	U in ±<0,01 V	p _{ex} in ±0,05bar	DAZ in ±<1 ms	Druck- dauer in ±<1 ms	(dp/dt) _{ex} in in bar/s	ε _{max} in µm/m	Temperaturen in °C							
								LIB		Kupfenblock	Lose		Innenwand		Außenwand
								vor TR	Max.	Max.	Max.	Max.	Max.	Min.	Max.
Typ 8265	2,84	4,25	4,86	43	1015	184,6±1	-	199±6	336±141	277±47	388±358	79±42	10±3	14±3	
	2,86	4,18	5,11	49	887	232,9±1,1	-	205±7	301±100	276±34	356±331	87±77	8±3	12±3	
	2,87	4,21	4,16	56	1142	134,2±6,3	-	200±7	338±140	289±42	331±304	90±81	11±3	18±3	
Typ 8264 „klein“	2,87	4,28	3,24	21	648	283,9±1	178±15	193±6	355±165	257±22	23±3	517±502	15±3	16±3	
	2,88	4,3	2,74	16	948	184,5±4,3	139±13	194±7	338±83	257±20	247±183	87±70	15±3	17±3	
	2,83	4,31	3,38	29	524	188,7±9	173±16	188±5	262±79	314±63	31±14	408±390	14±3	15±3	
Typ 8264 „mittel“	2,86	4,18	4	111	706	54,1±0,3	237±19	201±7	408±210	448±188	381±341	125±110	15±3	20±3	
	2,86	4,26	3,58	57	816	103,9±0,7	204±17	191±5	417±228	289±47	380±344	141±126	16±3	21±3	
	2,86	4,18	3,44	75	869	133,9±3,2	205±16	193±6	425±235	287±43	405±376	141±124	17±3	18±3	
Typ 8264 „groß“	2,87	4,33	4,69	130	1111	110,8±0,7	305±24	159±3	541±384	383±124	364±334	152±133	17±3	18±3	
	2,86	4,34	4,36	100	1214	78,9±0,5	274±22	197±6	388±196	297±51	312±280	58±40	18±3	25±3	
	2,87	4,42	3,87	107	1512	77,4±0,6	256±20	192±6	479±289	382±145	469±435	89±69	21±3	28±3	
Typ 8280	2,82	4,33	<1,3	-	-	-	-	20±3	254±90	284±34	541±505	54±35	19±3	23±3	
	2,79	4,34	0,14	6834	3051	22±1,2	-	196±6	424±231	283±32	469±435	105±81	18±3	22±3	
	2,81	4,34	0,22	8	21	25,2±2	-	199±7	347±152	352±106	527±496	116±95	18±3	21±3	

* (dp/dt)_{ex} wurde durch die rekursive Fit-Methode [17] mit einem Intervall von 500 Messwerten ermittelt.

Tabelle A.9.: Literaturdaten zu Abschnitt 5.2.3
 „Gehäusegeometrie und Inertatmosphäre“
 (überhitzte voll geladenen NMC811-Zellen der Bauform 18650 mit einer
 Energiemenge von 11,7 Wh und Zellvolumen von 0,01651 [11, 45])

V_{frei} in l	A in m^2	p_{ex} in bar	$(dp/dt)_{\text{ex}}$ in bar/s	K_{LIB} -Wert in bar · m/s
0,0925	0,00988	191	1450	65,4
		230	2000	90,6
		230	2530	115
0,168	0,01418	160	1730	95,7
		139	1170	64,3
		164	1610	88,9
0,267	0,02153	75,5	366	23,6
		69,9	459	29,6
		109	704	45,4
0,685	0,03040	42,4	337	30,2
		45,1	172	15,4
		45,2	188	16,8
1,278	0,04864	23,7	138	15,0
		23,1	185	20,1
		24,9	182	19,8
2,393	0,07296	14,4	110	14,7
		13,9	103	13,8
		13,3	83,5	11,2
3,913	0,10944	9,1	116	18,3
		9,3	105	16,5
		10,7	137	21,6
4,843	0,13377	9,0	118	20,0
		8,67	81,2	13,7
		9,3	123	20,8

Tabelle A.10.: Temperaturmessdaten zu Abschnitt 5.3.2
 „Nachbildung der quasi-statischen Belastung“ (v. V.: vor dem Versuch)

Brenngas in Luft	Konzentration in $\pm 0,2$ Vol.-%	Temperaturen in $^{\circ}\text{C}$					
		Außenwand		Innenwand		lose	
		v. V.	Max.	v. V.	Max.	v. V.	Max.
C_2H_4	4,8	22 \pm 2	23 \pm 3	22 \pm 2	31 \pm 11	22 \pm 2 22 \pm 2	224 \pm 204 276 \pm 256
	12,9	22 \pm 2	23 \pm 3	22 \pm 2	32 \pm 11	23 \pm 2 23 \pm 2	218 \pm 196 286 \pm 267
H_2	20,7	23 \pm 2	23 \pm 3	23 \pm 2	32 \pm 11	23 \pm 2 22 \pm 2	190 \pm 169 231 \pm 210
	52,7	20 \pm 2	20 \pm 3	20 \pm 2	30 \pm 12	20 \pm 2 21 \pm 2	200 \pm 181 249 \pm 230
CH_4	9,0	18 \pm 2	19 \pm 3	18 \pm 2	30 \pm 13	18 \pm 2 18 \pm 2	237 \pm 221 271 \pm 254
	11,6	20 \pm 2	21 \pm 3	20 \pm 2	31 \pm 13	21 \pm 2 21 \pm 2	223 \pm 204 297 \pm 278
C_3H_8	6,5	18 \pm 2	18 \pm 3	18 \pm 2	28 \pm 12	18 \pm 2 18 \pm 2	225 \pm 209 273 \pm 257
C_2H_2	4,6	21 \pm 2	22 \pm 3	21 \pm 2	29 \pm 10	22 \pm 2 22 \pm 2	212 \pm 192 233 \pm 213

Tabelle A.11.: Messdaten zu Abschnitt 5.3.1 „Explosionsfähige Atmosphären“
in der druckfesten Kapselung von Typ 8264 „groß“ mit NMC811-Zellen (G-10)

C in $\pm 0,01$ Ah	U in $\pm < 0,04$ V	Brenngas in Luft	V_{frei} in $\pm 0,91$	p_{ex} in $\pm 0,05$ bar	DAZ in $\pm < 1$ ms	Druck- dauer in $\pm < 1$ ms	$(dp/dt)_{\text{ex}}^*$ in bar/s	ϵ_{max} in $\mu\text{m}/\text{m}$	Temperaturen in °C		Außenwand Min.	Außenwand Max.			
									LIB vor TR	LIB Max.			Kupferblock Max.	Lose Max.	Innenwand Max.
keine LIB vorhanden		C_3H_8	38,3	6,9	60	407	$127,4 \pm 0,4$	-	27 \pm 4	437 \pm 413	312 \pm 73	386 \pm 357	72 \pm 57	11 \pm 3	17 \pm 3
			38,3	6,78	62	407	$120,8 \pm 0$	-	19 \pm 3	419 \pm 391	336 \pm 98	402 \pm 369	414 \pm 388	63 \pm 50	15 \pm 3
		H_2	38,3	6,17	7	136	$103,59 \pm 0,8$	-	36 \pm 3	376 \pm 342	301 \pm 60	401 \pm 367	76 \pm 58	16 \pm 3	25 \pm 3
			38,3	6,24	7	170	$104,3,6 \pm 3,5$	-	29 \pm 3	425 \pm 394	392 \pm 174	400 \pm 365	426 \pm 395	81 \pm 60	18 \pm 3
2,87	4,21	H_2	38,1	7,02	7	216	$1210,8 \pm 2,7$	357 \pm 27	26 \pm 3	447 \pm 422	16 \pm 3	16 \pm 3	16 \pm 3	15 \pm 3	22 \pm 3
2,86	4,32		38,1	7,04	7	211	$1098,4 \pm 1,5$	395 \pm 25	193 \pm 6	542 \pm 353	281 \pm 60	483 \pm 454	83 \pm 68	14 \pm 3	21 \pm 3
2,86	4,32	H_2	38,1	6,87	8	248	$1023 \pm 1,2$	351 \pm 27	193 \pm 6	532 \pm 342	286 \pm 70	494 \pm 467	75 \pm 60	15 \pm 3	22 \pm 3
			38,1	7,18	49	439	$111,4 \pm 1,4$	380 \pm 29	198 \pm 4	471 \pm 274	433 \pm 205	453 \pm 433	100 \pm 88	12 \pm 3	19 \pm 3
2,83	4,3	C_3H_8	38,3	7,25	40	559	$198,8 \pm 42,2$	393 \pm 29	191 \pm 4	491 \pm 303	432 \pm 410	459 \pm 441	90 \pm 78	10 \pm 3	17 \pm 3
2,84	4,28		38,1	7,21	39	481	$140,7 \pm 0,8$	379 \pm 29	193 \pm 4	533 \pm 342	253 \pm 35	445 \pm 424	75 \pm 63	12 \pm 3	18 \pm 3

* $(dp/dt)_{\text{ex}}$ wurde durch die rekursive Fit-Methode [17] mit einem Intervall von 500 oder 10.000 Messwerten ermittelt.

