

Technische Universität Graz
Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften
Institut für Fahrzeugsicherheit
[FSI Frank Stronach Institute]



Simon Franz Heindl

Entwicklung eines makroskopischen Finite Elemente Modells einer 18650 Li-Ionen Zelle für Crashbelastungen

Diplomarbeit zur Erlangung des akademische Grades *Diplomingenieur* in der
Studienrichtung *Maschinenbau Verkehrstechnik*

Institutsvorstand Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hermann Steffan
Betreuer Dipl.-Ing. Dr.techn. Wolfgang Sinz
Dipl.-Ing. Christian Ellersdorfer

Graz, im Oktober 2013



Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, den 30. August 2013

Simon Franz Heindl

Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008
Genehmigung des Senates am 1.12.2008

Danksagung

Ich bedanke mich an dieser Stelle bei meinen Betreuern Dipl.-Ing. Dr.techn. Wolfgang Sinz und vor allem Dipl.-Ing. Christian Ellersdorfer für die vielen Hilfestellungen, Ratschläge und die Unterstützung vor und während der Durchführung meiner Diplomarbeit. Ebenso möchte ich mich bei Dipl.-Ing. Dr.techn. Florian Feist bedanken, der stets bereit war, mir bei Fragen bezüglich der Entwicklung des Simulationsmodells behilflich zu sein.

Für die Möglichkeit, meine Diplomarbeit am Institut für Fahrzeugsicherheit zu erstellen, danke ich Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hermann Steffan. Weiters danke ich allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern am Institut für Fahrzeugsicherheit für das äußerst angenehme Arbeitsklima.

Genauso gilt mein Dank der Firma KTM-Sportmotorcycle AG, im Speziellen Dipl.-Ing. Arno Ebner, Dipl.-Ing. (FH) Roland Rabenhaupt und Nina Deitermann, BEng. Die Zusammenarbeit gestaltete sich stets professionell und doch freundschaftlich. In diesem Zuge möchte ich mich auch für die, in gleichen Maßen kurzweiligen wie anstrengenden, Probefahrten mit der „Freeride E“ auf eurer Teststrecke bedanken.

Besonderer Dank gilt Christian, Wolfgang, Silke und Stefan für das Korrekturlesen meiner Arbeit.

Nicht zuletzt möchte ich die Gelegenheit nutzen, mich bei meinen Eltern herzlich zu bedanken. Sie haben mir dieses Studium ermöglicht und mich dabei in jeder Weise und zu jeder Zeit voll unterstützt.

Danke euch allen!

Kurzfassung

Seit dem Einsetzen der industriellen Revolution zu Beginn des vorletzten Jahrhunderts nimmt der Mensch in zunehmendem Maße Einfluss auf die Entwicklung des globalen Klimas. Großen Anteil daran tragen der weltweite Verbrauch fossiler Brennstoffe und die dadurch hervorgerufene Emission klimaschädlicher Gase. Etwa ein Viertel dieser anthropogenen Treibhausgasproduktion kann dem Bereich Transport zugeschrieben werden [1]. Um diesem bedenklichen Trend entgegen zu wirken und die Mobilität in Zukunft nachhaltig(er) zu gestalten, werden auch von der Automobilbranche große Anstrengungen unternommen. Die Elektrifizierung des Antriebsstranges scheint derzeit in diesem Zusammenhang ein Mittel zu sein, wobei der Lithium-Ionen-Technologie für die elektrische Energiespeicherung das größte Potenzial zugesprochen wird. Obwohl Akkumulatoren dieser Art seit etwa zwei Jahrzehnten in der Gebrauchs- bzw. Unterhaltungselektronik Verwendung finden, ist deren Einsatz als Traktionsbatterie noch relativ neuartig. Besonders der hohe massenspezifische Energieinhalt macht diese Technologie für die Fahrzeugindustrie interessant, birgt jedoch auch ein entsprechendes Risiko. Spezielle Beachtung ist der Crashesicherheit zu schenken, wofür ein umfassendes Verständnis über das Verhalten der Batteriezellen im Schadensfall notwendig ist. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung eines Simulationsmodells zur realistischen Nachstellung des Verhaltens der Zellen, welche im Energiespeicher eines vollelektrischen Vorserienfahrzeuges der KTM-Sportmotorcycle AG verbaut sind. Zur Schaffung einer Vergleichsgrundlage wurden repräsentative Lastfälle definiert, welche in umfangreichen Versuchsreihen nachgestellt wurden. Darauffolgend wurde der konstruktive Aufbau der Zelle in ein Finite-Elemente-Modell übertragen, das anschließend anhand der Versuchsergebnisse auf das reale Verhalten abgestimmt wurde. Mithilfe der zuvor erarbeiteten, umfassenden Basis an Versuchsdaten und Messwerten konnte die gegenseitige Beeinflussung von mechanischem und elektrischem Verhalten der Batteriezelle erörtert werden. Dies diente der Identifikation eines charakteristischen Kriteriums, welches dem Modell die Vorhersage des Versagens der Zelle erlaubt. Das Ergebnis dieser Arbeit - ein prognosefähiges Simulationsmodell einer Lithium-Ionen-Zelle - könnte als Grundlage für ein virtuelles Batteriemodul dienen, welches wiederum in ein übergeordnetes Fahrzeugmodell integriert werden kann. Auf diese Weise könnten sicherheitsrelevante Fragen von zukünftigen E-Fahrzeugen virtuell abgeschätzt werden.

Abstract

Since the onset of the Industrial Revolution at the beginning of the 19th century mankind has had a notably impact on the change of global climate. In large part this is due to the excessive consumption of fossile fuel and as a consequence the production of climate-wrecking gases. Approximately one quarter of this anthropogenic emission of greenhouse gases can be ascribed to transportation and traffic. To counteract those negative trends and to enable environmentally sustainable mobility in future the automotive branch steps up efforts. The method of choice seems to be the electrification of the drive train with Lithium-ion cells acting as the basic technology. Although that kind of battery has been used in consumer electronics for virtually two decades, its deployment in battery packs for electric vehicles is relatively new. Its high energy content makes this technology particularly interesting for OEMs but as well implies a certain risk. A sound knowledge about the behaviour of those cells, especially when damaged, is important not only in case of a crash but also during the process of development. Within the work on this thesis a simulation model of the cells, installed into the energy storage of an all-electric offroad motorcycle prototype from Austrian manufacturer KTM-Sportmotorcycle AG, has been developed. Load cases have been defined and verified through a series of experiments to build up a profound basis of comparison. Thereafter the constructive design of the cell has been transferred into a finite element model which in turn was rechecked and matched to the data gathered from the tests. Besides reproducing realistic mechanical behaviour the model is capable of predicting possible short circuit situations. For this, the interdependency between mechanical and electrical characteristics of the cell has been analyzed. After that a criterion has been identified which enables the computer program to indicate cell failure. The resulting simulation model can be the base for an enhanced battery pack model and can furthermore be implemented into a simulation of a virtual vehicle. This approach can be utilized to estimate the behaviour of future electric vehicles and can help to predefine boundary conditions for not yet realized test facilities.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Hintergrund	1
1.1.1	Soziologische Aspekte	2
1.1.2	Wirtschaftliche Aspekte	2
1.1.3	Technische Aspekte	3
1.2	Aufgabenstellung und Ziele	4
1.3	Vorteile durch ein virtuelles Modell	7
2	Stand der Technik	8
2.1	Geschichte und Entwicklung elektrochemischer Energiespeicher	8
2.2	Einteilung elektrochemischer Energiespeicher	9
2.3	Lithium-Ionen Akkumulatoren	9
2.3.1	Aufbau von Lithium-Ionen-Zellen	9
2.3.2	Chemie der Lithium-Ionen-Zelle	11
2.4	Elektrische Energiespeicher im Fahrzeugbau	12
2.4.1	Frühe Anwendungen	12
2.4.2	Aktuelle Entwicklungen	12
2.4.3	Elektrofahrzeuge der KTM Sportmotorcycle AG	14
2.5	Gefahrenpotenzial der Li-Ionen-Technologie	15
2.5.1	Chemische Gefahren	15
2.5.2	Thermische Gefahren	17
2.5.3	Elektrische Gefahren	17
2.5.4	Mechanische Gefahren	17
3	Prüfverfahren in Literatur und Norm	18
3.1	Prüfverfahren in Normen	18
3.2	Prüfverfahren in der Fachliteratur	19
3.3	Definition aussagekräftiger Lastfälle	20
3.3.1	Crush in X-Richtung	20
3.3.2	Crush in Z-Richtung	21
3.3.3	Penetration	21
3.3.4	3-Punkt-Biegung	21

4	Versuche als Validierungsgrundlage	23
4.1	Motivation und Zielsetzung	23
4.2	Spezifikation „Panasonic CGR-18650KA“	23
4.3	Vorbereitung der Versuche	26
4.3.1	Sicherheitsvorkehrungen	26
4.3.2	Ladezustand der Prüflinge	26
4.4	Test der Metalcan	28
4.4.1	Konfiguration „Crush in X-Richtung“	29
4.4.2	Konfiguration „Crush in Z-Richtung“	30
4.4.3	Konfiguration „Penetration“	31
4.5	Test der gesamten Zelle	32
4.5.1	Konfiguration „Crush in X-Richtung“	32
4.5.2	Konfiguration „Crush in Z-Richtung“	34
4.5.3	Konfiguration „Penetration“	36
4.5.4	Konfiguration „3-Punkt-Biegung“	40
4.5.5	Vergleich der Versuche mit 0 % und 100 % SOC	43
5	Simulationsmodell	46
5.1	Motivation	46
5.2	Abstrahierung der realen Batteriezelle	47
5.2.1	Identifikation der wesentlichen Bauteile	47
5.2.2	Modellansätze zum Aufbau der Simulation	47
5.3	Aufbau des Modells	50
5.3.1	Element-Typ und Materialmodell	51
5.3.2	Kontaktbedingungen	52
5.3.3	Virtuelle Prüfanlage	54
5.4	Parallelisierungsgrad der FE-Berechnung	55
6	Validierung des Simulationsmodells	56
6.1	Auswahl geeigneter Versuchsmessdaten	56
6.2	Phänomenologische Vorgehensweise	56
6.3	Validierung der Metalcan	57
6.3.1	Meshsize	57
6.3.2	Materialmodell und Werkstoff	58
6.3.3	Elastizitätsmodul und Streckgrenze	60
6.3.4	Bereich plastischer Verformung	61
6.3.5	Ergebnis	62
6.4	Validierung der gesamten Zelle	66
6.4.1	Meshsize	66
6.4.2	Materialmodell und Werkstoff	67
6.4.3	Bereich plastischer Verformung	68
6.4.4	Ergebnis	70

7	Versagenskriterium	77
7.1	Motivation	77
7.2	Identifikation eines Kriteriums	77
7.2.1	Mechanische Spannung	79
7.2.2	Relative Volumenänderung	79
7.2.3	Absorbierte Energie	79
7.2.4	Festlegen eines Kriteriums	79
8	Anwendungsbeispiel	83
8.1	Motivation	83
8.2	Auswahl eines dynamischen Lastfalles	83
8.2.1	Quasi-statische Versuche	83
8.2.2	Erkenntnisse aus durchgeführten Crashtests	86
8.2.3	Lastfall in der Norm	87
8.3	Konkrete Anwendung des Zellen-Modells	88
9	Zusammenfassung	92
10	Ausblick	93
10.1	Verbesserung des Modells	93
10.2	Validierung des dynamischen Versuches	95
10.3	Implementierung in übergeordnete Modelle	95
10.4	Praktische Anwendung des Simulationsmodells	95
	Abbildungsverzeichnis	98
	Tabellenverzeichnis	99
	Literaturverzeichnis	103
A	Liste der verwendeten Abkürzungen, Formelzeichen und Einheiten	
B	Datenblatt	

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Hintergrund

Im Spannungsfeld der Verknappung bisher gebräuchlicher, fossiler Kraftstoffe, den damit verbundenen steigenden Unterhaltskosten zum Betrieb eines Kraftfahrzeugs mit Verbrennungskraftmaschine und einem zunehmenden Bewusstsein der Bevölkerung für nachhaltigen Umgang mit Natur und Umwelt ist eine intensive Beschäftigung mit Verfahren und Technologien zur Senkung des Energieverbrauches von Kraftfahrzeugen unabdingbar. Die hierdurch notwendig gewordene Suche nach Alternativen ergab, dass die Elektrifizierung des Antriebstranges ein geeignetes Mittel sein könnte, um eine signifikante Wirkungsgradsteigerung und eine Reduktion der Emissionen im Fahrbetrieb zu erreichen. Energiespeicher in Form von Batterien im Zusammenspiel mit E-Motoren bieten den Vorteil, große Energiemengen kurzfristig aufnehmen beziehungsweise abgeben zu können. Je nach Grad der Elektrifizierung kann so ein beträchtlicher Verbrauchs- und Emissionsvorteil während des Fahrbetriebes gegenüber einem vergleichbaren Fahrzeug ohne entsprechender Ausrüstung erreicht werden. Neben der effizienten Umwandlung der Energie im fahrzeugeigenen Speicher in Vortrieb (Tank-to-Wheel) muss auch die Erzeugung derselben (Well-to-Tank) möglichst ressourcenschonend bewerkstelligt werden. Der Produktion elektrischer Energie aus regenerativen Quellen, wie zum Beispiel Wasser, Wind oder Sonne, wohnt großes Potenzial inne, die gesamte Energiekette CO₂-neutral und somit nachhaltig zu gestalten.

Um der Forderung nach umweltfreundlicher Mobilität durch großflächige Etablierung von E-Fahrzeugen gerecht zu werden, sind mittelfristig sowohl soziologische und wirtschaftliche, vor allem aber auch technische Herausforderungen zu meistern. Neben der Lösung dieser - teilweise konträren - Aufgabenstellungen, sind auch von Seiten der Politik, ob regional, national oder international, Anstrengungen zu unternehmen, um akzeptable Rahmenbedingungen für alle Beteiligten zu schaffen.

1.1.1 Soziologische Aspekte

Aus soziologischer Sicht muss, neben weiteren Maßnahmen zur Steigerung des Umweltbewusstseins, die Akzeptanz neuartiger Technologien in der Bevölkerung gegeben sein beziehungsweise geschaffen werden. Erste Bemühungen zeigen bereits Wirkung, wie eine Studie von Wyman [2] zeigt. Der Begriff „Umweltfreundlichkeit“ wird hier nach „Zuverlässigkeit“, „Sicherheit“, „Preis-Leistungsverhältnis“ und „Gesamtkosten“ bereits an fünfter Stelle der Kriterien für die Kaufentscheidung bei Fahrzeugen gelistet. Die beiden erstgenannten Begriffe sollten umso mehr von der Industrie ernst genommen werden, da vor allem subjektive Ängste vor hohen elektrischen Spannungen und Strömen, wie sie in einem E-Fahrzeug vorkommen und die Gefahr von heftigen thermischen Reaktionen, welche im Falle einer Fehlbedienung auftreten können, begründet widerlegt werden müssen. Hierzu ist ein umfassendes Verständnis über das elektrische, thermische und mechanische Verhalten des Energiespeichers von Nöten, sodass, durch bessere Kenntnis des Gefahrenpotenzials, das Risiko minimiert werden kann.