Tabelle A.12.: Druckmessdaten zu Abschnitt 5.3.2
 „Nachbildung der quasi-statischen Belastung“

Brenngas in Luft	Konzentration in $\pm 0,2$ Vol.-%	p_{ex} in $\pm 0,1$ bar	$(dp/dt)_{ex}^*$ in bar/s	K_G -Wert in bar · m/s	DAZ in $\pm < 1$ ms	Max. Druckdauer in $\pm < 1$ ms	
C ₂ H ₄	3,4	Keine Explosion					< 273
	4,5	4,5	60,7 \pm <0,1	16 \pm 1	76		
	4,7	4,6	70,4 \pm <0,1	19 \pm 1	-		
	4,8	4,7	78 \pm <0,1	21 \pm 1	61		
	5,0	4,8	86 \pm <0,1	23 \pm 1	57		
	5,1	4,9	97,7 \pm <0,1	26 \pm 1	52		
	6,6	6,4	276,5 \pm <0,1	75 \pm 2	26		
	10,2	6,0	136,9 \pm <0,1	37 \pm 1	47		
	11,3	5,4	74 \pm <0,1	20 \pm 1	80		
	12,4	4,9	47,6 \pm <0,1	13 \pm <1	115		
	12,9	4,7	38,5 \pm <0,1	10 \pm <1	139		
14,6	Keine Explosion						
H ₂	12,6	2,7	37 \pm <0,1	10 \pm <1	71	< 126	
	13,6	3,0	53,4 \pm <0,1	14 \pm <1	54		
	15,7	3,6	106,1 \pm 0,1	29 \pm 1	33		
	19,7	4,4	304,4 \pm 0,2	82 \pm 3	15		
	20,7	4,8	384,2 \pm 0,2	104 \pm 3	13		
	21,8	4,8	475,5 \pm <0,1	128 \pm 4	110		
	29,5	6,0	1198,6 \pm 1,3	324 \pm 11	6		
	31,0	5,9	1211,7 \pm 2,3	327 \pm 11	5		
	40,1	5,7	1187,8 \pm 1	321 \pm 11	5		
	45,2	5,4	925,2 \pm 0,3	250 \pm 8	6		
	50,3	4,9	680,4 \pm 0,1	184 \pm 6	8		
	52,7	4,7	560,1 \pm 0,1	151 \pm 5	9		
	71,0	Keine Explosion					
CH ₄	6,6	Keine Explosion					< 109
	7,7	4,0	33 \pm <0,1	9 \pm <1	115		
	8,3	4,4	49,6 \pm <0,1	13 \pm <1	89		
	9,0	4,8	71,2 \pm <0,1	19 \pm 1	69		
	9,5	5,0	78,1 \pm <0,1	21 \pm 1	64		
	10,1	5,0	84,5 \pm <0,1	23 \pm 1	60		
	11,2	4,9	66,7 \pm <0,1	18 \pm 1	74		
	11,6	4,7	55,9 \pm <0,1	15 \pm <1	82		
	11,9	Keine Explosion					
C ₃ H ₈	3,5	Keine Explosion					< 1303
	3,8	5,5	104,7 \pm 0,1	28 \pm 1	56		
	4,0	5,7	131,3 \pm 0,1	35 \pm 1	48		
	4,6	5,8	149,1 \pm 0,1	40 \pm 1	41		
	4,9	5,8	141,6 \pm <0,1	38 \pm 1	43		
	5,3	5,6	127,2 \pm <0,1	34 \pm 1	48		
	5,9	5,3	67,9 \pm 0<0,1	18 \pm 1	82		
	6,5	4,6	35,6 \pm <0,1	10 \pm <1	148		
	6,9	3,8	23,5 \pm <0,1	6 \pm <1	231		
7,5	Keine Explosion						
C ₂ H ₄	2,3	Keine Explosion					< 125
	4,3	4,4	84,4 \pm <0,1	23 \pm 1	54		
	4,5	4,7	107,9 \pm <0,1	29 \pm 1	44		
	4,6	4,7	111,6 \pm <0,1	30 \pm 1	44		
	4,7	5,0	138,5 \pm <0,1	37 \pm 1	37		
	7,8	7,3	923,2 \pm 0,1	249 \pm 8	9		
	11,7	8,0	1125,5 \pm <0,1	304 \pm 10	8		
	16,8	7,6	348,3 \pm <0,1	94 \pm 3	24		
	21,9	6,6	496,7 \pm <0,1	134 \pm 4	39		
	22,9	6,5	408,5 \pm <0,1	110 \pm 4	24		
28,6	Keine Explosion						

* $(dp/dt)_{ex}$ wurde durch die rekursive Fit-Methode [17] mit einem Intervall von 10.000 Messwerten ermittelt.

A.1.2. Beschleunigungsempfindlichkeiten von Drucksensoren

Bei der Druckmessung der dynamischen Versuche mit Drucküberhöhungen (PP) muss die Beschleunigungsempfindlichkeit des Drucksensors berücksichtigt werden. Für ein untersuchtes Gasgemisch mit gleicher Dichte und Gehäusegeometrie sollten gleich hohe Explosionsdrücke bei einer Explosion entstehen. Dies sollte unabhängig von dem Material des Flansches sein. Vorversuche haben gezeigt, dass bei der Verwendung des Drucksensors (G-23) im Falle eines Aluminiumflansches wesentlich größere Explosionsdrücke entstehen als bei dem Baustahlflansch. Dies ist in Abb. A.1a in Abhängigkeit der Wandstärke dargestellt. Deshalb wurden die Versuche mit dem Aluminiumflansch mit einem beschleunigungsunempfindlicheren Drucksensor (G-24) wiederholt. Den Unterschied der Messergebnisse zeigt Abb. A.1.

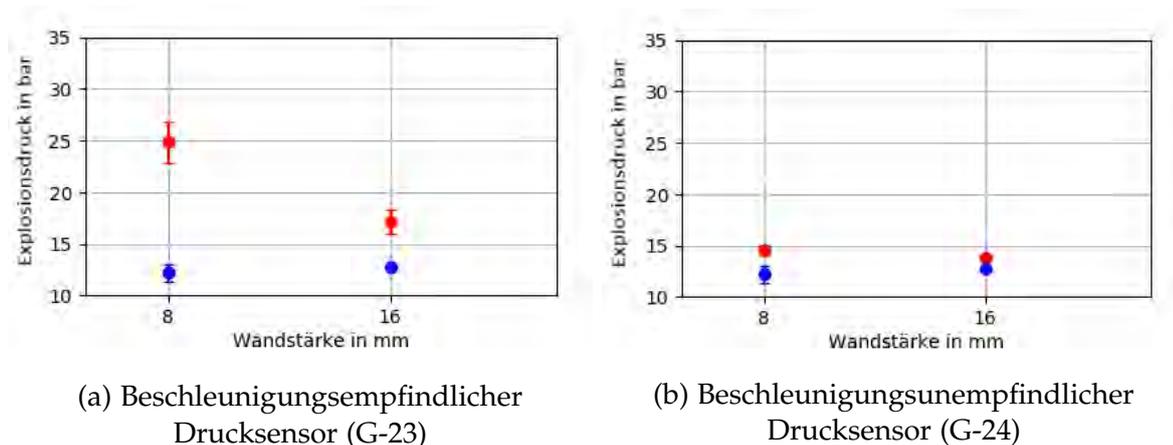


Abb. A.1.: Explosionsdrücke der dynamischen Versuche mit PP mit unterschiedlich beschleunigungsempfindlichen Drucksensoren am Beispiel von H₂ ohne Vordruck (Flanschmaterial: Aluminium, Baustahl)

A.1.3. Methode zum Hervorrufen des thermischen Durchgehens

Es können verschiedene Methoden verwendet werden um das thermische Durchgehen (TR) einer Lithium-Ionen-Batterie (LIB) hervorzurufen. Nach der Literatur soll das Überladen einen höheren Explosionsdruck beim TR entstehen lassen als bei anderen Methoden [38]. Vorversuche haben gezeigt, dass viele LIBs nicht durch Überladen zum TR gebracht werden konnten. Dabei wurden Versuche durchgeführt, wobei die LIBs mit 1 C bis 7,3 C aufgeladen wurden. Beim Überladen kam es zu einem Spannungsabfall, wobei die LIB danach weder ent- noch aufgeladen werden konnte. Vermutlich ist in den LIBs ein Shut-down-Separator (siehe dazu

Abschnitt 2.2) eingebaut, der die LIB vor dem TR geschützt hat. Per Röntgenanalyse konnte nicht nachgewiesen werden, ob es sich wirklich um einen solchen handelt. Aus diesem Grund wurde die Methode mittels Überladen verworfen und die Methode des Überhitzens für die nachfolgenden Versuche verwendet. Als Zellchemie diente hier Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminiumoxid (NCA). Zunächst wurde versucht, mittels Heizpatronen (G-35) jeweils auf den Polen der LIB, diese zum TR zu bringen. Dies schlug allerdings fehl. Als nächstes wurden mittels Heizplatten (G-36) jeweils auf den Polen Versuche durchgeführt. Dies führte zum gewünschten Ergebnis, das TR. Allerdings können bei diesen Versuchen weder Spannungsmessungen durchgeführt werden, noch kann die LIB mit applizierten Heizplatten aufgeladen werden. Des Weiteren wurden Versuche mit einem Heizelement (G-31), welches in einem Kupferblock eingelassen wurde, durchgeführt. Das TR konnte dadurch ausgelöst werden. Es wurde außerdem ein Versuch durchgeführt, bei dem die LIB in einem Halter fest eingespannt war. Im Vergleich liegen die Explosionsdrücke und die zeitlichen Explosionsdruckanstiege $(dp/dt)_{ex}$ der untersuchten Methoden im gleichen Größenbereich, sodass diese Methoden als vergleichbar gewertet werden können. Abb. A.2 zeigt diesen Vergleich im Bezug auf die Druckbelastung der druckfesten Kapselung, normiert auf die Energiemenge.