1.1.2 Wirtschaftliche Aspekte

Aus wirtschaftlicher Perspektive betrachtet, spaltet sich diese Problematik in zwei Themenbereiche auf. Auf der einen Seite sind die Anforderungen von Industrie und Fahrzeugkäufer zu beachten, andererseits sind volkswirtschaftliche und somit politische Aspekte zu beleuchten. Laut einer Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit in Deutschland [3] sind sowohl verstärkte Energieeffizienz, als auch der Ausbau der erneuerbaren Energien mit positiven gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen in Form höherer Wirtschaftsleistung und zusätzlicher Arbeitsplätze verbunden. Weiters verringert die langfristige Senkung der Energiekosten die Abhängigkeit von Energie- bzw. Ölimporten aus politisch häufig instabilen Regionen. Um in den Genuss all dieser Vorzüge zu kommen, werden in Folge weitere Länder ihre Energiesysteme umbauen, sodass sich für technologische Vorreiterstaaten zukünftig hervorragende Exportmöglichkeiten eröffnen. Naturschutz, gesteigerte Lebensqualität und wirtschaftlicher Erfolg stehen somit nicht länger im Gegensatz zueinander. Einzig die dauerhafte Sicherstellung der Verfügbarkeit von „neuen“ Rohstoffen, welche in vielen Schlüsseltechnologien Verwendung finden, wie etwa Neodym oder Lithium, stellt ein geopolitisches Problem dar, das einer langfristigen und nachhaltigen Lösung bedarf. Während auf staatlicher Ebene eher positive Prognosen vorherrschen, ist die Situation für Hersteller und Endkunden zunächst mit Hürden versehen. Hohe Investitionskosten zur Entwicklung praxistauglicher Systeme sowie zur Erforschung gänzlich neuartiger Technologien stellen ein beachtliches wirtschaftliches Risiko dar. Ein Teil dieser Kosten kann und muss auf den Endkunden übertragen werden, sodass zum momentanen Zeitpunkt Hybrid- und E-Fahrzeuge, sofern überhaupt verfügbar, eher von umweltbewussten Menschen mit entsprechender Kaufkraft gefahren werden. Zukünftige Finanzierungsmodelle werden daher zum Beispiel das Leasing von gesamten Fahrzeugen oder zumindest von kostenintensiven Teilsystemen, wie etwa dem Energiespeicher, vorsehen müssen, um eine hohe Marktdurchdringung erreichen zu kön-

nen.

1.1.3 Technische Aspekte

Schlussendlich müssen auf technischer Seite Rahmenbedingungen geschaffen werden, welche ein akzeptables Funktionieren von E-Fahrzeugen im praktischen Betrieb ermöglichen. Eine Erhöhung der Energiedichte des Speichermediums zur Steigerung der Reichweite, sowie die Reduzierung der Fahrzeugmasse zur Senkung des Energieverbrauchs sind hierbei von zentraler Bedeutung. Tabelle 1.1 stellt die gebräuchlichsten Energieträger hinsichtlich ihrer massenspezifischen Energiedichte gegenüber.

Energieträger	Spezifische Energie $\frac{Wh}{kg}$
Elektrochemisch	
Blei-Akku	35
NiMH-Akku	75
Li-Ion-Akku	150
Fossil	
Diesel	12.000
Benzin	12.200
Alternativ	
Autogas (LPG)	12.800
Wasserstoff	33.300

Tabelle 1.1: Vergleich verschiedener Energieträger [4] [5].

Es ist leicht erkennbar, dass auf Seiten der elektrochemischen Energieträger die Lithium-Ionen-Technologie am vielversprechendsten erscheint. Die Energiedichte von Lithium-Ionen-Batterien ist um mehr als den Faktor vier bzw. Faktor zwei höher als bei Akkumulatoren auf Blei- oder Nickelbasis. Dies macht Li-Ionen-Zellen, beim heutigen Stand der Technik, zum Mittel der Wahl, um die fossilen Kraftstoffe zukünftig zu ergänzen oder eventuell abzulösen. Um den Faktor 100 zwischen Kraftstoffen auf Rohölbasis und elektrochemischen Energiespeichern zu überwinden, ist jedoch noch großer Forschungsaufwand zu treiben [6]. Aufgrund des beträchtlichen Einsparungspotenzials auf Seiten des rein elektrischem Antriebes gegenüber Verbrennungskraftmaschinen erscheint dieser Aufwand jedoch mehr als gerechtfertigt. Abbildung 1.1 auf der nächsten Seite bezieht sich auf Daten von EUCAR [7] und stellt den technologischen Trend zur Minimierung des Energieverbrauches dar. Hierbei ist der Treibhausgasausstoß der gesamten Prozesskette (Well-to-Wheel) über dem Verbrauch pro 100 km Fahrtstrecke für verschiedene Antriebskonzepte aufgetragen.

Treibhausgasemission [g CO₂eq/km]

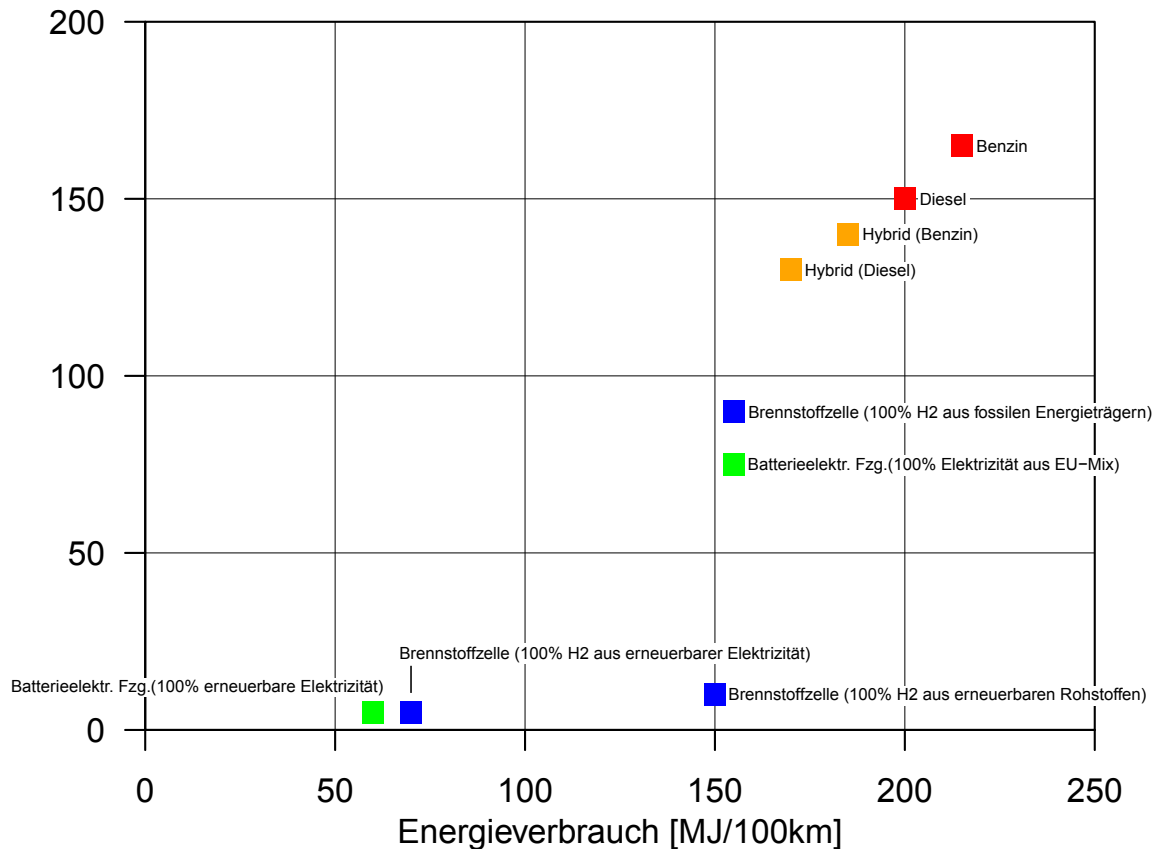


Abbildung 1.1: Well-to-Wheel Betrachtungen verschiedener Antriebskonzepte [7].

1.2 Aufgabenstellung und Ziele

Um die eben genannte Hürde zu überspringen beziehungsweise zu umgehen, ist es zwingend nötig, die Lithium-Ionen-Technologie vollständig zu beherrschen. Neben der weiteren Steigerung der Leistungsfähigkeit derartiger Batterien ist vor allem aber das Verständnis zur sicheren Handhabung von höchster Priorität. Genaue Kenntnis des Verhaltens von Li-Ionen-Batterien im Schadensfall beziehungsweise nach missbräuchlicher Verwendung, ist für die Auslegung eines elektrischen Energiespeichers (EES) von großer Wichtigkeit und Gegenstand aktueller Forschungsprojekte. Das Sicherheitsniveau zukünftiger E-Fahrzeuge muss, schon alleine aus Akzeptanzgründen, vorzugsweise größer, zumindest aber gleich hoch sein, als jenes von aktuellen Fahrzeugen mit Verbrennungskraftmaschine. Hieraus entsteht die Anforderung, das Gefahrenpotenzial der neuen Technologie abschätzen beziehungsweise das Verhalten des EES sicher vorherzusagen zu können.

Aus diesen allgemein gehaltenen Aufgaben leiten sich die konkreten Ziele der vorliegenden Arbeit ab. Zentrales Thema ist die Abstraktion des Energiespeichers eines vollelektrischen Vorserienfahrzeuges des österreichischen Motorradherstellers KTM-Sportmotorcycle AG, um ein makroskopisches Berechnungsmodell zu entwickeln, welches die mechanischen Eigenschaften der verwendeten Batteriezellen in möglichst realistischer Weise wiedergibt. Ebenso soll der Zeitpunkt des elektrischen Versagens einzelner Zellen zufolge mechanischer Belastung mithilfe eines numerischen Berechnungsmodells vorhergesagt werden können. Als Versagen einer Zelle wird in dieser Arbeit der Auftritt eines Kurzschlusses, welcher sich durch einen drastischen Spannungsabfall an den Anschlusspolen bemerkbar macht, definiert. Makroskopisch bedeutet in diesem Zusammenhang die Zusammenfassung der Eigenschaften von Subkomponenten zu einer Summeneigenschaft. Konstruktiven Details, welche keinen signifikanten Einfluss auf das mechanische Verhalten der Zelle haben, wird hierbei keine Beachtung geschenkt. Seine Gültigkeit erhält die Simulation durch Vergleich mit dem Verhalten der Zellen in realen Batterietests. Dieser Vergleichs- bzw. Validierungsprozess ist im Wesentlichen durch die experimentelle Ermittlung von Materialwerten gekennzeichnet, welche dem Simulationsmodell zugeführt werden. Aus dem Wechselspiel von Simulation und Versuch soll sich schlussendlich ein prognosefähiges, virtuelles Modell ergeben, welches die Realität bestmöglich widerspiegelt. Die folgende Auflistung gibt einen Überblick über die wichtigsten Aufgaben und Ziele der Arbeit.

- Aufgabenstellung

- Verhalten der Lithium-Ionen-Technologie „kennenzulernen“

- Gefahrenpotenzial (im Schadensfall) abschätzen

- Ziele

- Makroskopisches FE-Modell einer Lithium-Ionen-Zelle erstellen

- Deformationsbild realistisch nachstellen

- Versagen der Zelle zufolge mechanischer Belastung vorhersagen

- Funktion der Simulation anhand Anwendungsbeispiel demonstrieren

Um die oben aufgeführten Aufgaben und Ziele lösungswise erreichen zu können, wurde folgende methodische Herangehensweise gewählt. In einem ersten Schritt wurde eine der verwendeten Zellen unter entsprechenden Sicherheitsvorkehrungen geöffnet, um deren inneren, konstruktiven Aufbau erkennen zu können. Danach wurden die Hauptbestandteile, welche eine mechanische tragende Funktion erfüllen, identifiziert und in einem CAD-Modell nachgebildet. Aus dieser Konstruktion heraus wurde ein Finite-Elemente-Netz erstellt. Als nächstes wurden prinzipielle mechanische Versuche mit den Hauptbauteilen durchgeführt und daraus Materialkennwerte ermittelt. Die so gewonnenen Erkenntnisse wurden zum Aufbau und zur Validierung des Simulationsmodells in LS-DYNA [8] herangezogen. Die inhaltliche Struktur der folgenden Kapitel dieser Arbeit entspricht weitestgehend diesem Schema. Die Arbeitspakete, welche der Diplomarbeit zu Grunde lagen, sind im Folgenden genannt. Abbildung 1.2 gibt zudem einen Überblick über die gewählte Vorgehensweise.

- Literaturrecherche
- Beschreibung des konstruktiven Aufbaus einer Zelle
- Mechanische Versuche
- Entwicklung eines Finite-Elemente-Simulationsmodells
- Validierung dieses Modells
- Anwendung des Simulationsmodells

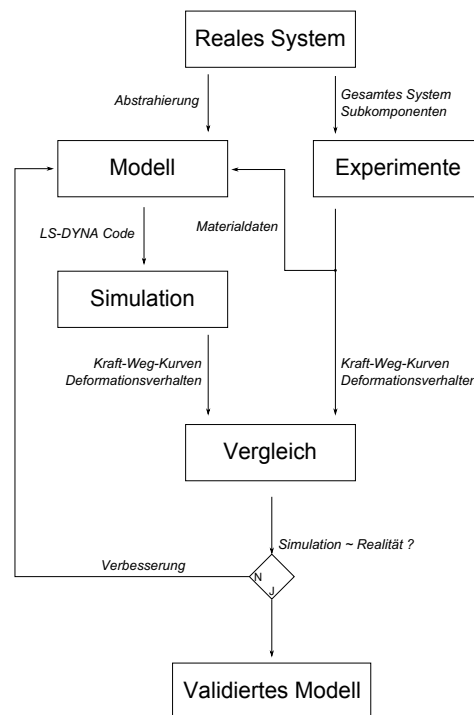


Abbildung 1.2: Vorgehensweise bei der Entwicklung.

1.3 Vorteile durch ein virtuelles Modell

Die Entscheidung zur Entwicklung eines Simulationsmodells gründet sich im Allgemeinen auf vier Fundamenten. Zum einen besteht bei virtuellen Versuchen, im Gegensatz zu realen Tests, zu keinem Zeitpunkt eine Gefährdung von Menschen oder Umwelt. Die, weiter oben bereits angesprochene, Kritikalität der Lithium-Ionen-Technologie bei mechanischer Beschädigung kann somit gefahrlos untersucht werden. Zum anderen bietet ein Simulationsmodell die Möglichkeit, eine Abschätzung des Risikos durch konkrete „Was-wäre-wenn“-Fragestellungen auf einfache Weise und mit geringem Zusatzaufwand durchzuführen. Ein weiterer Vorteil, der aus der Entwicklung eines virtuellen Modells entspringt, liegt in der wirtschaftlichen Rentabilität. Obwohl der Aufbau eines Simulationsmodells mit gewissem finanziellen Aufwand (Personal, IT-Infrastruktur, etc.) verbunden ist, so ist dieser, im Gegensatz zu realen Experimenten, von hoher Flexibilität geprägt und erzeugt keinerlei Materialkosten. Ist das Modell am Computer aufgebaut, können kleinere Modifikationen oder Änderungen der Randbedingungen in umfangreichen Variantenrechnungen zeitlich parallel durchgeführt werden, welche in dieser Art real nicht bzw. nur mit meist hohem Kostenaufwand möglich wären. Ebenso ist es möglich Grenzbelastungen oder Detailvorgänge, welche im Versuch oft nicht erkennbar sind (Spannungen im Material, etc.), zu ermitteln. Trotz dieser entscheidenden Vorteile ist eine Absicherung der Rechenergebnisse durch physische Versuche wichtig und unbedingt notwendig. Durch die Kombination von Versuch und Simulation erhält zweiseitig ihre Gültigkeit, worauf alle oben angeführten Vorteile voll ausgeschöpft werden können.