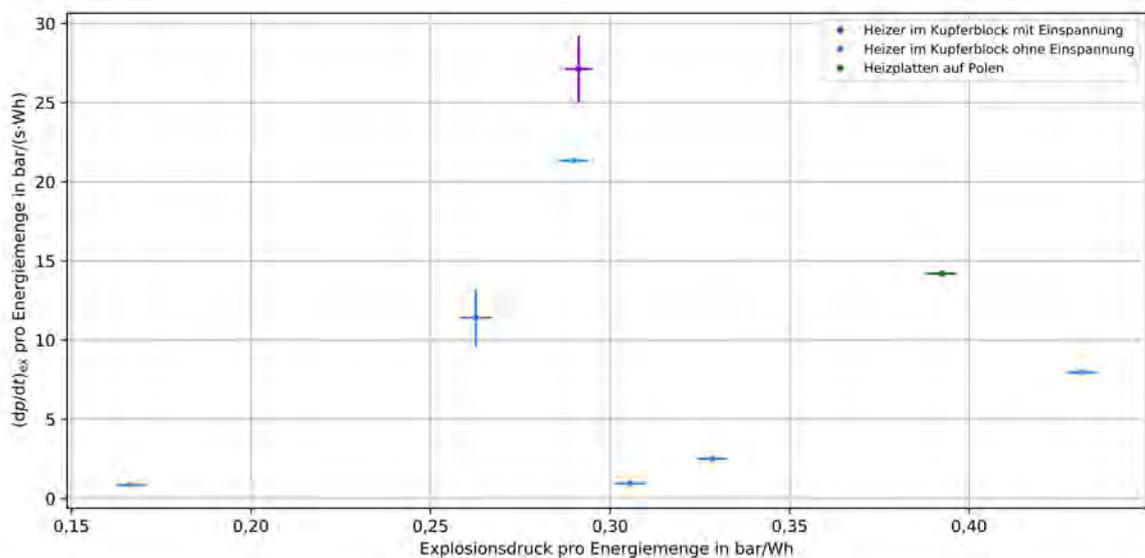


Abb. A.2.: Explosionsdrücke und $(dp/dt)_{ex}$ normiert auf die Energiemenge bei unterschiedliche Methoden um das TR einer NCA-Zelle (G-7) hervorzurufen

A.2. Wissenschaftliche Vita

Publikationen:

- “Flammenausbreitung nach Zündung durch Hochspannungskondensator-entladungen nahe der Mindestzündenergie”. Bachelorarbeit. Leibniz Universität Hannover, 31. Mai 2013
- “Bestimmung der Temperatur von Hochspannungskondensatorentladungen geringer Energie mittels optischer Emissionsspektroskopie”. Masterarbeit. Leibniz Universität Hannover, 23. Nov. 2016
- Stefan Essmann, Stefanie Spörhase, Holger Grosshans und Detlev Markus. “Precise Triggering of Electrical Discharges by Ultraviolet Laser Radiation for the Investigation of Ignition Processes”. Zeitschriftenartikel mit Peer-Review. In: *Journal of Electrostatics* 91 (Feb. 2018), S. 34–40. ISSN: 03043886. DOI: 10.1016/j.elstat.2017.12.003
- Stefan Essmann, Stefanie Spörhase, Holger Grosshans, Detlev Markus und Ulrich Maas. “Experimentelle Untersuchung der Zündung durch elektrische Entladungen geringer Energie”. In: 15. BAM-PTB-Kolloquium. Vortrag und Konferenzbeitrag im Tagungsband. Braunschweig, 21.–22. Mai 2019. ISSN: 0030-834X. DOI: 10.7795/210.20190521f
- Stefanie Spörhase, Falk Marian Brombach und Tim Krause. “Beanspruchungen von Ex d-Gehäusen”. In: 15. BAM-PTB Kolloquium zur chemischen und physikalischen Sicherheitstechnik. Posterbeitrag. Braunschweig, 21.–22. Mai 2019
- Stefanie Spörhase, Falk Marian Brombach, Tim Krause, Detlev Markus und Otto Walch. “Untersuchung der Einflussparameter auf die Materialbeanspruchung von Ex „d“-Gehäusen”. In: 14. Fachtagung Anlagen-, Arbeits- und Umweltsicherheit. Vortrag und Konferenzbeitrag im Tagungsband. Köthen: DECHEMA VDI, 7.–8. Nov. 2019
- Stefanie Spörhase, Falk Marian Brombach, Felix Eckhardt, Tim Krause, Detlev Markus, Bernd Küstner und Otto Walch. “Untersuchungen zur Vergleichbarkeit der statischen und dynamischen Überdruckprüfung von druckfesten Kapselungen”. Zeitschriftenartikel mit Peer-Review. In: *Forschung im Ingenieurwesen* (16. Dez. 2022). ISSN: 0015-7899, 1434-0860. DOI: 10.1007/s10010-022-00604-z
- Stefanie Spörhase, Amiriman Kianfar, Tamina Kirklies, Detlev Markus, Otto Walch, Bernd Limbacher und Stefan Essmann. “Effects of Thermal Runaway of Lithium-Ion Batteries in Flameproof Enclosures”. In: 14th International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions, Proceedings (ISHPMIE). Posterbeitrag. Braunschweig, 14.-15. Juli 2022

- Amiriman Kianfar, Stefanie Spörhase, Detlev Markus, Bernd Limbacher und Stefan Essmann. "Thermal runaway of lithium-ion batteries in flameproof enclosures: effect of cell chemistry". In: Batterietagung. Posterbeitrag. Aachen, 27.-28. Apr. 2023
- Stefanie Spörhase, Tim Krause und Otto Walch. "Statische und dynamische Materialbeanspruchung von Ex „d“-Gehäusen". Zeitschriftenartikel ohne Peer-Review. In: R. STAHL, *Ex-Magazin* (2023). DOI: 10.60048/exm20_38
- Torben Jennert, Stefanie Spörhase, Amiriman Kianfar und Stefan Essmann. "Effect of Thermal Runaway of Lithium-Ion Batteries in a Flameproof Enclosure and Simultaneous Electrochemical Impedance Spectroscopy". In: 4th International Battery Safty Workshop (IBSW). Posterbeitrag. Ulm, 28.-29. Sep. 2023
- Stefanie Spörhase, Amiriman Kianfar, Freyja Galina Daragan, Stefan Essmann und Detlev Markus. "Thermal Runaway of Lithium-Ion Batteries in Flameproof Enclosures". In: The 13th Annual Battery Safety Summit. Posterbeitrag. Tysons Corner, 6.-7. Nov. 2023
- Freyja Galina Daragan, Stefanie Spörhase, Amiriman Kianfar, Bernd Limbacher, Alexander Hahn und Stefan Essmann. "Dependence of the Pressure Due to the Thermal Runaway of Lithium-Ion Batteries on the Internal Surface and the Atmosphere within a Flameproof Enclosure". In: 15th International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions (ISHPMIE). Vortrag und Konferenzbeitrag im Tagungsband. Naples, 10.-14. Juni 2024. DOI: 10.5281/zenodo.12621001
- Inka Peschel, Stefanie Spörhase, Amiriman Kianfar, Detlev Markus und Stefan Essmann. "Reproduction of the Pressure Load Due to the Thermal Runaway of an NMC Cell in a Flameproof Enclosure by Gas Explosions". In: 15th International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions (ISHPMIE). Vortrag und Konferenzbeitrag im Tagungsband. Naples, 10.-14. Juni 2024. DOI: 10.5281/zenodo.12621001
- Inka Peschel, Stefanie Spörhase, Amiriman Kianfar, Detlev Markus und Stefan Essmann. "Reproduction of the pressure load due to the thermal runaway in a flameproof enclosure by gas explosions". Zeitschriftenartikel mit Peer-Review. In: *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 94 (Apr. 2025), 105539. ISSN: 0950-4230. DOI: 10.1016/j.jlp.2024.105539

Fachliche Betreuung studentischer Arbeiten:

- Felix Eckhardt. "Empirische Untersuchung zur Reproduzierbarkeit von Messergebnissen bei statischen und dynamischen Überdruckprüfungen". Praxisprojekt. Hochschule Osnabrück, 29. Feb. 2020
- Felix Eckhardt. "Experimentelle Spannungsanalyse an druckfesten Kapselungen". Bachelorarbeit. Hochschule Osnabrück, 13. Jul. 2020
- Tamina Kirklies. Werksstudententätigkeit und Industriefachpraktikum. Technische Universität Braunschweig, 01. Jun. 2020 - 30. Jun. 2022
- Freyja Galina Daragan. "Analyse der Materialbeanspruchung druckfester Kapselungen während des thermal runaways von Lithium-Ionen-Batterien". Studienarbeit. Technische Universität Braunschweig, 28. Jul. 2023
- Freyja Galina Daragan. "Untersuchung verschiedener Einflussfaktoren auf die Materialbeanspruchung von druckfesten Kapselungen infolge des Thermal Runaways von Lithium-Ionen-Batterien". Masterarbeit. Technische Universität Braunschweig, 22. Feb. 2024
- Inka Peschel. "Nachbildung der Auswirkung thermisch durchgehender Lithium-Ionen-Batterien durch Gasexplosionen". Studienarbeit. Technische Universität Braunschweig, 22. Jan. 2024

Fachliche Projektleitung in den durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie im Rahmen des "WIPANO – Wissens- und Technologietransfer durch Patente und Normen"-Programms des Forschungszentrums Jülich geförderten Projekten:

- FV-35044: "Normative Anpassung zur statischen und dynamischen Beanspruchung von Ex „d“- Gehäusen (Druckfeste Kapselung)" (NEXdGEN). 01. Sep. 2018 - 30. Nov. 2020. Projektpartner R. STAHL Schaltgeräte GmbH. Förderkennzeichen 03TNH002A und 03TNH002B
- FV-35054: "Lithium-Ionen-Akkumulatoren in druckfest gekapselten Gehäusen" (LIdeX). 01. Nov. 2021 - 30. Apr. 2024. Projektpartner R. STAHL Schaltgeräte GmbH. Förderkennzeichen 03TN0038A und 03TN0038B

A.3. Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet.

Bei der Auswahl und Auswertung folgenden Materials haben mir bei der Versuchsdurchführung nachstehende aufgeführte Personen unentgeltlich geholfen:

- Amirimán Kianfar^{PTB} (Abschnitte 5.2 und 5.3)
- Bernd Küstner^{R. ST.} (Abschnitt 5.1)
- Falk Marian Brombach^{PTB} (Abschnitt 5.1)
- Felix Eckhardt^{PTB} (Abschnitt 5.1)
- Freyja Galina Daragan^{PTB} (Abschnitte 5.2 und 5.3.1)
- Inka Peschel^{PTB} (Abschnitte 5.3.1 und 5.3.2)

^{PTB} (Ehemalige) Mitarbeiter an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt

^{R. ST.} (Ehemalige) Mitarbeiter bei der Firma R. STAHL Schaltgeräte GmbH

Weitere Personen waren an der inhaltlich-materiellen Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich hierfür nicht die entgeltliche Hilfe von Vermittlungs- bzw. Beratungsdiensten (Promotionsberater oder anderer Personen) in Anspruch genommen. Niemand hat von mir unmittelbar oder mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ich bin darauf hingewiesen worden, dass die Unrichtigkeit der vorstehenden Erklärung als Täuschungsversuch bewertet wird und gemäß § 7 Abs. 10 der Promotionsordnung den Abbruch des Promotionsverfahrens zur Folge hat.

Mir ist die Promotionsordnung der TU Ilmenau bekannt.

Ort, Datum

Unterschrift

A.4. Danksagung

Ich nutze diesen Abschnitt um Danke ♥ zu sagen:

- ♥ Dankeschön an die TU Ilmenau und der PTB für die Betreuung und die Beurteilung dieser Arbeit. Vielen Dank an die Prüfungskommission, bestehend aus den Gutachtern: Herr Prof. Fröhlich, Herr Prof. Zagar und Herr Dr. Detlev Markus. Außerdem den weiteren Mitgliedern: Herrn Prof. Bund, Herr Prof. Bergmann und der Vorsitzenden Frau Prof. Zentner.
- ♥ Herr Prof. Fröhlich für die freundlichen aufbauenden Worte bei jedem Treffen und das vermittelte fröhliche Gefühl, dass man schon alles richtig macht.
- ♥ Meine Vorgesetzten und Mentoren an der PTB Detlev Markus, Tim Krause und Stefan Essmann. Ihr seid vorbildliche, ehrliche Führungspersönlichkeiten, die immer eine passende Lösung parat haben und die richtigen Worte finden. Ich schätze euch sehr.
- ♥ An die Mitarbeiter der Firma R. STAHL insbesondere Otto Walch, Bernd Limbacher und Bernd Küstner. Es war eine angenehme und effektive Zusammenarbeit mit euch. Immer wieder gerne.
- ♥ Forschungszentrum Jülich (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) für die Förderung der Projekte, die in diese Arbeit mit eingeflossen sind.
- ♥ An die fleißigen Mitarbeiter im Ex-Prüfstand, darunter Michael Paul, Marc Shields und Fabian Reitmeier, für die vielen helfenden Hände, Messmittel, Ratschläge und funktionierende Lösungsvorschläge für jede noch so aussichtslose Situation.
- ♥ Falk Marian Brombach, Felix Eckhardt und Tamina Kirklies für die Unterstützung bei allem was gerade anstand. Torben Jennert danke ich für seine Expertise.
- ♥ An den FB 3.7 und die Leute aus der Sicherheitstechnik, bei denen immer eine Tür offen stand: Niels Springer, Jessica Dymke, Jacqueline Höltkemeier-Horstmann, Amiriman Kinafar, Vanessa Heilmann, Thomas Stolz, Arne Krietsch und an alle anderen, die zwischendurch vorbei gekommen sind.
- ♥ Mein Dreamteam aus Amiriman Kianfar, Freyja Galina Daragan und Inka Peschel. Ihr könnt stolz auf das sein, was ihr in der gegebenen Zeit alles geschafft habt. Es war mir eine Freude, mit euch arbeiten zu dürfen. Wetten, dass ihr die Welt verändern könnt, wenn ihr an euch glaubt!?!
Wetten, dass ihr die Welt verändern könnt, wenn ihr an euch glaubt!?!
- ♥ An die ganze AG 3.55 und FB 3.5 für die offene und herzliche Arbeitsatmosphäre mit viel Humor und Hilfsbereitschaft. Denkt bitte an die fehlenden Kekse!
- ♥ Jens Brunzendorf für die vielen Gespräche und fürs einfach ins Büro hereinschneien, um aufbauende Worte da zu lassen. Wenn ich nicht mehr an mich geglaubt hab, hast du es einfach für mich getan.
- ♥ Jacqueline Höltkemeier-Horstmann für die vielen Kummerkastengespräche u. a. über Python mit Keksen und heißer Schokolade.
- ♥ Michael Schneider für die Fertigung von Teilen und die tollen Gespräche.

- ♥ An Sterni und Fussel, die dafür sorgten, dass mein Kopf täglich mit Frischluft durchgepusht wurde. Danke für die beruhigenden Blicke und Nasenstupsen, die den Tellerrand niedriger machten.
- ♥ Herzlichen Dank an meine lieben Familienmitglieder und wunderbaren Freunde, die nie an mir gezweifelt haben, auch wenn mir das Wasser bis zum Halse stand. Ohne euch wäre ich nie soweit gekommen. Mein Erfolg ist auch eurer Verdienst. Dazu gehören vor allem Petra Spörhase, Michael Spörhase, Herbert Spörhase, Thomas Maina und Michele Fahlbusch.
- ♥ An meine fleißigen Korrekturleser des Weiteren Johanna Naumann, Oscar Schulze und Roman Benk. Ohne euch wäre so mancher Fehler unentdeckt und so mancher Hot-Dog ungegessen geblieben.
- ♥ Dem Kanista und den Kanistaranern für die ausgewogene Unterstützung.
- ♥ Vielen Dank auch allen weiteren Wegbegleitern, die mich unterstützt haben, welche hier nicht aufgeführt sind.

Schließlich bleibt mir noch zu sagen:

Hakuna Matata

V. Verzeichnisse

Im folgenden Abschnitt sind verschiedene Verzeichnisse aufgeführt. Zunächst werden die verwendeten Abkürzungen genannt. Anschließend folgt eine Auflistung der gezeigten Abbildungen, Tabellen und Gleichungen mit teilweise gekürzten Betitelungen. Schlussendlich werden die verwendeten Geräte und die Literatur aufgelistet.

V.1. Abkürzungen

Fachliche Akronyme

Beim Plural ist in dieser Arbeit an das Akronym ein „s“ angehängt.