Kapitel 2

Stand der Technik

2.1 Geschichte und Entwicklung elektrochemischer Energiespeicher

Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über Technologien zur Vorhaltung elektrischer Energie und ist inhaltlich an ICS [9], Trueb und Rüetschi [10] sowie Wallentowitz [11] angelehnt.

Atmosphärische Elektrizität, (statische) Reibungselektrizität sowie die Schläge elektrischer Fische sind dem Menschen seit jeher geläufige Erscheinungen. Die Geschichte elektrochemischer Energiespeicher jedoch geht zurück auf die Dynastie der Parther, welche im dritten Jahrhundert vor Christi Geburt große Teile Mesopotamiens beherrschten. Bei Bauarbeiten auf dem Gebiet des heutigen Irak wurde 1936 ein Gegenstand entdeckt, dessen innerer Aufbau alle Merkmale einer Batterie aufweist. Dieser Apparat bestand aus einem Tonkrug mit einem Verschlusspfropfen aus Asphalt, in welchem ein Eisenstab, umgeben von einem Kupferzylinder, steckte. Wurde der Krug mit elektrolytischer Flüssigkeit, möglicherweise Essig, gefüllt, so lag zwischen dem Stab und dem Zylinder eine Spannung von 0,8 Volt an. Unklar ist jedoch bis heute, welchem Zweck dieser Krug diente und ob die Parther überhaupt Kenntnis über die Phänomene der Elektrizität hatten. Erst rund zwei Jahrtausende später erforschte Luigi Galvani die Kontraktion von Muskelgewebe unter dem Einfluss von statischer Elektrizität. Basierend auf diesen Untersuchungen erarbeitete Alessandro Volta die elektrische Spannungsreihe verschiedener Metalle, was schließlich um das Jahr 1800 in der Erfindung der „Volta’schen Säule“, einem Energiespeicher und dem Vorläufer moderner Batterien, gipfelte. Die dadurch mögliche und darauf folgende, umfassende Erforschung der Elektrizität und der Speicherung elektrischer Energie reicht bis in unsere Zeit und prägt seither den Alltag des Menschen.

2.2 Einteilung elektrochemischer Energiespeicher

Neben Batterien zur einmaligen Verwendung, auch Primärbatterien genannt, gibt es wiederaufladbare Typen, die Sekundärbatterien oder Akkumulatoren. Zweitere zeichnen sich durch die Umkehrbarkeit der chemischen Reaktionen zwischen den Elektroden aus. Die folgende Abbildung 2.1 gibt einen Überblick über die verschiedenen Arten von elektrischen Energiespeichern und ist auszugsweise Linden [4] entnommen, wobei der Fokus hierbei auf den Sekundärzellen liegt.

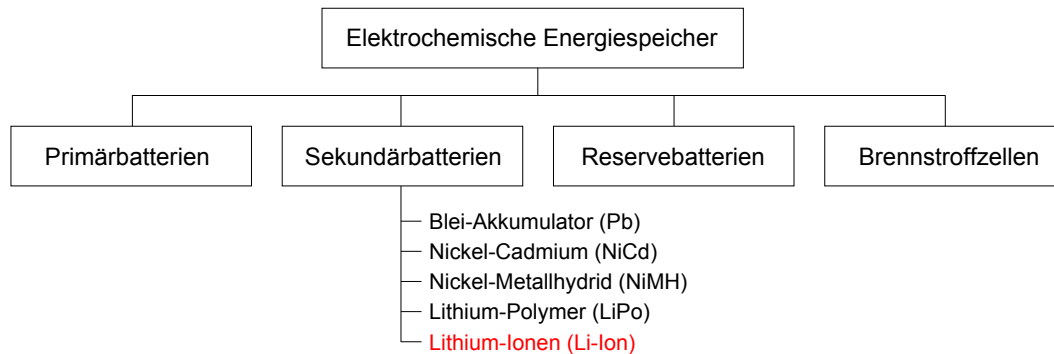


Abbildung 2.1: Einteilung elektrochemischer Energiespeicher.

2.3 Lithium-Ionen Akkumulatoren

Eine spezielle Art von wiederaufladbaren Batterien stellen Akkumulatoren auf Lithium-Basis dar. Wie bereits in Kapitel 1 aufgezeigt, verspricht diese Technologie das größte Potenzial, um zur Energiespeicherung in zukünftigen Fahrzeugen zu dienen. Im Folgenden werden Grundprinzipien und Funktion dieser Lithium-Ionen-Akkumulatoren erläutert.

2.3.1 Aufbau von Lithium-Ionen-Zellen

Im Wesentlichen weisen Li-Ionen-Zellen einen geschichteten Aufbau aus positiven und negativen Elektroden (Anode und Kathode) auf. Je nach Typ der Zelle finden als positives Elektrodenmaterial üblicherweise Metalloxide, z.B. Lithiumcobaltdioxid, Verwendung. Die negative Elektrode ist verbreitet aus Kohlenstoff, genauer Graphit, gefertigt. Das Aktivmaterial ist hierbei auf Trägerschichten aus Aluminium (positive Elektrode) und Kupfer (negative Elektrode) aufgebracht. Als Überbegriff für diese Trägerschichten wird die Bezeichnung „Stromableiter“ verwendet. Um einen Kurzschluss von Anode und Kathode zu verhindern, werden diese durch Separatoren räumlich getrennt. Zur Erhaltung der Funktionsfähigkeit der galvanischen Zelle sind diese mikroporösen Trennschichten für Ionen durchlässig, nicht jedoch für Elektronen. Gängige Separatoren bestehen aus Polymerfolien, wobei in speziellen Fällen, in denen eine besonders hohe Temperaturbeständigkeit gefordert ist, Keramikwerkstoffe zum Einsatz kommen können. Beide Varianten weisen bestimmte Vor- und Nachteile auf und sind Thema aktueller Forschungsprojekte. Weiters ist die negative Elektrode von einer passivierenden Deckschicht, die als Solid-Electrolyte-Interface (SEI) bezeichnet wird, überzogen. Diese

Schicht bildet sich während des allerersten Ladevorgangs der Zelle und schützt den Stromableiter der Graphitseite vor Beschädigung durch den Elektrolyten. Zudem beeinflusst sie den Ionen-transport und spielt somit eine bedeutende Rolle in Bezug auf Leistung und Lebensdauer bzw. Zyklusfestigkeit der Zelle. Wird schließlich über elektrolytische Substanzen eine galvanische Verbindung zwischen Anode und Kathode hergestellt, so kann an den Stromableitern Spannung abgegriffen werden. Die Höhe dieser Spannung wird durch die Differenz des elektrochemischen Potentials zwischen den verwendeten Elektrodenmaterialien bestimmt. Das elektrochemische Potential ausgewählter Elemente ist in der Spannungsreihe in Tabelle 2.1 aufgelistet. Die Werte stellen die Standardpotenziale bei 25 °C und einem pH-Wert von 0 dar und sind aus Kurzweil und Scheipers [12] entnommen.

Element	Standardpotential E^0 V
Eisen (Fe)	0,77
Kupfer (Cu)	0,52
Normal-Wasserstoffelektrode (H_2)	0,00
Blei (Pb)	-0,13
Nickel (Ni)	-0,23
Cobalt (Co)	-0,28
Cadmium (Cd)	-0,40
Lithium (Li)	-3,04

Tabelle 2.1: Elektrochemische Spannungsreihe ausgewählter Elemente [12].

2.3.2 Chemie der Lithium-Ionen-Zelle

Die chemische Funktionsweise eines Li-Ionen-Akkumulators ist in Abbildung 2.2 graphisch dargestellt.

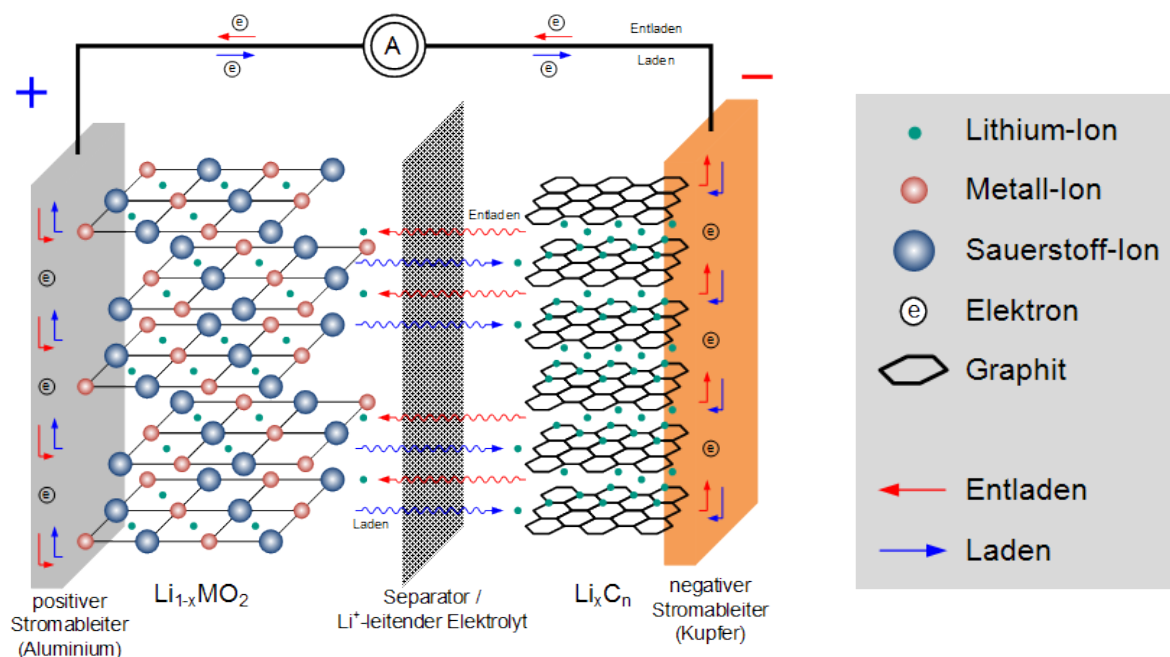
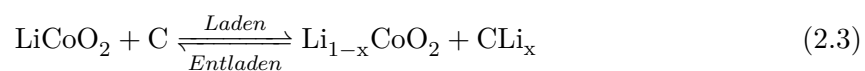
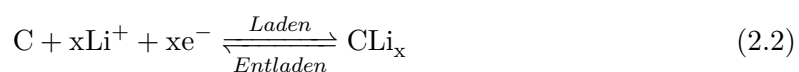
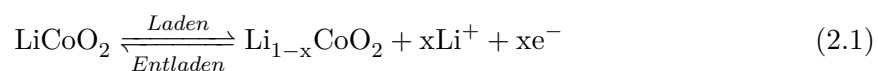


Abbildung 2.2: Funktionsprinzip einer Li-Ionen-Zelle [13].

Prinzipiell laufen in einer Lithium-Ionen-Zelle Reduktions-Oxidations-Reaktionen (Redoxreaktionen) ab. Beim Laden der Zelle werden an der positiven Elektrode (+) Lithium-Ionen aus dem Metalloxid gelöst und an den Elektrolyten abgegeben. Gleichzeitig werden, der Anzahl an Ionen entsprechend, Elektronen frei. Der Ablauf dieser Halbreaktion ist in Formel 2.1 angeschrieben. Die Lithium-Ionen passieren anschließend den Separator und lagern sich in die geschichtete Kristallstruktur des Graphits an der negativen Elektrode (-) ein. Dieser Einlagerungsvorgang wird „Interkalation“ [14] genannt und ist in Formel 2.2 dargestellt. Die freien Elektronen wandern über die äußere Beschaltung vom positiven zum negativen Stromableiter und können hier als elektrischer Strom gemessen werden. Schließlich ergibt sich die Reaktion der gesamten Zelle zu Formel 2.3. Im Falle des Entladevorganges laufen die Reaktionen in umgekehrter Richtung ab. Die Chemie von Li-Ionen-Zellen ist in den folgenden Formeln [15] am Beispiel von Lithiumcobaltdioxid als Aktivmaterial erklärt.



2.4 Elektrische Energiespeicher im Fahrzeugbau

2.4.1 Frühe Anwendungen

Bereits in den ersten Tagen des Automobilzeitalters kamen elektrische Maschinen als Antriebsaggregate und damit auch Batterien als Energiespeicher zur Verwendung. Obwohl in dieser Zeit, Ende des 19. Jahrhunderts, der Siegeszug der Verbrennungskraftmaschine begann, zeigten sich schon damals die prinzipiellen Nachteile dieser Technologie. Einer der Pioniere des Automobilbaus, der Wiener Wagenbauer Ludwig Lohner, erkannte die Vorteile eines Fahrzeugs mit Elektroantrieb. Neben der einfacheren Bedienung und dem geringeren Betriebsgeräusch eines Elektroautos gegenüber Fahrzeugen mit Benzin- oder Dieselmotor, kritisierte er vor allem die Umweltverschmutzung zufolge der Abgase. Auch die Konstruktion des Fahrzeuges, welche Lohner gemeinsam mit Ferdinand Porsche bewerkstelligte, gestaltete sich einfacher, da anstelle von umständlichen Getrieben der Antrieb direkt über Radnabenmotoren erfolgte. Damals wie heute begrenzte jedoch die Kapazität der Batterie die Reichweite von E-Fahrzeugen und verhinderte somit eine Verbreitung dieses Konzeptes [16]. In weiterer Folge wurden elektrische Energiespeicher nur in untergeordneter Funktion, wie zum Beispiel als Starterbatterie für den Anlasser und zur Versorgung der Beleuchtungsanlage oder der Komfort- bzw. Sicherheitselektronik, verwendet. Erst als Folge der Ölkrise in den 1970er Jahren wurden elektrische Antriebe zur Verbrauchsreduzierung wieder zum Thema für Automobilhersteller. Die Volkswagen AG betrieb beispielsweise seit 1976 ein rein elektrisch angetriebenes Versuchsfahrzeug auf Basis des Golf I [17]. Eine konsequente Entwicklung im Bereich Hybrid- oder Elektrofahrzeug ist generell im Fahrzeugbau seit der Jahrtausendwende zu erkennen.

2.4.2 Aktuelle Entwicklungen

Die zukünftige Entwicklung der Antriebstechnologie für Fahrzeuge wird laut Wallentowitz [11] in mehreren Stufen ablaufen. Die einzelnen Schritte vom Fahrzeug mit Verbrennungskraftmaschine hin zum reinen E-Auto sind in Abbildung 2.3 zu sehen.

Zunächst werden Anstrengungen unternommen, um den konventionellen Verbrennungsmotor zu optimieren. Werden ein solcher Motor und ein elektrisches Antriebssystem in einem Fahrzeug kombiniert, so spricht man von Hybridfahrzeugen. Im nächsten Schritt werden direkt vom Motor angetriebene Nebenaggregate durch elektrifizierte Varianten ersetzt, welche lastabhängig und somit energieeffizient betrieben werden können. Auch eine Start-Stopp Funktion, also eine Abschaltung des Verbrenners beim Halten, ist hierbei vorgesehen. Diese Stufe der Elektrifizierung wird im Allgemeinen als „Mikrohybrid“ bezeichnet und findet in aktuellen Serienfahrzeugen breite Verwendung. Das Einsparungspotenzial liegt im Bereich von 7 bis 11 %. Die nächste Ebene sieht die Rückgewinnung von Bremsenergie vor, welche in elektrischen oder mechanischen Speichern eingelagert wird. Diese Energie kann beim erneuten Beschleunigen des Fahrzeuges abgerufen werden und unterstützt so die Verbrennungskraftmaschine. Der seriennahe Rennwagen „Porsche 911 GT3 R Hybrid“ ist ein exotischer Vertreter

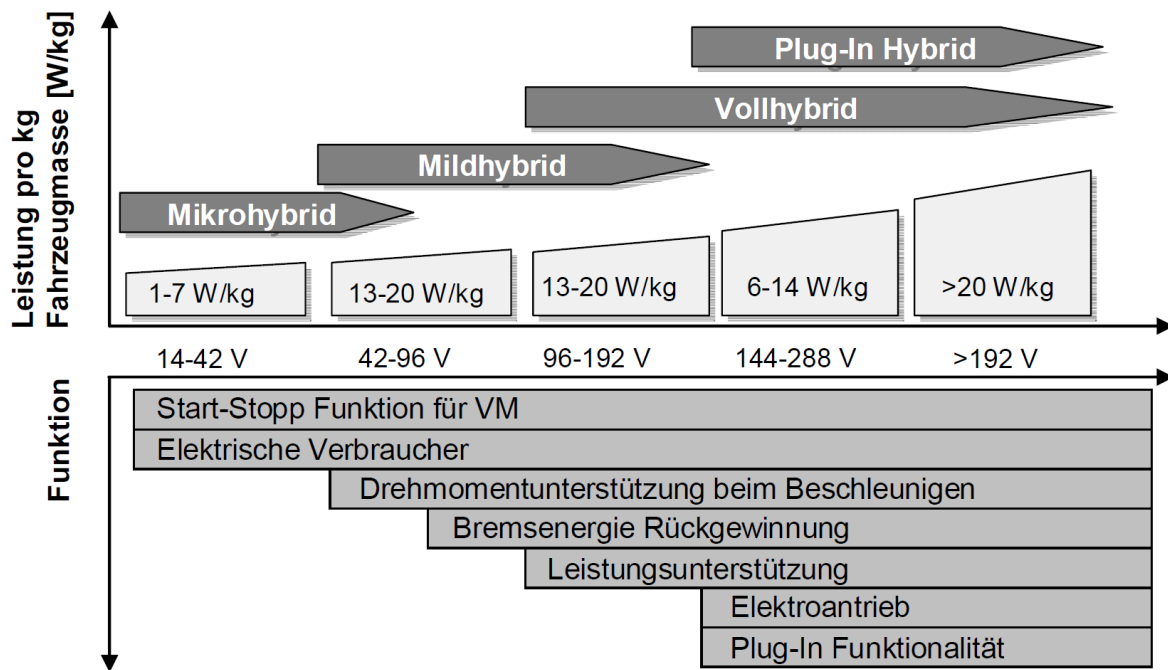


Abbildung 2.3: Entwicklungspfad der Antriebsstrangentwicklung nach Wallentowitz [11].

dieser „Mildhybrid“ genannten Fahrzeugklasse [18]. Die Reduktion des Kraftstoffverbrauches bewegt sich um 20 %. Vom „Vollhybrid“ spricht man, wenn die E-Maschine einen signifikanten Anteil an der Systemleistung des Fahrzeugs hält. Neben der Leistungsunterstützung ist auch, in begrenztem Rahmen, ein rein elektrisches Fahren möglich. Elektromotor, Batterie und zusätzliche Systeme zur „Verheiratung“ von Verbrenner und E-Motor nehmen hierbei einen bedeutenden Teil des gesamten Fahrzeugs ein. Beispiele für diese Klasse sind die „ActiveHybrid“ Modelle von BMW, welche eine Verbrauchseinsparung bis zu 25 % erreichen können [19]. Den höchsten Grad an Elektrifizierung vor dem reinen E-Fahrzeug erreicht man beim „Plug-In Hybrid“. Hierbei wird die Antriebsleistung ausschließlich von Elektromotoren bereitgestellt, welche ihre Energie aus dem Batteriesystem des Fahrzeuges beziehen. Dieses wiederum wird an einer entsprechenden Ladestation aufgeladen. Nachdem, Studien [20] zufolge, die tägliche Fahrleistung mit PKW in Österreich weniger als 20 km beträgt, ist hierfür eine Batterieladung am Tag als ausreichend anzusehen. Fahrzeuge dieser Art werden meist mit einer zusätzlichen Verbrennungsmaschine ausgestattet, die als „Range-Extender“ für eine höhere Reichweite auf längeren (Überland-)fahrten sorgt. Mittelfristig sind aus heutiger Sicht reine Elektrofahrzeuge, abgesehen vom städtischen Nahverkehr, keine praktikable Lösung. Eine Verbreitung von „Plug-In“ Hybridfahrzeugen, deren Verbrennungskraftmaschine ausschließlich als „Rückfallebene“ für Notsituationen bzw. für kurze Strecken rein elektrischer Fahrt dient, ist dagegen sehr wahrscheinlich und wünschenswert. Diese Kombination erlaubt lokal emissionsfreies Fahren, besitzt ausreichende Reserven für gelegentliche Langstreckenfahrten und bietet den Fahrzeuginsassen das, von heutigen Automobilen gewohnte, Komfort- und Sicherheitsniveau.

2.4.3 Elektrofahrzeuge der KTM Sportmotorcycle AG

Als konkretes Beispiel einer Anwendung eines rein elektrisch angetriebenen Fahrzeuges dient das, in dieser Arbeit gegenständliche, Motorrad des österreichischen Herstellers KTM (siehe Abbildung 2.4). Das Fahrzeug mit der Bezeichnung „KTM Freeride E“ steht kurz vor der Serieneinführung und verfügt über einen Akkumulator in Lithium-Ionen Technologie. Das Batteriepaket besteht aus 360 Zellen vom Typ „18650“, welche in geeigneter Weise untereinander verschaltet sind. Damit das Handling des Fahrzeuges den, vom Hersteller sich selbst auferlegten, hohen Ansprüchen genügt, ist großer Wert auf ein geringes Fahrzeuggewicht gelegt worden. Um die Masse der elektronischen Komponenten so gering wie möglich zu halten, trotzdem aber die gewünschte Leistung an den Motor übertragen zu können, ist ein niedriger Strom an den stromführenden Bauteilen erforderlich. Das gewählte Hochvoltkonzept mit einer Systemspannung von über 300 V wurde bewusst aus diesem Grund verfolgt. Um den Benutzer vor gefährlichen Spannungen zu schützen, wurden Elektromotor, Leistungselektronik und Batteriepaket staub- und wasserdicht ausgeführt, was ebenso der Haltbarkeit des Fahrzeuges im rauen Geländeeinsatz zu Gute kommt. Angetrieben wird das, im Bereich Funsport angesiedelte, Produkt durch einen bürstenlosen Synchronmotor in Scheibenläuferbauweise mit einer Spitzenleistung von 22 kW und einem, ab Drehzahl Null anliegenden, Drehmoment von 42 Nm. Der Hersteller erwartet sich durch die lokale Emissionsfreiheit und das leise Betriebsgeräusch mehr Akzeptanz für den Offroad-Sport und möchte nebenbei neue Anwendungsgebiete in urbanen und suburbanen Gebieten erschließen.



Abbildung 2.4: KTM Freeride E [21].

2.5 Gefahrenpotenzial der Li-Ionen-Technologie

Durch die relative Neuartigkeit der Lithium-Ionen-Technologie und dem damit verbundenen Forschungsrückstand ist unbedingt das Gefahrenpotenzial anzusprechen, welches dieser Technik innewohnt. Durch die, weiter oben bereits erwähnte, hohe Energiedichte, den leichtentzündlichen Elektrolyten sowie die Toxizität bestimmter Inhaltsstoffe ist besondere Vorsicht im Umgang mit Lithium-Ionen-Zellen geboten. Das Ziel in diesem Zusammenhang muss sein, das Sicherheitsniveau zukünftiger E-Fahrzeuge zumindest auf dem gleichen, idealerweise aber auf einem höheren, Niveau zu halten, als jenem aktueller Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor. Laut Sinz [22] können die Gefahrenquellen, welche von Li-Ionen-Batterien ausgehen folgendermaßen kategorisiert werden:

- Chemische Gefahren
- Thermische Gefahren
- Elektrische Gefahren
- Mechanische Gefahren.

2.5.1 Chemische Gefahren

Mechanische oder elektrische Fehlbedienung einer Li-Ionen-Zelle kann, im schlimmsten Fall, zu heftigen Reaktionen führen, welche die Freisetzung von zum Teil toxischen Inhaltsstoffen zur Folge haben. Der Austritt umweltschädlicher Substanzen stellt eine große Gefahr für die Umgebung des Energiespeichers dar und muss möglichst vermieden werden. Tabelle 2.2 gibt einen Überblick über die Inhaltsstoffe handelsüblicher Li-Ionen-Zellen. Treten diese Substanzen in Folge einer Beschädigung der Zelle aus, so können weitere gefährliche Reaktionen angestoßen werden. Das Leitsalz des Elektrolyten (LiPF_6) reagiert bei Kontakt mit Wasser (z.B.: Luftfeuchtigkeit, Löschwasser, etc.) zu Fluorwasserstoff (Flusssäure), Phosphoroxyfluorid oder Lithiumphosphid (Phosphan). Diese Reaktionsprodukte sind durchwegs als „sehr giftig“, „ätzend“ und im letztgenannten Fall als „hochentzündlich“ eingestuft. Die weiteren Bestandteile des Elektrolyten reagieren mit dem Luftsauerstoff zu Kohlenwasserstoffverbindungen wie Methanol, Ethanol oder Ethylenoxid, welche „giftig“ und zudem „leicht- bzw. hochentzündlich“ sind. Kommt es zum Versagen einer Zelle, so besteht demnach höchste Brandgefahr für die nähere Umgebung. Neben der Giftigkeit an sich, ist auch die Konzentration der jeweiligen Stoffe von Bedeutung. Die Masse an umweltschädlichen Stoffen in einer einzigen Zelle ist eher gering, sodass bei genügender Verdünnung (mit Luft) bzw. genügender räumlicher Distanz keine unmittelbare Gefährdung für Mensch und Umwelt besteht. Unverdünn ist jedoch eine erhebliche Belastung zu erwarten. Die folgende Abbildung 2.5 wurde Roth [23] entnommen und gibt einen Überblick über das Volumenverhältnis der austretenden Substanzen beim Ausgasen einer Lithium-Ionen-Zelle vom Typ „18650“ in Abhängigkeit von der Zelltemperatur.








Inhaltsstoff	Formel	Gefahrenpotenzial
Elektrolyt		
Lithiumhexafluorophosphat	LiPF_6	
Dimethylcarbonat	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$	
Ethylmethylcarbonat	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_3$	
Ethylencarbonat	$\text{C}_3\text{H}_4\text{O}_3$	
Kathode		
Cobalt(-oxid)	Co_xO_y	
Nickel(-oxid)	Ni_xO_y	
Mangan(-oxid)	Mn_xO_y	
Anode		
Graphit	C	keine gefährlichen Eigenschaften
Ruß	C	keine gefährlichen Eigenschaften
Polyvinylidendifluorid	$\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_2$	keine gefährlichen Eigenschaften

Tabelle 2.2: Inhaltsstoffe einer 18650 Li-Ionen-Zelle und deren Gefahrenpotenzial [24].

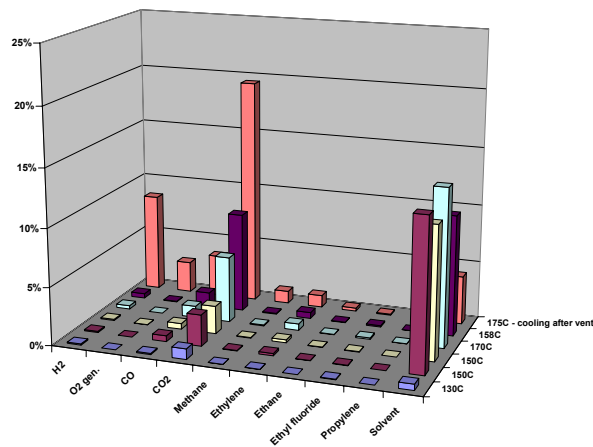


Abbildung 2.5: Zusammensetzung der Reaktionsprodukte beim Ausgasen einer 18650 Li-Ionen-Zelle [23].

2.5.2 Thermische Gefahren

Überlasten von Li-Ionen-Zellen kann zum Versagen von Bauteilen im Zelleninneren führen. Dies kann, vor allem im geladenen Zustand, thermische Kettenreaktionen auslösen. Wird ein derartiger Mechanismus, auch als „Thermal Runaway“ bezeichnet, angestoßen, so ist die Zelle nur mehr schwer mit herkömmlichen Methoden zu löschen, sodass ein Ausgasen bzw. eine Explosion kaum vermieden werden kann. Abgesehen vom Schaden durch den Austritt giftiger Stoffe, besteht die Gefahr des Ausbrechens von Feuer in der unmittelbaren Umgebung, verursacht durch das Herausschleudern glühender Teile und heißer Gase. In einem Batteriemodul mit einer großen Anzahl an Zellen kann dies wiederum zur Zerstörung weiterer, bis zu diesem Zeitpunkt noch intakter, Zellen führen.

2.5.3 Elektrische Gefahren

Ein gängiges Konzept, welches bei der Elektrifizierung des Antriebsstranges angewandt wird, ist die Auslegung als Hochvolt-System. Eine hohe Systemspannung bewirkt, bei gegebener, zu übertragender Leistung, eine Absenkung des elektrischen Stromes. Der entscheidende Vorteil liegt hierbei in der Möglichkeit, stromführende Teile bzw. elektrische Komponenten kleiner dimensionieren zu können. Dies wirkt sich positiv auf die Fahrzeugmasse aus und verbessert indirekt Fahrleistung und Reichweite. Im Gegenzug kann man die hohe Spannung und den Energieinhalt von Batteriemodulen als mögliche Gefahrenquelle sehen. Besonders der Schutz vor elektrischem Schlag muss ausreichend gewährleistet sein. Dies betrifft nicht nur Prüfanlagen und Geräte, sondern vor allem auch Personen. Hierbei sind die Bereiche Produktion und Lagerung, sowie das Personal von Werkstätten oder Einsatzkräfte hervorzuheben.

2.5.4 Mechanische Gefahren

Mechanische Gefahren sind hauptsächlich durch die hohe Masse von Batteriemodulen gegeben. Dies verschlechtert die Fahreigenschaften des Fahrzeuges und stellt eine erhebliche Gefährdung in Unfallsituationen dar.