DAZ	Druckanstiegszeit
DMS	Dehnungsmessstreifen
LIB	Lithium-Ionen-Batterie
PP	Drucküberhöhung (engl.: pressure piling)
TR	Thermisches Durchgehen (engl.: thermal runaway)
CH ₄	Methan
C ₂ H ₂	Acetylen bzw. Ethin
C ₂ H ₄	Ethylen bzw. Äthylen oder Ethen
C ₃ H ₈	Propan
H ₂	Wasserstoff
N ₂	Stickstoff
LCO	Lithium-Kobaltoxid (LiCoO ₂)
LFP	Lithium-Eisenphosphat (LiFePO ₄)
LMO	Lithium-Manganoxid (LiMn ₂ O ₄)
NCA	Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminiumoxid (LiNi _x Co _y Al _z O ₂)
NMC	Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid (LiNi _x Mn _y Co _z O ₂)

Weitere Akronyme

Abb.	Abbildung	inkl.	inklusive
bzw.	beziehungsweise	max.	maximal
ggf.	gegebenenfalls	u. a.	unter anderem
i. d. R.	in der Regel	z. B.	zum Beispiel

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Beschreibung
ε	$\mu\text{m}/\text{m}$	Dehnung \exists Index i : <ul style="list-style-type: none"> • $i \in \{a, b, c\} \hat{=} \varepsilon$ eines Einzelgitters eines DMS • $i \in \{1, 2\} \hat{=} \varepsilon$ in Hauptdehnungsrichtung 1 bzw. 2 • $i \in \{\text{max}\} \hat{=} \text{Maximum}$ der ε einer Messposition
$d\varepsilon/dp$	$\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}/\text{bar}$	Druckabhängige Dehnung (Steigung der statischen Geraden) \exists Index $i \hat{=} d\varepsilon/dp \dots$: <ul style="list-style-type: none"> • $i \in \{\text{gelenkig}\} \hat{=} \dots$ eines gelenkig gelagerten Materials • $i \in \{\text{fest}\} \hat{=} \dots$ eines fest eingespanntes Materials
σ	N/m^2	Mechanische Spannung \exists Index $i \hat{=} \text{Maximum}$ von σ eines ... : <ul style="list-style-type: none"> • $i \in \{\text{gelenkig}\} \hat{=} \dots$ gelenkig gelagerten Materials • $i \in \{\text{fest}\} \hat{=} \dots$ fest eingespanntes Materials
A	m^2	Oberfläche
b	m	Breite einer Rechteckplatte
C	Ah	Kapazität
C	A/Ah	C-Rate beim Auf- oder Entladen einer LIB
E	Pa	E-Modul eines Werkstoffes
E_{LIB}	Wh	Energiemenge einer LIB
h	m	Höhe einer Kreisplatte bzw. Wandstärke
K_i	$\text{bar} \cdot \text{m}/\text{s}$	K_i -Wert (volumenbezogenes $(dp/dt)_{\text{ex}}$ bzw. $(dp/dt)_{\text{max}}$): <ul style="list-style-type: none"> • $i \in \{\text{G}\} \hat{=} K_{\text{G}}$-Wert einer Brenngas-Luft-Explosion • $i \in \{\text{LIB}\} \hat{=} K_{\text{LIB}}$-Wert einer LIB beim TR in Luft
n	mol	Stoffmenge
p	bar	Druck \exists Index i : <ul style="list-style-type: none"> • $i \in \{\text{ex}\} \hat{=} \text{Explosionsdruck}$ • $i \in \{\text{max}\} \hat{=} \text{Maximaler Explosionsdruck}$
dp/dt	bar/s	Zeitlicher Druckanstieg \exists Index i : <ul style="list-style-type: none"> • $i \in \{\text{ex}\} \hat{=} \text{Zeitlicher Explosionsdruckanstieg}$ • $i \in \{\text{max}\} \hat{=} \text{Maximaler zeitlicher Explosionsdruckanstieg}$
r	m	Belastungsradius einer Kreisplatte
R	m	Radius einer Kreisplatte
R^2	%	Bestimmtheitsmaß
t	s; h	Zeit
T	$^{\circ}\text{C}; \text{K}$	Temperatur
U	V	Spannung
V	$\text{m}^3; \text{l}$	Volumen \exists Index i : <ul style="list-style-type: none"> • $i \in \{\text{frei}\} \hat{=} \text{Freies } V$ einer druckfesten Kapselung • $i \in \{\text{LIB}\} \hat{=} V$ einer LIB

Einheiten

m	Meter	s	Sekunde
m ²	Quadratmeter	h	Stunde
m ³	Kubikmeter	Hz	Hertz (1 Hz $\hat{=}$ 1/s)
l	Liter	bar	Bar (1 bar $\hat{=}$ 100.000 Pa)
g	Gramm	Pa	Pascal
mol	Mol	N	Newton
°C	Grad Celsius	A	Ampere
K	Kelvin (273,15 K $\hat{=}$ 0 °C)	V	Volt
%	Prozent	W	Watt
Vol.-%	Volumenprozent	J	Joule

Einheitenvorsatzzeichen

da	10 ¹	Deka	d	10 ⁻¹	Dezi
h	10 ²	Hekto	c	10 ⁻²	Zenti
k	10 ³	Kilo	m	10 ⁻³	Milli
M	10 ⁶	Mega	μ	10 ⁻⁶	Mikro
G	10 ⁹	Giga	n	10 ⁻⁹	Nano
T	10 ¹²	Tera	p	10 ⁻¹²	Piko

V.2. Abbildungen

2.1	Explosionsdreieck	3
2.2	Bestimmung von $(dp/dt)_{ex}$ und der DAZ	5
2.3	Prinzip einer druckfesten Kapselung	7
2.4	Aufbau und Prinzip einer LIB	9
2.5	Eigenschaften von LIBs verschiedener Zellchemie	10
2.6	Ursachen für ein TR	12
2.7	Unterschied zwischen einer ausgeprägten und einer nicht ausgeprägten Fließgrenze in einem Spannungs-Dehnungs-Diagramm	16
2.8	Funktionsprinzip eines piezoelektrischen und -resistiven Drucksensors	18
3.1	Zylindrische Einzelkammer	20
3.2	Zylindrisches Zweikammersystem	21
3.3	Druckfeste Kapselung vom Typ 8265	22
3.4	Druckfeste Kapselungen vom Typ 8264	23
3.5	Druckfeste Kapselung vom Typ 8280	24
3.6	DMS-Applikation	25
3.7	Schematischer Aufbau der quasi-statischen Versuche	30

3.8	Thermoelementposition auf einer LIB	31
4.1	Ermittlung der statischen Geraden	38
4.2	Druck-Dehnungsdiagramm eines Versuches mit PP	39
4.3	Bestimmung von $(dp/dt)_{ex}$	41
5.1	Steigungen der statischen Geraden	44
5.2	Druckabhängige Dehnung im Vergleich mit theoretischen Werten . .	44
5.3	Dynamischer Druck-Dehnungsverlauf	46
5.4	Normierte Fouriertransformierte des Druckverlaufs aus Abb. 5.3 . .	46
5.5	Literaturvergleich der Explosionsdrücke und der K_G -Werte von dynamischen Versuchen	46
5.6	Druck-Dehnungsdiagramme der statischen und dynamischen Versuche	47
5.7	Zeitlicher Temperatur- und Druckverlauf des TR	50
5.8	Druckabhängige Dehnung der quasi-statischen Versuche	51
5.9	TR einer LFP-Zelle	53
5.10	Explosionsdruck über $(dp/dt)_{ex}$ verschiedener Zellchemien normiert auf die Energiemenge	54
5.11	Druckbelastung von NMC-Zellen mit unterschiedlichen Energiemengen	55
5.12	Abhängigkeit des Explosionsdruckes pro Energiemenge von der Geometrie der druckfesten Kapselung	57
5.13	Abhängigkeit $(dp/dt)_{ex}$ pro Energiemenge von der Geometrie der druckfesten Kapselung	60
5.14	$(dp/dt)_{ex}$ über dem Explosionsdruck in unterschiedlichen Gasgemischzusammensetzungen mit und ohne thermisch durchgehender NMC811-Zelle	62
5.15	$(dp/dt)_{ex}$ und der Explosionsdruck von den quasi-statischen Versuchen und dynamischen Versuchen zur Nachbildung	64
5.16	Explosionsdrücke und K_G -Werte von dynamischen Versuchen in unterschiedlichen druckfesten Kapselungen	67
A.1	Explosionsdrücke der dynamischen Versuche mit PP mit unterschiedlich beschleunigungsempfindlichen Drucksensoren . . .	X
A.2	Explosionsdrücke und $(dp/dt)_{ex}$ normiert auf die Energiemenge bei unterschiedliche Methoden um das TR hervorzurufen	XI

V.3. Tabellen

2.1	Einige sicherheitstechnische Kennzahlen von Brenngas-Luft-Gemischen aus der Norm IEC 60079-1	4
-----	---	---

3.1	Übersicht über alle verwendeten LIBs	32
3.2	Eigenschaften der druckfesten Kapselungen der quasi-statischen Versuche nach Typen mit variabler Gehäusegeometrie	34
5.1	Kameraaufnahmen vom TR in N ₂	59
A.1	Messdaten zu Abschnitt 5.1.1 „Statische Belastung“	I
A.2	Messdaten zu Abschnitt 5.1.2 „Dynamische Belastung“ mit Aluminium	II
A.3	Messdaten zu Abschnitt 5.1.2 „Dynamische Belastung“ mit Baustahl	II
A.4	Messdaten zu Abschnitt 5.2.1 „Zellchemie“	III
A.5	Messdaten zu Abschnitt 5.2.2 „Kapazitäten“	IV
A.6	Messdaten zu Abschnitt 5.2.3 „Gehäusegeometrie und Inertatmosphäre“ in N ₂	V
A.7	Messdaten zu Abschnitt 5.2.3 „Gehäusegeometrie und Inertatmosphäre“ in Luft mit Aluminiumdeckel	V
A.8	Messdaten zu Abschnitt 5.2.3 „Gehäusegeometrie und Inertatmosphäre“ in Luft	VI
A.9	Literaturdaten zu Abschnitt 5.2.3 „Gehäusegeometrie und Inertatmosphäre“	VII
A.10	Temperaturmessdaten zu Abschnitt 5.3.2 „Nachbildung der quasi-statischen Belastung“	VII
A.11	Messdaten zu Abschnitt 5.3.1 „Explosionsfähige Atmosphären“	VIII
A.12	Druckmessdaten zu Abschnitt 5.3.2 „Nachbildung der quasi-statischen Belastung“	IX