Kapitel 3

Prüfverfahren in Literatur und Norm

3.1 Prüfverfahren in Normen

Die Einteilung von Prüfverfahren zur Untersuchung von Batteriezellen für Elektrofahrzeuge erfolgt in Normen meist in drei Teilbereiche (Mechanical, Electrical, Environmental). Diesen Bereichen wiederum sind die verschiedenen Testkonfigurationen untergeordnet. Die folgende Auflistung ist auszugsweise aus UL1642 [25] entnommen und kommt in dieser oder sehr ähnlicher Form in weiteren Normen und Veröffentlichungen vor. Aus Gründen der besseren Nachvollziehbarkeit wurden hierbei die englischsprachigen Bezeichnungen beibehalten.

Mechanical	Electrical	Environmental
Crush	Short-Circuit	Heating
Impact	Abnormal Charging	Temperature Cycling
Shock	Forced Discharge	Low Pressure (Altitude)
Vibration		
Drop		

Tabelle 3.1: Einteilung von Prüfverfahren nach UL1642.

Im Weiteren liegt der Fokus dieser Arbeit auf den mechanischen Belastungstests, wobei die Lastfälle „Shock“, „Vibration“ und „Drop“ eher durch Betriebsbelastungen und zum Teil durch unsachgemäße Handhabung der Batterien zu erwarten sind. Für die Untersuchung der Zellen in Unfallsituationen sind vornehmlich die Tests „Crush“ und „Impact“ von Interesse. Beim „Crush“-Test nach UL1642 werden die Batteriezellen zwischen flachen Platten gequetscht, bis die Prüfkraft einen festgelegten Maximalwert erreicht hat. Die Längsachse der Zelle muss für diesen Test parallel zu den Flächen des Prüfapparats ausgerichtet sein.

Der „Impact“-Test nach UL1642 ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Hierbei wird der Prüfling durch einen Prüfkörper penetriert, welcher durch eine herabfallende Masse belastet wird. Ziel dieses Versuchs ist, eine möglichst hohe, lokale Deformation der Zelle herbeizuführen, um die Reaktion des Prüflings bei starker Beschädigung untersuchen zu können. Die erzwungene Erzeugung eines internen Kurzschlusses ist zur Auslotung der äußersten Belastbarkeit von Batterien und zur Ermittlung einer Grenzbelastung zur Vorhersage bzw. Vermeidung des elektrischen Versagens von enormem Interesse.

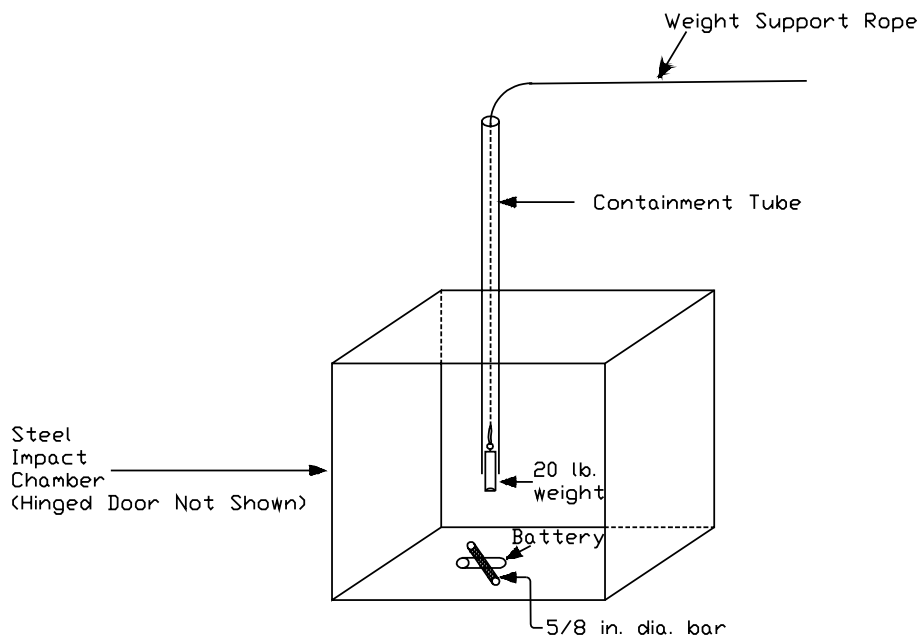


Abbildung 3.1: „Impact“-Test nach UL1642.

3.2 Prüfverfahren in der Fachliteratur

Neben der Beschreibung von Testkonfigurationen in Normen finden sich auch in der einschlägigen Fachliteratur interessante Beiträge, welche sich mit dieser Thematik befassen. Im Zuge der Recherche fielen vor allem die Arbeiten von Greve [26] und Sahraei [27] ins Auge. Einige Prüfverfahren, die in diesen Werken beschrieben werden, leiten sich zum Teil aus Normen ab und bestätigten deren Brauchbarkeit in der praktischen Anwendung. Weitere Versuchsaufbauten ergaben sich aus den Anforderungen zur Validierung von Berechnungsmodellen. Hervorzuheben sei die Konfiguration „3-Punkt-Biegung“, welche den Prüfling einer doppelten Belastung aussetzt. Sahraei sieht in dieser Versuchsanordnung die Kombination von globalen Belastungen durch die Durchbiegung der gesamten Zelle, sowie lokaler Beanspruchung durch das Eindringen des Prüfkörpers. Diese Mehrfachlast kann wertvolle Erkenntnisse zur Validierung der Simulation liefern. Ebenso ist ein derartiges Szenario für Zellen im Inneren von Batteriemodulen von Kraftfahrzeugen während eines Unfalls denkbar. Abbildung 3.2 gibt den Aufbau des Versuchs aus der eben erwähnten Veröffentlichung wieder.

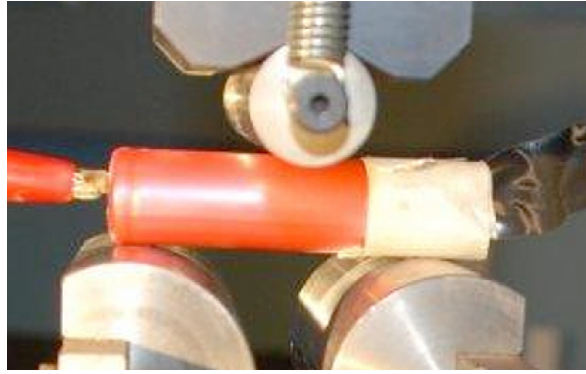


Abbildung 3.2: Versuch „3-Punkt-Biegung“ nach Sahraei [27].

3.3 Definition aussagekräftiger Lastfälle

Um die Vorgaben aus Normen und den darauf basierenden Gesetzen bestmöglich zu erfüllen und gleichzeitig eine fundierte Vorgehensweise zur Validierung der Simulationsrechnung zu schaffen, wurde eine Matrix mit aussagekräftigen Lastfällen erstellt. Zur Extraktion verwertbarer Aussagen aus den Experimenten wurde für jeden Versuch eine neue Zelle verwendet. Die Anzahl der geplanten Wiederholungen richtete sich nach der Verfügbarkeit von Prüflingen bzw. der Streuung der Messdaten. War diese gering, so wurden keine weiteren Wiederholungen durchgeführt. Versuche mit ungeladenen Zellen werden fünfmal, mit geladenen Zellen viermal wiederholt. Eine entsprechende Empfehlung zur Anzahl der Tests pro Konfiguration kann auch in der Norm [25] gefunden werden. Zusammenfassend soll festgehalten werden, dass mit Hinblick auf die Ermittlung eines Versagenskriterium aus den Versuchsergebnissen, die Notwendigkeit bestand, reale Crash-Belastungen im Versuch nachzubilden. Diese Forderung schlägt sich in den Versuchskonfigurationen „3-Punkt-Biegung“ sowie „Penetration“ nieder. Zur Validierung der Materialmodelle in der Finite-Elemente-Simulation wiederum sind die Konfigurationen „Crush in X-Richtung“ und „Crush in Z-Richtung“ besonders von Bedeutung. Anhand der Ergebnisse der Tests in diesen Versuchsanordnungen sollen die Eigenschaften der virtuellen Werkstoffe für die Bauteile der Zelle ermittelt werden.

3.3.1 Crush in X-Richtung

„Crush in X-Richtung“ bedeutet ein Quetschen des Prüflings zwischen zwei flachen, parallelen Flächen in radialer Richtung. Ein Test in dieser Konfiguration bewirkt eine flächige Belastung der gesamten Zelle. Bei der Nachstellung des Versuches im Simulationsmodell werden somit die Elemente eines Querschnitts der Zelle nahezu identisch belastet. Quereinflüsse und Richtungsabhängigkeiten können so weitestgehend kompensiert werden. Ein weiterer Grund für die Wahl dieser Konfiguration war die Erwähnung dieses Lastfalles in mehreren Normen. Als Beispiel sei hier der „Crush“-Test nach UL1642 genannt. Ebenso lässt sich in dieser Versuchsanordnung leicht ein elektrisches Versagen der Zelle provozieren, was zur Identifikation eines Kurzschlusskriteriums hilfreich und nötig ist. Da dieser Lastfall in Crashesituationen eher als unwahrscheinlich angesehen werden kann, dienen Versuche in dieser Konfiguration vor al-

lem der Entwicklung der Materialmodelle und werden daher ausschließlich im tief entladene Zustand durchgeführt.

3.3.2 Crush in Z-Richtung

Diese Anordnung wird ebenfalls mit Hinblick auf die Ermittlung von Daten zur Validierung des Zellenmodells in die Prüfmatrix aufgenommen. Eine Stauchung der Zelle in Richtung der Längsachse ist in realen Unfallsituation kaum zu erwarten, zur Bestimmung der Materialparameter aber bestens geeignet. Vor allem die Eigenschaften der Metalcan können bei axialer Belastung genau untersucht werden. Das Eindringen der Polkappe bewirkt eine Zerstörung der dort befindlichen Bauteile wie Sicherheitsventil und Dichtung. Dies lässt in dieser Versuchskonfiguration ein rasches Auftreten eines Kurzschlusses erwarten. Wird das elektrische Versagen einer Zelle durch derartige Beschädigungen hervorgerufen, so spricht man vom „äußeren“ Kurzschluss. Zur Ermittlung eines Versagenskriteriums ist jedoch der Fall des „inneren“ Kurzschlusses, welcher durch Überbeanspruchung der Aktivschichten im Zelleninneren hervorgerufen wird, von Bedeutung. Ein Test in dieser Versuchsanordnung mit voll geladenen Zellen würde keine zusätzlichen Erkenntnisse generieren und nur ein erhöhtes Risiko darstellen. Für die Versuche „Crush in Z-Richtung“ werden daher nur tief entladene Zellen verwendet.

3.3.3 Penetration

Im Falle eines Verkehrsunfalls muss mit dem Eindringen von stumpfen oder auch spitzen Gegenständen in das Batteriemodul gerechnet werden. Eine örtlich begrenzte Deformation einzelner Zellen, wie sie in dieser Versuchsanordnung nachgestellt werden soll, ist somit als Lastfall in Crashsituationen durchaus vorstellbar. Ebenso ist eine derartige Testkonfiguration unter der Bezeichnung „Impact“ häufig in Normen beschrieben. Hierbei liegt der Prüfling auf einer flachen Unterlage und wird durch einen zylindrischen Prüfkörper in radialer Richtung gequetscht. Als Beispiel sei hier SAEJ2464 [28] genannt. Der Durchmesser des Prüfkörpers wurde für die durchgeführten Experimente mit 20 mm festgelegt und stimmt somit mit der Vorgabe aus der Norm überein. Neben der Reproduktion einer möglichen, realen Unfallsituation können bei diesem Lastfall ebenso Messwerte gesammelt werden, welche zum Abgleichen des Simulationsmodells von Wert sind. Aufgrund dieser Tatsachen wird der „Penetration“-Test sowohl im Ladezustand 100 % SOC, als auch mit tief entladene Zellen durchgeführt.

3.3.4 3-Punkt-Biegung

Bei der „3-Punkt-Biegung“ wird die Zelle auf zwei zylindrischen Auflagern abgelegt. Ein ebenfalls zylindrischer Prüfkörper wirkt danach von oben auf den Prüfling ein, sodass dieser eine Biegebeanspruchung erfährt. Wie bereits zuvor beschrieben bewirkt dies eine Belastung des Prüflings auf zweierlei Art. Durchbiegung und lokale Deformation überlagern sich und setzen die Zelle einer kombinierten Last aus. Ein derartiger Lastfall ist bei Crashes durchaus im Bereich des Möglichen und soll daher im Folgenden genauer untersucht werden. Wie in der

Konfiguration „Penetration“ werden somit auch für die Tests in der Anordnung „3-Punkt-Biegung“ Zellen mit einem Ladezustand von 0 % und 100 % SOC herangezogen.

Für alle Versuche wird eine maximale Deformation von 10 mm gewählt. Dies ergibt sich aus den Vorgaben in verschiedenen Normen, welche eine Eindrückung der Prüflinge von zumindest 50 % ihres Durchmessers fordern. Im Falle einer Zelle vom Typ „18650“ ergibt dies einen Wert von 9 mm. Um dieses geforderte Maß im Experiment sicher zu erreichen, wurde eine Deformation von 10 mm festgelegt. Unterschiedliche Umgebungstemperaturen während der Durchführung der verschiedenen Versuche wurden vernachlässigt. Die folgende Tabelle 3.2 gibt einen Überblick über die gewählten Versuchsanordnungen und die zugehörigen Testparameter. Diese sind die Form des Prüfkörpers, die Richtung der Lastaufbringung, der Ladezustand der Zellen sowie die Anzahl der geplanten Versuchswiederholungen. Ebenso ist die Geometrie der Testkonfiguration schematisch dargestellt.

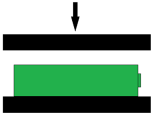
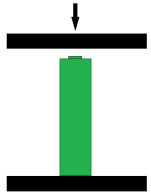
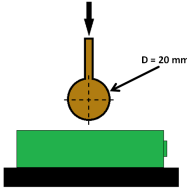
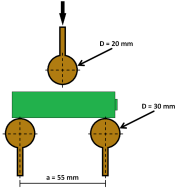
Konfiguration	Prüfkörper	Richtung	SOC	Anzahl	Geometrie
Crush X-Richtung	flach	radial (X)	0 %	5	
Crush Z-Richtung	flach	axial (Z)	0 %	5	
Penetration	zylindrisch	radial (X)	0 % 100 %	5 4	
3-Punkt-Biegung	zylindrisch	radial (X)	0 % 100 %	5 4	

Tabelle 3.2: Ausgewählte Lastfälle.

Kapitel 4

Versuche als Validierungsgrundlage

4.1 Motivation und Zielsetzung

Um ein möglichst realistisches Deformationsbild und reale Kraftverläufe im Simulationsmodell wiedergeben zu können, ist es nötig, die charakteristischen Materialkennwerte der Zelle zu ermitteln. Neben umfangreichen Experimenten mit der gesamten Zelle wurde das mechanische Verhalten der äußeren Metallhülse im Detail untersucht. Weiters wurde während der Versuche der elektrische Zustand der Zelle überwacht, sodass in Folge ein Zusammenhang zwischen mechanischen Belastungen oder Beschädigungen und dem elektrischen Verhalten hergestellt werden kann.

4.2 Spezifikation „Panasonic CGR-18650KA“

Die in dieser Arbeit gegenständliche Li-Ionen-Zelle mit der Produktbezeichnung „Panasonic CGR-18650KA“ basiert auf der so genannten „Panasonic Solid Solution Technology (PSS)“. Dies ist ein markenrechtlich geschütztes Herstellungsverfahren für Batterien auf Cobalt- oder Nickel-Basis. Das Verfahren bietet laut Hersteller stark verbesserte Sicherheit, außergewöhnliche Zuverlässigkeit und hohe Leistungsfähigkeit, wie sie für Cobalt-Zellen einzigartig ist. Im Gegensatz zu Batterien auf Mangan-Basis profitieren PSS-Zellen von einem geringeren Innenwiderstand und somit kleineren elektrischen Verlusten. Die dadurch gesteigerte elektrische Effizienz bewirkt eine höhere Leistung bei gleichzeitig geringerer Wärmeentwicklung, was wiederum der Lebensdauer zu Gute kommt [29]. Die wichtigsten Produktspezifikationen aus dem Datenblatt des Herstellers (siehe Anhang B) sind in der Aufstellung in Tabelle 4.1 angeführt. Abbildung 4.1 zeigt eine der verwendeten Zellen.

Elektrodenmaterial		
Positive Elektrode	LiCoO ₂	
Negative Elektrode	C (Graphit)	
Abmessungen		
Außendurchmesser, max.	18,6	mm
Gesamthöhe, max.	65,2	mm
Masse	43,5	g
Elektrische Kennzahlen		
Nennspannung	3,6	V
Ladeschlussspannung	4,2	V
Nennkapazität, min.	1,650	Ah
Nennkapazität, typ.	1,750	Ah
Energieinhalt	6,862	Wh
Energiedichte	387	Wh/L
Spezifische Energie	158	Wh/kg

Tabelle 4.1: Produktspezifikation „Panasonic CGR-18650KA“.



Abbildung 4.1: Ein Li-Ionen-Akkumulator vom Typ „Panasonic CGR-18650KA“.

Um ein umfassendes Verständnis über die verwendeten Batteriezellen zu erlangen, war es notwendig, einige Exemplare zu öffnen und deren konstruktiven Aufbau zu untersuchen. Von besonderem Interesse war in diesem Zusammenhang die Identifikation jener Bauteile, die eine mechanisch tragende Funktion übernehmen, um dadurch in einem späteren Schritt ein vereinfachtes, jedoch repräsentatives Modell für die Finite-Elemente-Berechnung extrahieren zu können. Die Auswahl dieser Bauteile beruhte in einem ersten Schritt auf einer Abschätzung und wurde im Verlauf der Arbeit durch Versuche und Simulationen bestätigt. Abbildung 4.2 zeigt eine schematische Darstellung eines typischen Batteriezellenaufbaus. Während der Öffnung der Zellen wurde eine umfassende Fotodokumentation der einzelnen Bestandteile der Zelle erstellt. Einen Überblick über die Konstruktion gibt der Querschnitt durch die Batterie in Abbildung 4.3.

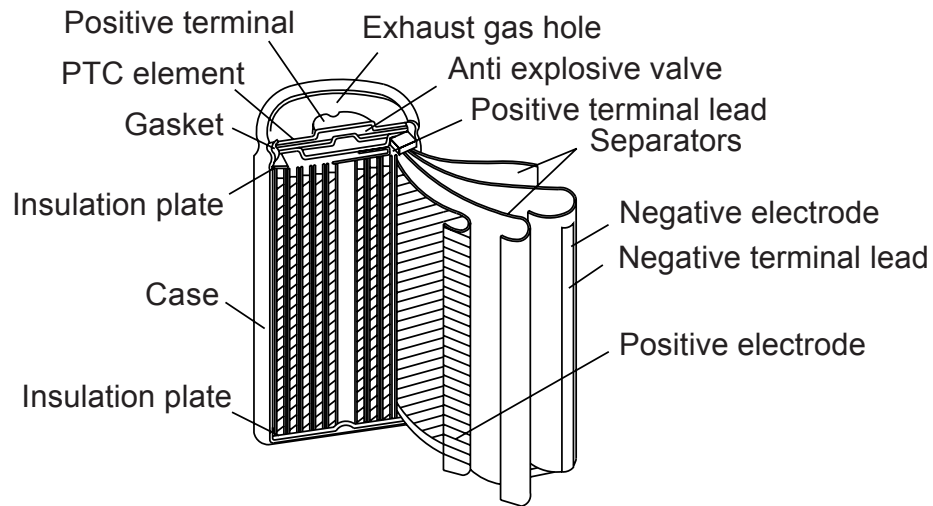


Abbildung 4.2: Schematische Darstellung einer 18650 Li-Ionen-Zelle [15].

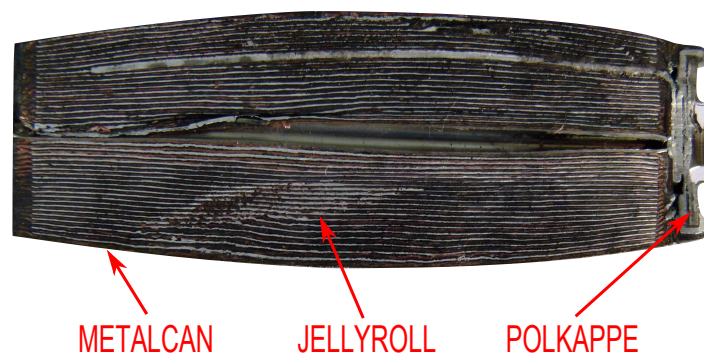


Abbildung 4.3: Schnitt durch eine 18650 Li-Ionen-Zelle.

4.3 Vorbereitung der Versuche

4.3.1 Sicherheitsvorkehrungen

Da Lithium-Ionen-Zellen, wie zuvor bereits beschrieben, gesundheitsschädliche Inhaltsstoffe beinhalten, wurde besonderes Augenmerk auf die Sicherheit bei der Öffnung gelegt. Zu diesem Zweck wurden säurebeständige Handschuhe sowie eine Atemschutzvollmaske verwendet. Die Öffnung wurde in einem gut belüfteten Raum durchgeführt, da die in einer Zelle enthaltenen Gefahrenstoffe zwar nicht in umweltschädlichen Mengen enthalten sind, trotzdem aber unter Umständen für den Menschen in nächster Nähe eine erhebliche Gefährdung darstellen können.

Im Gegensatz zu den identischen Versuchskonfigurationen mit entladenen Zellen, konnten die Tests mit voll aufgeladenen Zellen aus Sicherheitsgründen nicht im Labor des VSI durchgeführt werden. Um den hohen Sicherheitsansprüchen für Testpersonal und Umwelt gerecht zu werden, wurde die Prüfanlage am VSI abgebaut, verladen und am Übungsgelände der Feuerwehr- und Zivilschutzschule des Landesfeuerwehrverbandes Steiermark in Lebring [30] wieder aufgebaut und in Betrieb genommen. Das Testgelände befand sich im Freien, sodass eine ausreichende Verdünnung und ein schneller Abzug eventuell austretender, gesundheitsschädlicher Stoffe gewährleistet war. Ebenso waren, aufgrund der ständigen Anwesenheit des Feuerwehrpersonals und der Infrastruktur vor Ort, ausgezeichnete Bedingungen, für die Bekämpfung eventueller Brandfälle, gegeben.

Um während der Versuchsdurchführung mit geladenen Zellen Kurzschlüsse zu vermeiden, wurden die Prüfkörper isoliert und der Prüfling auf eine Kunststoffunterlage (Pertinax) gelegt. Somit konnte eine galvanische Trennung garantiert werden.

4.3.2 Ladezustand der Prüflinge

Die verschiedenen Lastkonfigurationen wurden mit ge- und entladenen Zellen durchgeführt. Obwohl Traktionsbatterien ab einem Ladezustand von 80 % SOC als „voll geladen“ bezeichnet werden, wurden die jeweiligen Zellen, der Norm ISO12405-1 [31] entsprechend, auf 100 % SOC gebracht. Hierzu wurden die Zellen zunächst auf Entladeschlussspannung (2,5 V) ent- und anschließend im CC/CV-Verfahren geladen. Die Charakteristiken für den Lade- bzw. Entladevorgang gemäß dem Herstellerdatenblatt (siehe Anhang B) finden sich in den Abbildungen 4.4 und 4.5. Jene Prüflinge, die im ungeladenen Zustand untersucht wurden, wurden vollständig nach Herstellerempfehlung entladen und danach, mithilfe eines Leistungswiderstandes, tief entladen. Somit wurde die in der Zelle gespeicherte Energie und die Gefahr elektrisch-chemischer Reaktionen auf ein Minimum reduziert.

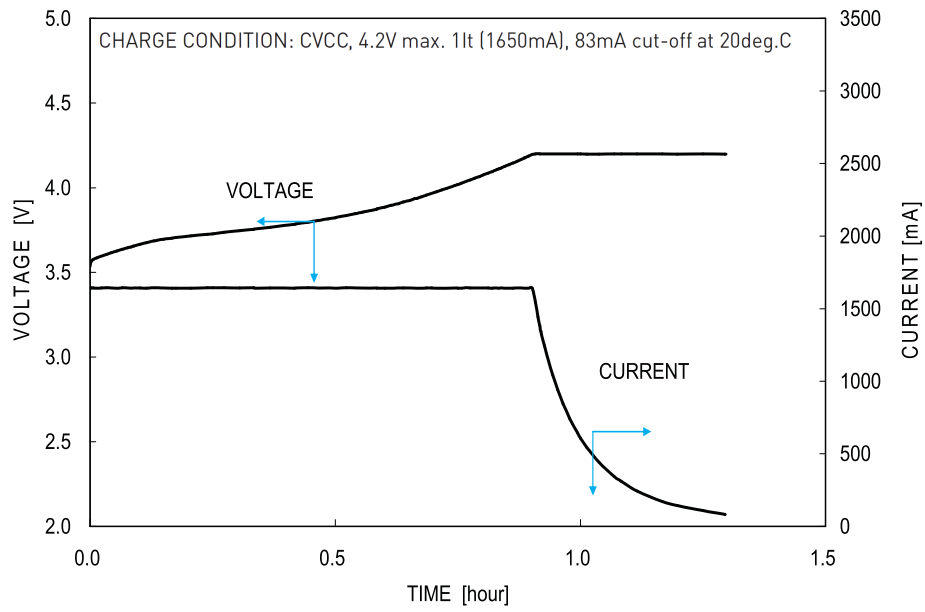


Abbildung 4.4: Vom Hersteller empfohlene Lade-Charakteristik [32].

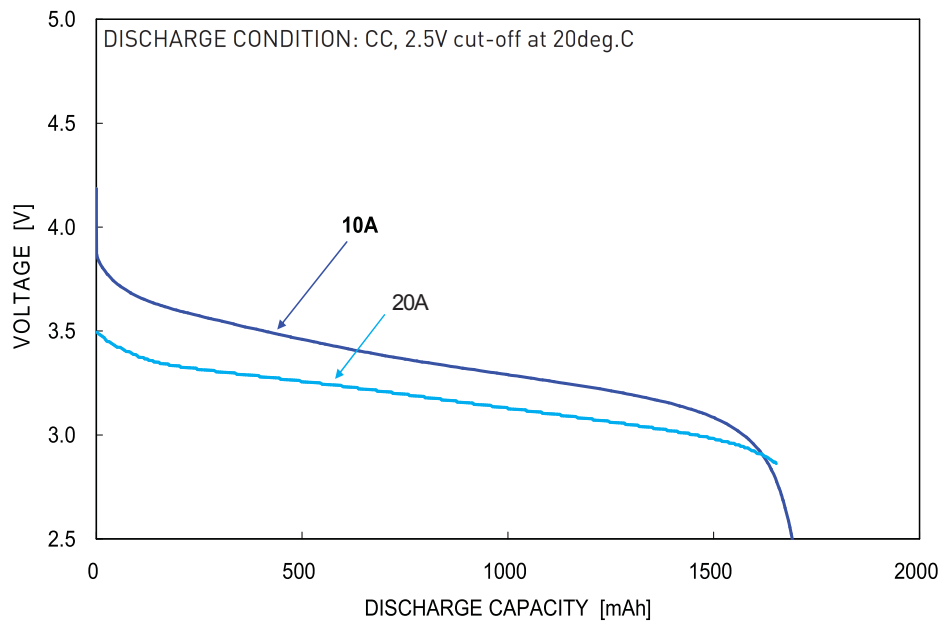


Abbildung 4.5: Vom Hersteller empfohlene Entlade-Charakteristik [32].

4.4 Test der Metalcan

Einen entscheidenden Anteil am Tragverhalten der Zelle hat die äußere Schutzhülle, die sogenannte „Metalcan“. Diese Hülse aus Nickelstahl umgibt die gesamte Zellchemie und schützt diese vor äußeren Einflüssen. In diesem Absatz werden jene Experimente beschrieben, welche zur Untersuchung der Metalcan durchgeführt wurden. Ziel dieser Versuche war, Material- und Bauteileigenschaften der Metalcan kennenzulernen, da im Datenblatt des Herstellers hierzu keine Angaben angeführt sind. Die Ergebnisse dieser Experimente schaffen somit eine Basis für die Validierung des Simulationsmodells. Die mit der Metalcan durchgeführten Tests entsprechen im Versuchsaufbau weitgehend jenen Lastfällen, welche in Kapitel 3 angeführt wurden. Als Prüfmaschine diente bei diesen Versuchen eine Zug/Druck-Prüfmaschine vom Typ „Thümler Z3-X500“ [33]. Als Messwertaufnehmer wurde ein Kraftaufnehmer des Typs „HBM U2B 5kN“ [34] verwendet. In der folgenden Auflistung sind die untersuchten Lastfälle genannt.

- Crush in X-Richtung
- Crush in Z-Richtung
- Penetration

4.4.1 Konfiguration „Crush in X-Richtung“

In dieser Konfiguration wird der Prüfling flach auf die untere Auflagefläche gelegt und zwischen zwei parallelen Platten gepresst. Die Messwerte aus diesen Versuchen dienen der Validierung des Simulationsmodells und sind in Abbildung 4.6 ersichtlich. Es wurden zwei Versuche durchgeführt, welche im Diagramm in schwarz bzw. rot dargestellt sind. Der Verlauf der Kraft-Weg-Kurven zeugt von einer sehr guten Reproduzierbarkeit, sodass, trotz der geringen Anzahl an Wiederholungen, das Ergebnis als repräsentativ angesehen werden kann. Der Boden der Metalcan wurde für diese Versuchsreihe entfernt, da man eine Symmetrie des Bauteils bewahren wollte. Die Deformation des Prüflings nach dem Versuch ist in Abbildung 4.7 zu sehen.