V.4. Gleichungen

2.1.	Kubisches Gesetz	6
2.2.	Ideales Gasgesetz	7
2.3.	Energiemenge einer LIB	9
2.4.	Regressionen nach der Literatur für den Druckverlauf einer thermisch durchgehenden NMC811-Zelle	13
2.5.	Hookesches Gesetz	15
2.6.	Theoretische max. Spannung in der Mitte einer Kreisplatte	16
2.7.	Theoretische max. Spannung in der Mitte einer Rechteckplatte	16
2.8.	Ermittlung Hauptdehnungsrichtungen und max. Dehnung	17
2.9.	Max. Dehnung nach der Normalspannungshypothese	17
3.1.	Unsicherheiten der Einzeldehnungen	25
4.1.	Theoretische Grenzen der druckabhängigen Dehnung einer Kreisplatte	40

4.2. Theoretische Grenzen der druckabhängigen Dehnung einer Rechteckplatte	40
5.1. Regression der Literatur- und Messdaten vom max. Druck pro Energiemenge über innere Oberfläche	58

V.5. Geräte

Druckfeste Kapselungen:

- (G-1) Rohr: Material 1.4306, Länge 25 cm, Wandstärke 3,4 mm, Ø 168,3 mm, Flansch: DN 150, PN 16 nach EN 1092-1/11
- (G-2) R. STAHL Schaltgeräte GmbH, Typ 8265/.6-001, Material (G-42), Deckeldurchmesser 41 cm, Höhe 28,1 cm, Wandstärke 2,2 cm
- (G-3) R. STAHL Schaltgeräte GmbH, Typ 8264/-323-2, Material (G-43), Außenmaße 48 cm x 36 cm x 34 cm, Wandstärke 1,2 cm
- (G-4) wie (G-3) nur Typ 8264/-998-3, Material (G-42), Außenmaße 73 cm x 73 cm x 58,7 cm, Wandstärke 3 cm
- (G-5) R. STAHL Schaltgeräte GmbH, Typ 8280/20, Material Edelstahl, Außenmaße 30 cm x 40 cm x 20 cm

Lithium-Ionen-Batterien:

- (G-6) LCO: Samsung ICR18650-26J, 2,55 Ah, Ladeschlussspannung 4,2 V
- (G-7) NCA: Samsung INR18650-30Q, 3 Ah, Ladeschlussspannung 4,2 V
- (G-8) LFP: Cottcell IFR26650, 3 Ah, Ladeschlussspannung 3,65 V
- (G-9) NMC: Samsung ICR18650-22F, 2,2 Ah, Ladeschlussspannung 4,2 V
- (G-10) NMC811 [76]: LG Chem 18650HG2, 3 Ah, Ladeschlussspannung 4,2 V
- (G-11) NMC811 [33]: LG Chem INR18650-MJ1, 3,5 Ah, Ladeschlussspannung 4,2 V
- (G-12) NMC811 [77]: LG Chem INR21700-M50T, 5 Ah, Ladeschlussspannung 4,25 V

Mess-, Steuer- und Regelinstrumente:

- (G-13) Messsystem: Hottinger Brüel & Kjaer GmbH (ehemals HBM), Messverstärker, QuantumX MX1615B
- (G-14) DMS-Rosetten: Hottinger Brüel & Kjaer GmbH (ehemals HBM), Gekreuzt: Typ RY91-6/120, Planar: Typ RY81-6/120
- (G-15) DMS-Rosetten: Hottinger Brüel & Kjaer GmbH (ehemals HBM), Gekreuzt: Typ RY91-3/120, Planar: Typ RY81-3/120
- (G-16) Brückenköpfe: Yokogawa, Model 701955
- (G-17) Oszilloskop: Yokogawa, Scope Corder, Typ DL850
- (G-18) Dehnungsmesskarte: Yokogawa, Strain NDIS, Typ 701270
- (G-19) Druckmesskarte: Yokogawa, HS10M12, Typ 701250

- (G-20) Piezoresistiver Drucksensor: Kistler, statische Versuche Typ 4045 A100, quasi-statische Versuche Typ 4045 A10
- (G-21) Piezoresistiver Verstärker: Kistler, Typ 4603
- (G-22) Piezoresistiver Drucksensor: HBM, Typ P8AP
- (G-23) Piezoelektrischer Drucksensor: Kistler, Typ 601CAA
- (G-24) Piezoelektrischer Drucksensor: Kistler, Typ 6031
- (G-25) Piezoelektrischer Verstärker: Kistler, Typ 5015, 4167A, 5165A oder 5167
- (G-26) Thermoelement: RS Components GmbH, Type K 1/0,711 mm High Temperature Glassfibre Twin Twisted Fibreglass Thermocouple Cable / Wire (ANSI)
- (G-27) Multiplexer: Keysight Technologies/Agilent, Typ 34970A Data Acquisition/Switch Unit Family inkl. 20-Kanal Multiplexer 34901A
- (G-28) Potentiostat/Galvanostat: Gamry, Reference 3000
- (G-29) Massendurchflussregler: Bronkhorst High-Tech BV, EL-FLOW Select F-112AC
- (G-30) Sauerstoffanalysator: Servotough OxyExact Transmitter 2223
- (G-31) Keramikheizer: Paul Rauschert Steinbach GmbH, HTH-Zünder, 878614800
- (G-32) Metallheizer: Paul Rauschert Steinbach GmbH, Metallflachheizer MFH14
- (G-33) Netzgerät: Manson Engineering Industrial Ltd, HCS-3200-000G
- (G-34) Kamera: GoPro Hero 11, 239,76 Bilder/Sekunde
- (G-35) Heizpatrone: Bach Resistor Cermaics GmbH, FLE 100 576
- (G-36) Heizplatte: HALJIA kabelgebundene Mini-MCH-Heizplatte aus Metall und Keramik, 10 mm x 10 mm, 2-14 V, R=5, B076HGN7ZH

Materialien:

- (G-37) Aluminium: AW6082, E-Modul 69 GPa, Dehngrenze 240 N/mm²
- (G-38) Baustahl: 1.0038, E-Modul 212 GPa, Streckgrenze 225 N/mm²
- (G-39) Edelstahl: 1.4462, E-Modul 200 GPa, Streckgrenze 450 N/mm²
- (G-40) Kalt aushärtender Schnellklebstoff z. B. Z70 von HBM
- (G-41) Metallgitter: R. STAHL Schaltgeräte GmbH, Material Edelstahl
- (G-42) Aluminium kupferfrei: AlSi7Mg0.3, E-Modul 69-75 GPa, Dehngrenze 190-280 N/mm²
- (G-43) Edelstahl bzw. Austenit: X2CrNiMo17-12-2, E-Modul 200 GPa, Streckgrenze ≥ 200 N/mm²

V.6. Literatur

- [1] World Economic Forum. *A Vision for a Sustainable Battery Value Chain in 2030: Unlocking the Full Potential to Power Sustainable Development and Climate Change Mitigation*. Sep. 2019.

- [2] Henrikus Steen und Eberhard Behrend, Hrsg. *Handbuch des Explosionsschutzes*. Weinheim New York: Wiley-VCH, 2000. ISBN: 978-3-527-29848-8.
- [3] IEC 60079-0: *Explosive Atmospheres - Part 0: Equipment - General Requirements*. Norm. Version 2017-12, Edition 7.0. 2017.
- [4] IEC 60079-1: *Explosive Atmospheres - Part 1: Equipment Protection by Flameproof Enclosures "d"*. Norm. Version 2014-06, Edition 7.0. Juni 2014.
- [5] Reiner Korthauer, Hrsg. *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*. Springer Vieweg, 2013. ISBN: 978-3-642-30653-2.
- [6] Giuseppe Terzaghi. *Subject: Critical Safety Alert for Use of Lithium Battery in Ex Applications*. Bericht. 2020.
- [7] Dan Doughty und E. Peter Roth. "A General Discussion of Li Ion Battery Safety". In: *The Electrochemical Society Interface* 21.2 (2012). Hrsg. von The Electrochemical Society, S. 37. DOI: 10.1149/2.F03122if.
- [8] Fredrik Larsson. "Lithium-Ion Battery Safety - Assessment by Abuse Testing, Fluoride Gas Emissions and Fire Propagation". Diss. Göteborg: Chalmers University of Technology, Sep. 2017.
- [9] Sascha Bruns und Dinse Marc. "Brandschutz im Umgang mit gebrauchten Lithium-Ionen-Batterien im Recyclingbetrieb". In: *Recycling und Rohstoffe. Band 11*. Neuruppin: TK Thomé-Kozmiensky Verlag, 2018. ISBN: 978-3-944310-40-4.
- [10] Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) und Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM). *Recommended Safety Characteristics of Flammable Gases and Gas Mixtures*. Chemsafe. Juli 2022. URL: www.chemsafe.ptb.de/ (besucht am 26.07.2023).
- [11] Thomas H. Dubaniewicz, Teresa L. Barone, Connor B. Brown und Richard A. Thomas. "Comparison of Thermal Runaway Pressures within Sealed Enclosures for Nickel Manganese Cobalt and Iron Phosphate Cathode Lithium-Ion Cells". In: *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 76 (Mai 2022), S. 104739. ISSN: 09504230. DOI: 10.1016/j.jlp.2022.104739.
- [12] Physikalisch-Technische Bundesanstalt. *Der Explosionsschutz*. Unter Mitarb. von Martin Thedens. Grundprinzipien des Explosionsschutzes. URL: www.ptb.de/cms/ptb/fachabteilungen/abt3/exschutz/exgrundlagen/grundprinzipien-des-explosionsschutzes.html (besucht am 18.03.2024).
- [13] Wolfgang Bartknecht. *Explosionen: Ablauf und Schutzmaßnahmen*. 2. Auflage. Berlin: Springer, 2013. ISBN: 978-3-662-07158-8.
- [14] Torsten Schmiermund. *Das Chemiewissen für die Feuerwehr*. Springer Spektrum, 2019. ISBN: 978-3-662-56606-0.
- [15] D. Razus, V. Brinzea, M. Mitu, C. Movileanu und D. Oancea. "Temperature and Pressure Influence on Maximum Rates of Pressure Rise during Explosions of Propane-Air Mixtures in a Spherical Vessel". In: *Journal of Hazardous Materials*