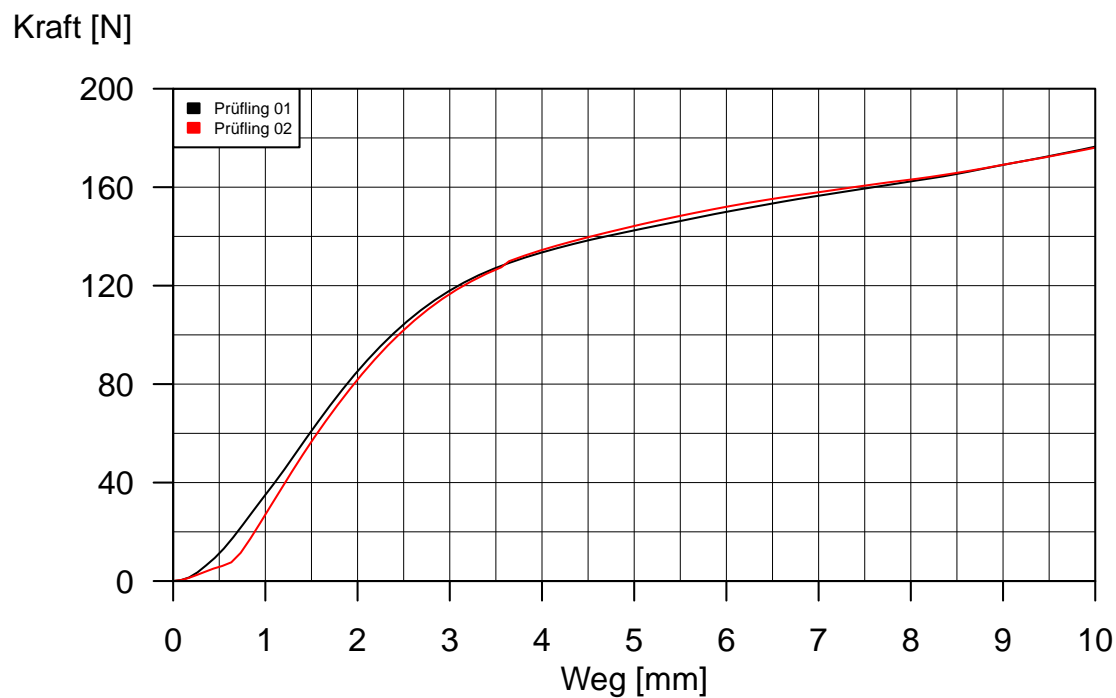


Abbildung 4.6: Kraft-Weg-Kurve der Metalcan bei „Crush in X-Richtung“.



Abbildung 4.7: Deformation der Metalcan bei „Crush in X-Richtung“.

4.4.2 Konfiguration „Crush in Z-Richtung“

Als nächstes wurde die Metalcan in Längsrichtung gestaucht. Aufgrund von Problemen bei der Datenerfassung während Versuch Nr. 01 bricht die Kurve bei etwa 7 mm Deformation ab. Für die Validierung des Materialmodells ist vor allem der Anfangsbereich der Kurve von Bedeutung, sodass dies vernachlässigt werden kann. Die Messdaten der Versuche sind in Abbildung 4.8 zu sehen. Der Anstieg der Kurven zu Beginn der Versuche stellt die Anstauchphase dar und repräsentiert somit den nötigen Kraftaufwand bis zum Einsetzen einer plastischen Deformation im Material. Die schwelende Amplitude der Kraft im weiteren Versuchsverlauf wird durch den eigentlichen Faltungsvorgang hervorgerufen. Die Faltung des Prüflings ist deutlich in Abbildung 4.9 erkennbar.

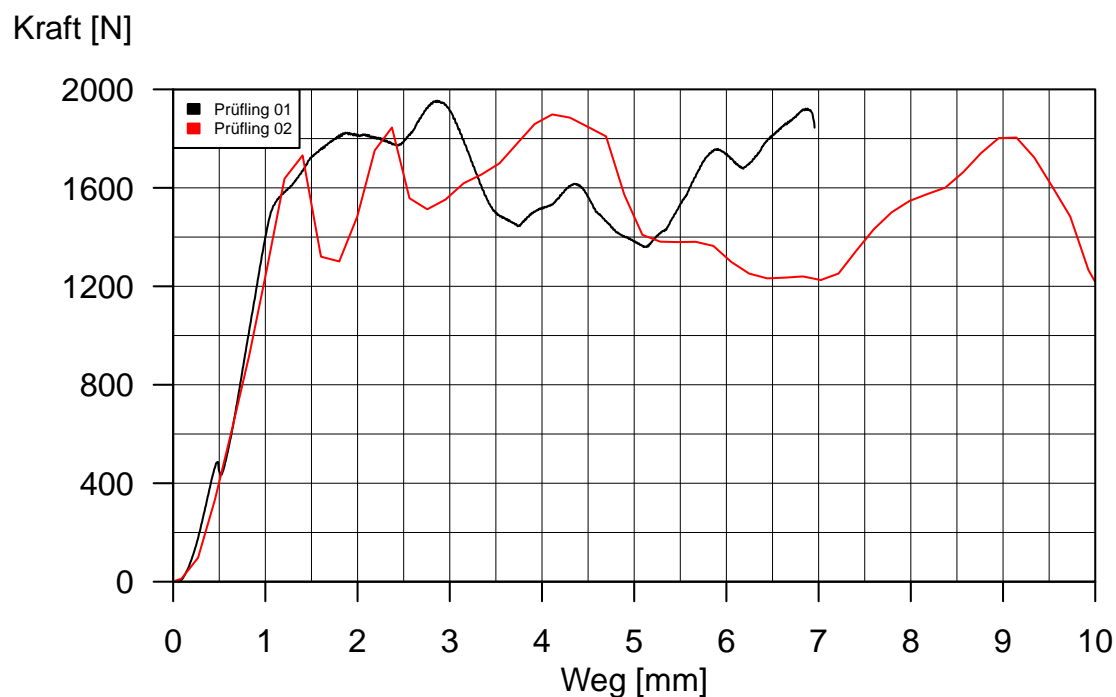


Abbildung 4.8: Kraft-Weg-Kurve der Metalcan bei „Crush in Z-Richtung“.



Abbildung 4.9: Deformation der Metalcan bei „Crush in Z-Richtung“.

4.4.3 Konfiguration „Penetration“

Als Abschluss der Tests mit der Metalcan wurde ein Penetrationsversuch mit einem Prüfkörper mit 10 mm Durchmesser durchgeführt. Abgesehen vom kleineren Durchmesser des Prüfkörpers entspricht diese Konfiguration jener in Tabelle 3.2 aus Kapitel 3. Die Verläufe der Messdaten sind in Abbildung 4.10 ersichtlich. Wiederum wurde, zum Erreichen eines symmetrischen Lastfalles, die Metallhülse ohne Boden verwendet. Abbildung 4.11 zeigt die Deformation des Prüflings nach dem „Penetration“-Test.

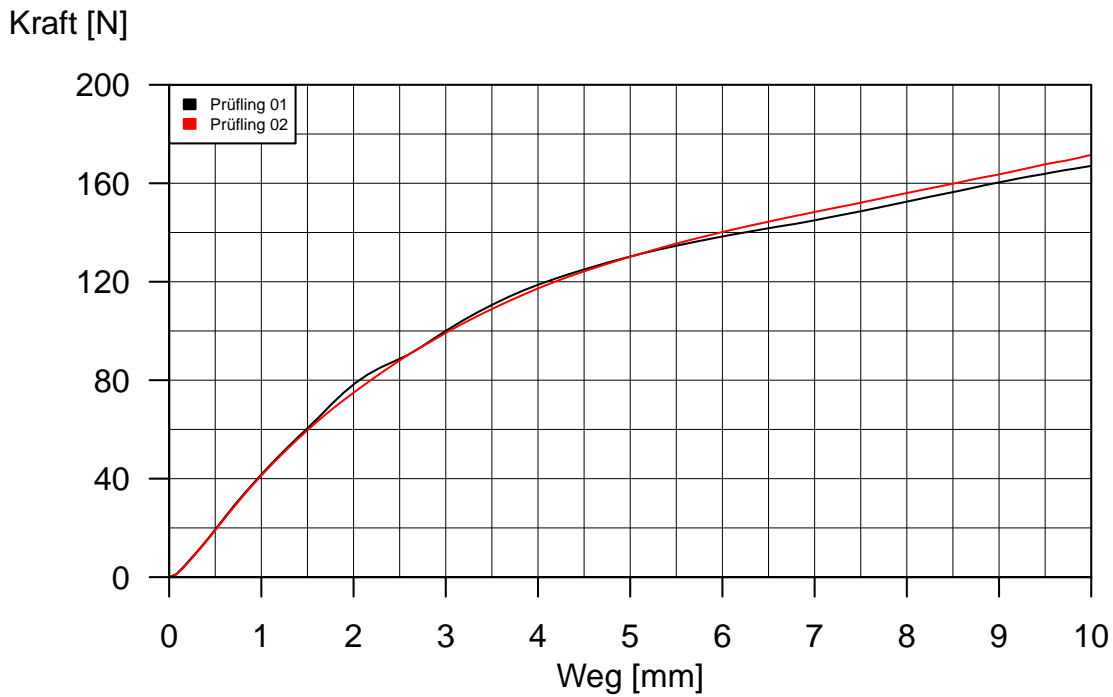


Abbildung 4.10: Kraft-Weg-Kurve der Metalcan bei „Penetration“.

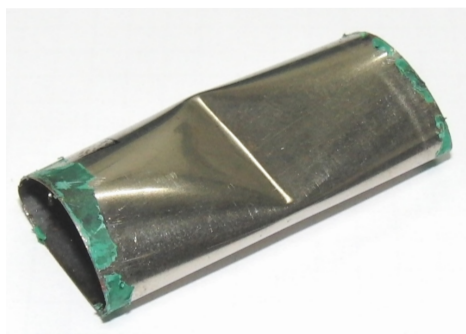


Abbildung 4.11: Deformation der Metalcan bei „Penetration“.

4.5 Test der gesamten Zelle

Nach den Tests der Metalcan wurden nun gesamte Zellen verschiedenen Prüfungen unterzogen. Diese Versuche wurden auf einer Prüfanlage des Instituts für Fahrzeugsicherheit durchgeführt, welche speziell zur Untersuchung von Batteriezellen entwickelt wurde [35]. Für die Datenaufzeichnung wurde ein Kraftaufnehmer des Typs „HBM C6A/500KN“ [36] verwendet.

4.5.1 Konfiguration „Crush in X-Richtung“

Zunächst wurden Versuche in der Konfiguration „Crush in X-Richtung“ in tief entladene Zustand durchgeführt. Abbildung 4.12 zeigt den schematischen Versuchsaufbau und die Position des Prüflings vor dem Test. Der Pluspol der Batterie befindet sich in der Abbildung rechts.

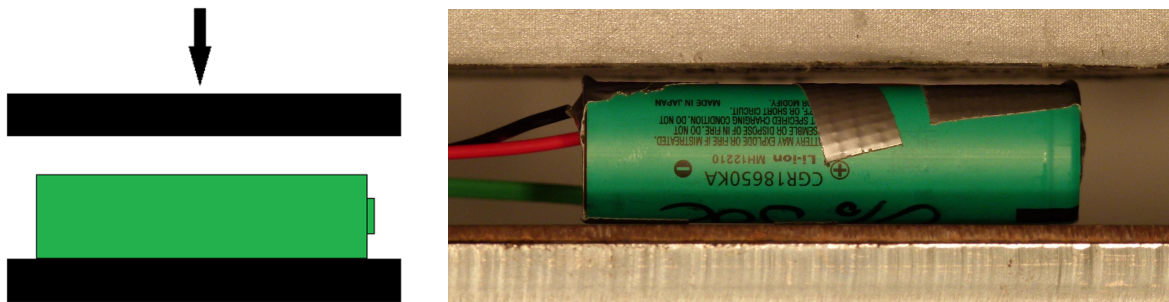


Abbildung 4.12: Konfiguration „Crush in X-Richtung“.

Die Abbildung 4.13 zeigt die Prüflinge der Versuche Nr. 01 bis Nr. 04 nach dem Test. Abgesehen von Versuch Nr. 01 weisen alle Zellen einen deutlichen Riss in der äußeren Hülse und im Folienwickel auf. Eine Detailaufnahme des Prüflings nach Versuch Nr. 04 ist in Abbildung 4.14 ersichtlich. Hierbei ist der geschichtete Aufbau des Folienwickels klar zu erkennen.



Abbildung 4.13: Zellen Nr. 01 bis Nr. 04 nach dem Test.



Abbildung 4.14: Detailansicht nach dem Versuch Nr. 04.

Die Kraft-Weg-Kurven der Versuche Nr. 03 und 04 sind in Abbildung 4.15 dargestellt und beginnen relativ flach ansteigend bis ca. 10.000 N bei 5 mm Deformation. Anschließend erfolgt ein steiler Anstieg auf knapp über 80.000 N. Die Werte beider Versuche sind bis zu einer Verformung von ca. 6,5 mm bei einem Kraftniveau von etwa 30.000 N nahezu identisch. Der weitere Anstieg erfolgte in Versuch Nr. 03 mit etwas größerer Steigung, wodurch der Peak im Kraftverlauf bei einer Eindrückung von etwa 8 mm, um 1 mm früher als bei Versuch Nr. 04, eintrat. Der Spannungsabfall trat bei Versuch Nr. 03 bei 7,4 mm Eindrückung, bei Versuch Nr. 04 bei 8,7 mm Deformation auf. Die Spannungen der Prüflinge sind im Diagramm mit dünner Linie eingezeichnet und beginnen bei einem Wert von etwa 3,2 V. Relativ zum Peak in der Kraft-Weg-Kurve gesehen, trat der Spannungsabfall bei 90 % respektive 94 % Verformung auf. Aufgrund von Problemen mit der Messtechnik lieferten nur die Versuche Nr. 03 und Nr. 04 aussagekräftige Daten.

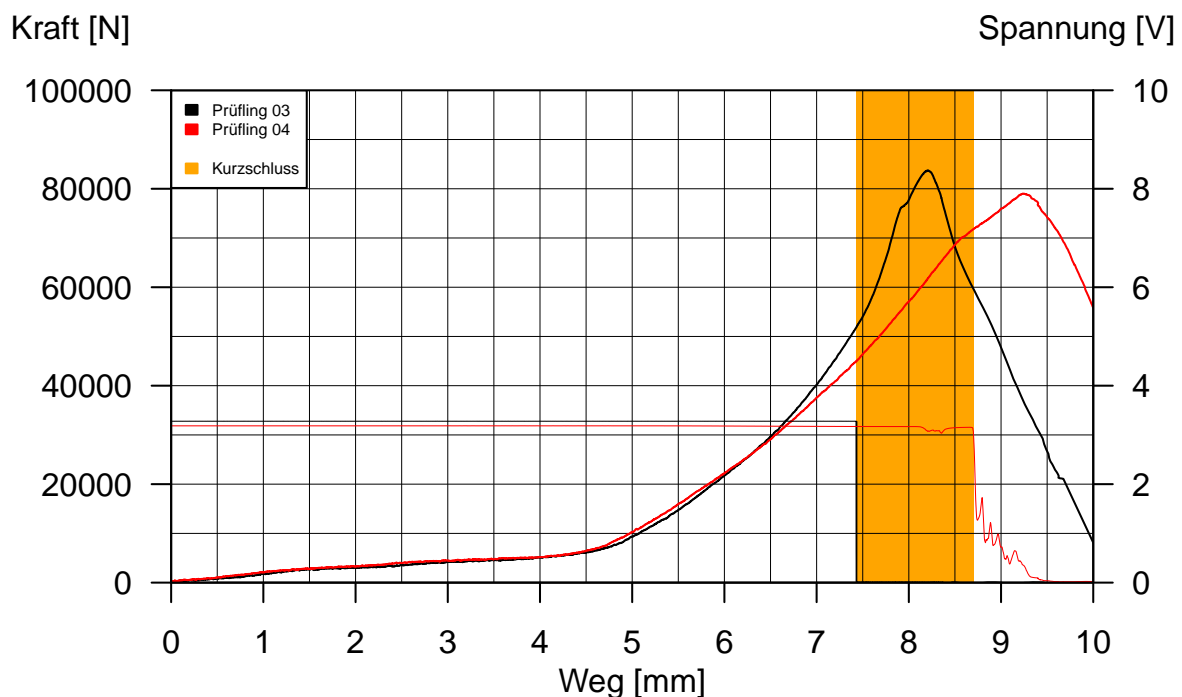


Abbildung 4.15: Kraft-Weg-Kurve bei „Crush in X-Richtung“.