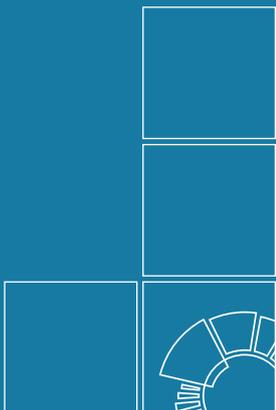
- 190.1-3 (Juni 2011), S. 891–896. ISSN: 03043894. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2011.04.018.
- [16] Stefanie Spörhase, Falk Marian Brombach, Felix Eckhardt, Tim Krause, Detlev Markus, Bernd Küstner und Otto Walch. “Untersuchungen zur Vergleichbarkeit der statischen und dynamischen Überdruckprüfung von druckfesten Kapselungen”. In: *Forschung im Ingenieurwesen* (16. Dez. 2022). DOI: 10.1007/s10010-022-00604-z.
- [17] Qi Zhang, Qiuju Ma und Bo Zhang. “Approach Determining Maximum Rate of Pressure Rise for Dust Explosion”. In: *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 29 (Mai 2014), S. 8–12. ISSN: 09504230. DOI: 10.1016/j.jlp.2013.12.002.
- [18] W. Hirsch und E. Brandes. *Sicherheitstechnische Kenngrößen bei nichtatmosphärischen Bedingungen - Gase und Dämpfe*. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben. Braunschweig: Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 2014.
- [19] Dag Bjerketvedt, Jan Roar Bakke und Kees Van Wingerden. “Gas Explosion Handbook”. In: *Journal of Hazardous Materials* 52.1 (Jan. 1997), S. 1–150. ISSN: 03043894. DOI: 10.1016/S0304-3894(97)81620-2.
- [20] Tim Krause. “Dynamische Messung von sicherheitstechnisch relevanten Explosionsdrücken”. Diss. Technische Universität Ilmenau, März 2023.
- [21] Physikalisch-Technische Bundesanstalt. *Druckfeste Kapselung*. Unter Mitarb. von Martin Thedens. Druckfeste Kapselung. URL: www.ptb.de/cms/ptb/fachabteilungen/abt3/exschutz/ex-grundlagen/zuendschutz0/gasexplosionsschutz-elektrische-geraete/druckfeste-kapselung-ex-d.html (besucht am 14.03.2024).
- [22] Wolfgang Demtröder. *Experimentalphysik. 1: Mechanik und Wärme*. 5. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer, 2008. ISBN: 978-3-540-79295-6.
- [23] Gerd Wedler und Hans-Joachim Freund. “Einführung in die physikalisch-chemischen Betrachtungsweisen, Grundbegriffe und Arbeitstechniken”. In: *Lehr- und Arbeitsbuch physikalische Chemie*. 7. Auflage. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2018. ISBN: 978-3-527-34611-0.
- [24] *DIN EN 14994: Schutzsysteme zur Druckentlastung von Gasexplosionen*. Norm. Version Deutsche Fassung EN 14994:2007. 2007.
- [25] Julia K Hornig. “Permeable Werkstoffe zur zünddurchschlagsicheren Explosionsdruckentlastung – Gestaltung und Anwendungsmöglichkeiten”. Diss. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 27. Nov. 2012.
- [26] R. STAHL AG. *EXpressure Ex d-Schaltschranke*. Explosionsschutz neu erfunden! 2024. URL: www.r-stahl.com/de/global/branchen/innovationen/expressure-ex-d-schaltschraenke/ (besucht am 07.02.2024).

- [27] Mordor Intelligence. *Lithium-Analyse der Marktgröße und des Anteils von Ionenbatterien - Branchenforschungsbericht - Wachstumstrends*. Industry Reports. Mordor Intelligence Research & Advisory, Sep. 2023.
- [28] Ehsan Rahimzei, Kerstin Sann und Moritz Vogel. *Kompodium: Li-Ionen-Batterien: Grundlagen, Bewertungskriterien, Gesetze und Normen*. VDE Verband der Elektrotechnik, Juli 2015.
- [29] Sophia Gantenbein. *Impedanzbasierte Modellierung von Lithium-Ionen Zellen und deren Degradationsverhalten*. Schriften des Instituts für Angewandte Materialien - Werkstoffe der Elektrotechnik, Karlsruher Institut für Technologie Band 39. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2019. ISBN: 978-3-7315-0987-5.
- [30] Dieter Meschede, Hrsg. *Gerthsen Physik*. 23. Auflage. Springer-Lehrbuch. Berlin Heidelberg: Springer, 2006. ISBN: 978-3-540-25421-8.
- [31] Charles E. Mortimer und Ulrich Müller, Hrsg. *Chemie*. 10. Aufl. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2010, b-002-54081. ISBN: 978-3-13-484310-1 978-3-13-193510-6. DOI: 10.1055/b-002-54081.
- [32] Gaizka Saldaña, José Martín, Isay Zamora, Francisco Asensio und Oier Oñederra. "Analysis of the Current Electric Battery Models for Electric Vehicle Simulation". In: *Energies* 12 (18. Juli 2019), S. 2750. DOI: 10.3390/en12142750.
- [33] T. M. M. Heenan, A. Jnawali, M. D. R. Kok, T. G. Tranter, C. Tan, A. Dimitrijevic, R. Jervis u. a. "An Advanced Microstructural and Electrochemical Datasheet on 18650 Li-Ion Batteries with Nickel-Rich NMC811 Cathodes and Graphite-Silicon Anodes". In: *Journal of The Electrochemical Society* 167.14 (1. Nov. 2020), S. 140530. DOI: 10.1149/1945-7111/abc4c1.
- [34] Vanesa Ruiz und Andreas Pfrang. "JRC Exploratory Research: Safer Li-ion Batteries by Preventing Thermal Propagation". In: *JRC Technical Reports*. Hrsg. von European Commission. Joint Research Centre. Luxemborg: Publications Office, 8.-9. März 2018. ISBN: 978-92-79-96399-5.
- [35] "FOKUS: Brandschutz bei Lithium-Ionen-Batterien". In: *BrandschutzKompakt* 60 (Sep. 2018). Hrsg. von Bundesverband Technischer Brandschutz e.V. (bvfa).
- [36] Stefan Doose, Alexander Hahn, Michael Bredekamp, Wolfgang Haselrieder und Arno Kwade. "Scaling Methodology to Describe the Capacity Dependent Responses During Thermal Runaway of Lithium-Ion Batteries". In: *Batteries & Supercaps* 5.7 (Juli 2022). ISSN: 2566-6223, 2566-6223. DOI: 10.1002/batt.202200060.
- [37] Xuning Feng, Minggao Ouyang, Xiang Liu, Languang Lu, Yong Xia und Xiangming He. "Thermal Runaway Mechanism of Lithium Ion Battery for Electric Vehicles: A Review". In: *Energy Storage Materials* 10 (1. Jan. 2018), S. 246-267. ISSN: 2405-8297. DOI: 10.1016/j.ensm.2017.05.013.
- [38] C. Essl, A. W. Golubkov und A. Fuchs. "Comparing Different Thermal Runaway Triggers for Two Automotive Lithium-Ion Battery Cell Types". In:

- Journal of The Electrochemical Society* 167.13 (1. Okt. 2020), S. 130542. ISSN: 0013-4651, 1945-7111. DOI: 10.1149/1945-7111/abbe5a.
- [39] Tim Rappsilber, Nawar Yusfi, Simone Krüger, Sarah-Katharina Hahn, Tim-Patrick Fellingner, Jonas Krug Von Nidda und Rico Tschirschwitz. "Meta-Analysis of Heat Release and Smoke Gas Emission during Thermal Runaway of Lithium-Ion Batteries". In: *Journal of Energy Storage* 60 (Apr. 2023), S. 106579. ISSN: 2352152X. DOI: 10.1016/j.est.2022.106579.
- [40] Richard J. Meier und Patrick M. Kennedy. *Lithium Ion Batteries More Dangerous or Just More Common?* 2019.
- [41] Japan Transport Safety Board. *Aircraft Serious Incident Investigation Report: Emergency Evaluation Using Slides All Nippon Airways Co., LTD. Boeing 787-8, JA804A Takamatsu Airport at 08:49 Jst, January 16, 2013.* AI2014-4. Japan, Sep. 2014.
- [42] Douglas Lee. *High Energy Density Batteries.* Status Report on High Energy Density Batteries Project. Rockville: Consumer Product Safety Commission, Feb. 2018.
- [43] Andrew Weichel. *Lithium Ion Batteries Blamed for 2 SRO Fires in Vancouver.* CTVNewsVancouver. 12. Aug. 2022. URL: www.bc.ctvnews.ca/lithium-ion-batteries-blamed-for-2-sro-fires-in-vancouver-1.6024231 (besucht am 06.02.2024).
- [44] Huaibin Wang, Hui Xu, Zelin Zhang, Qinzhen Wang, Changyong Jin, Changjun Wu, Chengshan Xu u. a. "Fire and Explosion Characteristics of Vent Gas from Lithium-Ion Batteries after Thermal Runaway: A Comparative Study". In: *eTransportation* 13 (Aug. 2022), S. 100190. ISSN: 25901168. DOI: 10.1016/j.etrans.2022.100190.
- [45] Thomas H. Dubaniewicz. *RE: Details Regarding the Experimental Setup.* E-mail. 13. Sep. 2023.
- [46] Michael Mürken und FAST Institut für Fahrzeugtechnik. "Methode zur Bewertung der Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung in der automobilen Vorentwicklung". In: *Kallsruher Scheitschriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik* 109 (März 2023). ISSN: 1869-6058. DOI: 10.5445/KSP/1000158067.
- [47] Antonio García, Javier Monsalve-Serrano, Rafael Lago Sari und Santiago Martinez-Boggio. "Influence of Environmental Conditions in the Battery Thermal Runaway Process of Different Chemistries: Thermodynamic and Optical Assessment". In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 184 (März 2022), S. 122381. ISSN: 00179310. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122381.

- [48] Herbert Wittel, Dieter Jannasch, Joachim Voßiek und Christian Spura. *Roloff/Matek Maschinenelemente*. 24. Auflage. Springer Vieweg, 2019. 346 S. ISBN: 978-3-658-26280-8 978-3-658-26279-2.
- [49] Ralf Bürgel, Hans Albert Richard und Andre Riemer. *Werkstoffmechanik: Bauteile sicher beurteilen und Werkstoffe richtig einsetzen*. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014. 235 S. ISBN: 978-3-658-03934-9. DOI: 10.1007/978-3-658-03935-6.
- [50] Volker Läßle. *Einführung in die Festigkeitslehre*. 4. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016. ISBN: 978-3-658-10611-9.
- [51] Stefan Keil. *Dehnungsmessstreifen*. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017. ISBN: 978-3-658-13612-3.
- [52] Armin Krabiell und Winfried Dahl. "Zum Einfluss von Temperatur und Dehngeschwindigkeit auf die Streckgrenze von Baustählen unterschiedlicher Festigkeit". In: *Archiv für das Eisenhüttenwesen* 52.11 (1981), S. 429–436.
- [53] Karl-Heinrich Grote, Beate Bender und Dietmar Göhlich, Hrsg. *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*. 25. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2018. ISBN: 978-3-662-54805-9.
- [54] Anja Streit. "Finite Elemente Approximation der Plattengleichung mit web-Splines". Diplomarbeit. Universität Stuttgart, Sep. 2002.
- [55] Micro-Measurements. *DMS-Rosetten*. Tech Note TN-515 10528. 11. Mai 2010.
- [56] Rolf Mahnken. *Lehrbuch der Technischen Mechanik - Elastostatik: Mit einer Einführung in Hybridstrukturen*. Springer Vieweg, 2015. ISBN: 978-3-662-44798-7.
- [57] K. H. Martini und B. Bill. "Piezoelektrische und piezoresistive Druckmeßverfahren". In: K.W. Bonfig. *Technische Druck- und Kraftmessung*. 20.140d 10.91. Ehningen: expert verlag, 1988, S. 46–90.
- [58] J. Tichý und G. Gautschi. *Piezoelektrische Meßtechnik: physikalische Grundlagen, Kraft-, Druck- und Beschleunigungsaufnehmer, Verstärker*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1980. ISBN: 3-540-09448-2.
- [59] R. Löper und H. Wehinger. *PTB-Bericht-17: Kristische Untersuchung von Druckmeßverfahren für die Prüfung explosionsgeschützter elektrischer Betriebsmittel*. PTB-W-17. Braunschweig: Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Sep. 1981.
- [60] Reinhard Klemm. *Thermoelemente in der industriellen Praxis*. RÖSSEL-Messtechnik GmbH, März 2009.
- [61] Tim Krause und Detlev Markus. "Herausforderungen bei der dynamischen Messung von Explosionsdrücken". In: *tm - Technisches Messen* 84.2 (28. Feb. 2017). Hrsg. von Oldenbourg Wissenschaftsverlag, S. 101–110. DOI: 10.1515/teme-2016-0051.
- [62] Stefanie Spörhase, Falk Marian Brombach, Tim Krause, Detlev Markus und Otto Walch. "Untersuchung der Einflussparameter auf die Materialbeanspruchung von Ex „d“-Gehäusen". In: 14. Fachtagung

- Anlagen-, Arbeits- und Umweltsicherheit. Vortrag und Konferenzbeitrag im Tagungsband. Köthen: DECHEMA VDI, 7.–8. Nov. 2019.
- [63] Annika Stein. “Versuchsaufbau Kurzschlussversuche”. Vortrag. 23. Sep. 2021.
- [64] Bernd Limbacher. *Volumen Typ 8264/-323-2*. Unter Mitarb. von Freyja Galina Daragan. E-mail. 4. Juli 2023.
- [65] Freyja Galina Daragan. “Untersuchung verschiedener Einflussfaktoren auf die Materialbeanspruchung von druckfesten Kapselungen infolge des Thermal Runaways von Lithium-Ionen-Batterien”. Masterarbeit. Technische Universität Braunschweig, 2024.
- [66] Bernd Limbacher. *Volumen 8264/-998-3*. E-mail. 21. Dez. 2023.
- [67] R. STAHL Schaltgeräte GmbH. Unter Mitarb. von Bernd Limbacher. 2023.
- [68] Bernd Limbacher. *Volumen Typ 8280/20*. Unter Mitarb. von Freyja Galina Daragan. E-mail. 5. Juli 2023.
- [69] Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH. “Grundlagen der DMS-Installation und DMS-Messtechnik”. Präsenzschiulung (Darmstadt). Sep. 2018.
- [70] Hottinger Brüel & Kjaer GmbH. *Tipps Für Die Experimentelle Spannungsanalyse*. 2023. URL: www.hbm.com/de/6021/tipps-fuer-die-experimentelle-spannungsanalyse/ (besucht am 26.10.2023).
- [71] Marc Shields und Freyja Galina Daragan. *Unsicherheit der Durchflussregler*. E-mail. 30. Jan. 2024.
- [72] Inka Peschel. “Nachbildung der Auswirkung thermisch durchgehender Lithium-Ionen-Batterien durch Gasexplosionen”. Studienarbeit. Technische Universität Braunschweig, Jan. 2024.
- [73] Testo Industrial Services GmbH. *Messunsicherheitsfibel - Praxisgerechte Bestimmung von Messunsicherheiten nach GUM (bei Kalibrierungen)*. Aug. 2013.
- [74] Peter-Wolfgang Gräbe. “Automatisierungstechnik in der Wasserwirtschaft -Kapitel 6: Messfehler”. Vorlesung. TU Dresden, 2009.
- [75] Christian Drame. “Ausbreitung von Deflagrationen in geschlossenen langen Rohrleitungen”. Diss. Universität Duisburg-Essen, 2010.
- [76] Yuliya Preger, Heather M. Barkholtz, Armando Fresquez, Daniel L. Campbell, Benjamin W. Juba, Jessica Romàn-Kustas, Summer R. Ferreira u. a. “Degradation of Commercial Lithium-Ion Cells as a Function of Chemistry and Cycling Conditions”. In: *Journal of The Electrochemical Society* 167.12 (9. Jan. 2020), S. 120532. DOI: 10.1149/1945-7111/abae37.
- [77] Shen Li, Niall Kirkaldy, Cheng Zhang, Krishnakumar Gopalakrishnan, Tazdin Amietszajew, Laura Bravo Diaz, Jorge Varela Barreras u. a. “Optimal Cell Tab Design and Cooling Strategy for Cylindrical Lithium-Ion Batteries”. In: *Journal of Power Sources* 492 (Apr. 2021), S. 229594. ISSN: 03787753. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2021.229594.



Herausgeber:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

ISNI: 0000 0001 2186 1887

Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Bundesallee 100

38116 Braunschweig

Telefon: (05 31) 592-93 21

Telefax: (05 31) 592-92 92

www.ptb.de