Trotz der etwas abweichenden Kraftverläufe ab 6,5 mm Deformation kann die Reproduzierbarkeit der Versuche als ausreichend angesehen werden. Beide Kurven verlaufen anfangs nahezu identisch und weisen einen Spannungsabfall bei etwas über 90 % Verformung in Bezug auf die maximale Prüfkraft auf. Der Bereich des Auftrittes der Kurzschlussereignisse ist in der Abbildung als Band eingezeichnet. Vor allem jener Bereich der Kraft-Weg-Kurve vor dem ersten Auftreten eines Kurzschlusses ist für die Entwicklung eines Simulationsmodells zur Vorhersage des Zellversagens von besonderem Interesse. Die Ergebnisse dieses Versuches sind somit zur Modellvalidierung und zum Finden eines Versagenskriteriums bestens geeignet.

4.5.2 Konfiguration „Crush in Z-Richtung“

Abbildung 4.16 zeigt die Position der Zelle vor Beginn des Versuches „Crush in Z-Richtung“. In der Abbildung ist, repräsentativ für alle weiteren Versuche, die Konfiguration für Versuch Nr. 03 dargestellt. Gut erkennbar sind die Drähte zur Messung der Zellspannung, sowie die elektrisch nicht leitfähige Kunststoffplatte zwischen Zelle und Auflage zur Vermeidung eines ungewollten Kurzschlusses über die Prüfanlage.

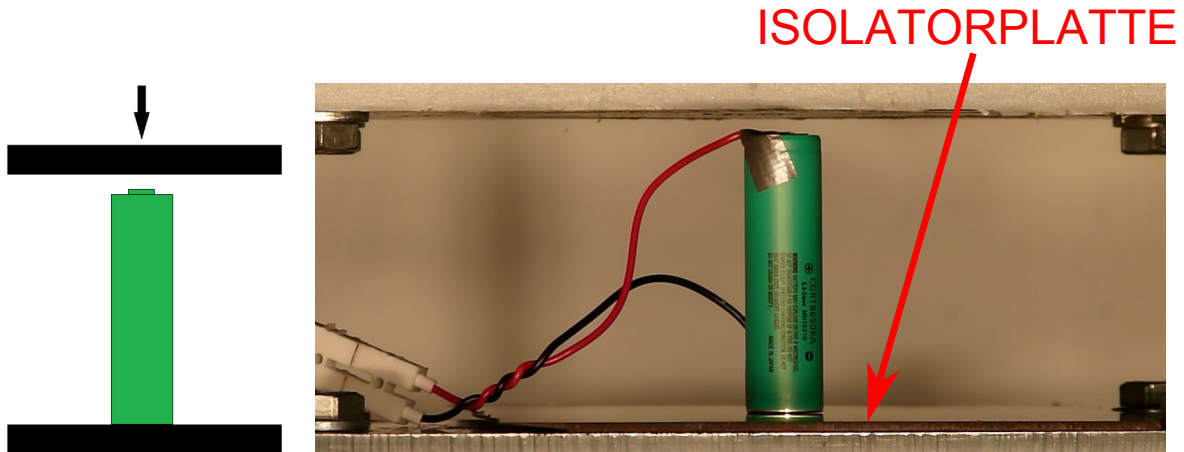


Abbildung 4.16: Konfiguration „Crush in Z-Richtung“.

Insgesamt wurden in dieser Konfiguration sechs Wiederholungen durchgeführt, wobei die Versuche Nr. 01 und Nr. 05 durch Fehler während der Messung keine brauchbaren Daten lieferten und somit in weiterer Folge keine Beachtung erfuhren. Die Deformationen einer Zelle nach diesem Versuch sind in Abbildung 4.17 zu sehen. Alle Versuche zeigten ein ähnliches Deformationsbild mit aufgerissener Metalcan und dadurch sichtbarem Folienwickel.



Abbildung 4.17: Zelle Nr. 03 nach dem Versuch.

Abbildung 4.18 zeigt die aufgezeichneten Kraftverläufe und den Kurzschlussbereich, in dem bei allen Zellen das elektrische Versagen eintrat. Die Kraft-Weg-Kuren zeigen bis zu einer Deformation von ca. 5 mm bei einer Kraft bei etwa 8.000 N eine sehr gute Übereinstimmung.

Gleich den Verläufen der Kraftmessung sind auch die Ergebnisse der Spannungsmessung nahezu identisch. Im Bereich zwischen 3,4 mm und 4,4 mm Stauchung bricht bei allen Zellen die anfängliche Spannung ein und konvergiert umgekehrt exponentiell gegen Null.

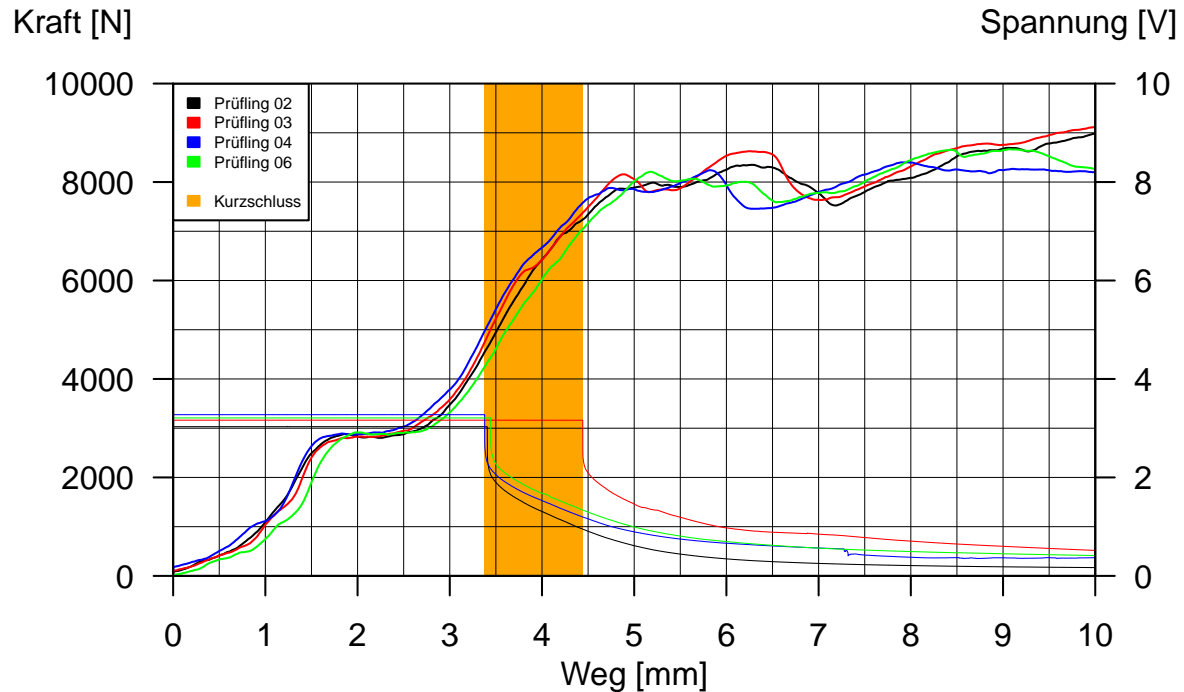


Abbildung 4.18: Kraft-Weg-Kurve bei „Crush in Z-Richtung“.

Das anfängliche Zwischenplateau um 3.000 N trat bei allen durchgeführten Versuchen auf und könnte auf ein Ausknicken des mittig angeordneten Stahlrohres zurückzuführen sein. Der weitere Anstieg ist bei allen Versuchen nahezu ident und stellt die Summensteifigkeit aller Bauteile der Zelle in Längsrichtung dar. Kurz vor Erreichen des Kraftniveaus um 8.000 N trat bei allen Zellen ein Spannungseinbruch auf. Dieser Spannungsabfall kann als Kurzschluss und somit als Versagen der Zelle gedeutet werden. Das Kurzschlussereignis ist in Zusammenhang mit dem Berühren elektrisch gegensinnig gepolter Bauteile in der Zelle zu erklären. Hierfür kann ein Durchstoßen von Isolatorschichten durch das Stahlrohr als Ursache angenommen werden. Die Verläufe der Kraft-Weg-Kurven nach dem Kurzschluss sind für das, in weiterer Folge geforderte, Simulationsmodell nicht mehr von Bedeutung, da der Schadensfall bzw. das Versagen der Zelle bereits eingetreten ist. Die Spannungsverläufe nach dem Auftritt des Kurzschlusses zeigen, gleich wie bei den Versuchen der Konfiguration „Crush in X-Richtung“, eine exponentielle Abnahme bis 0 V. Durch den Kurzschluss wurde somit die gesamte, nach dem Entladen vor Testbeginn noch in der Zelle vorhandene, elektrische Energie abgebaut. Da der Ladezustand der Zellen bei 0 % SOC beziehungsweise, durch das anschließende Tiefentladen, noch darunter lag, war nicht genügend Energie vorhanden, um gefährliche thermische Reaktionen anzustoßen. Eine subjektive, mäßige Erwärmung der Prüflinge war nach den Tests jedoch feststellbar.

4.5.3 Konfiguration „Penetration“

Für die Versuche in der Konfiguration „Penetration“ wurde der, in Abbildung 4.19 ersichtliche, Versuchsaufbau verwendet. Die Prüflinge wurden hierbei parallel zur Unterlage auf eine elektrisch isolierende Kunststoffplatte gelegt und radial (in X-Richtung) penetriert. Die folgenden Versuche wurden mit großer Aufmerksamkeit beobachtet, da ein Auftreten dieser Konfiguration in Unfallsituationen aufgrund der Einbaulage sehr wahrscheinlich ist. Ebenso wird diesem Lastfall in der einschlägigen Literatur (siehe Kapitel 3) besondere Beachtung geschenkt.

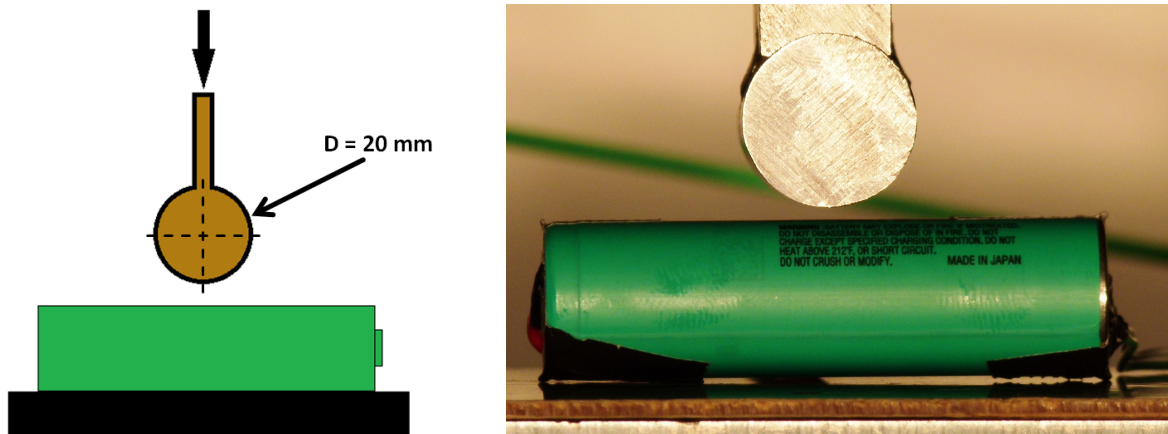


Abbildung 4.19: Konfiguration „Penetration“.

Abbildung 4.20 zeigt eine Zelle nach dem Versuch in seitlicher Ansicht. In dieser Abbildung ist deutlich das Abheben der Zellkappe und das teilweise Hervortreten des Folienwickels erkennbar.



Abbildung 4.20: Deformation der Zelle nach einem Penetrations-Versuch.

Die Kraft-Weg-Kurven der Versuche sind in Abbildung 4.21 zu sehen und zeigen einen sehr ähnlichen Verlauf mit Anstieg bis zum Auftreten des Kurzschlusses in einem Bereich von 9,4 bis 9,9 mm Deformation. Ein früher Spannungsabfall wie bei Versuch Nr. 04 trat bei allen übrigen Testwiederholungen nicht auf und kann somit als Ausreißer betrachtet werden. Für eine statistisch repräsentative Aussage müssten in diesem Fall jedoch weitere Versuche durchgeführt werden.

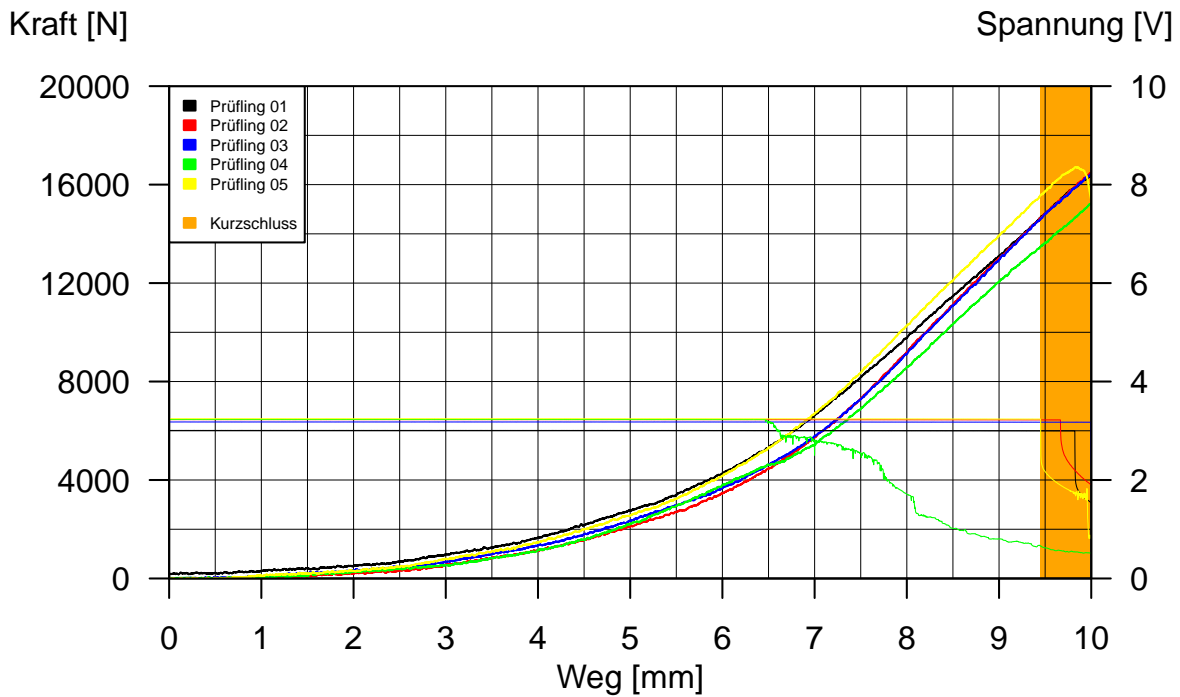


Abbildung 4.21: Kraft-Weg-Kurve bei „Penetration“ mit 0 % SOC.

Ebenfalls wurden in der Konfiguration „Penetration“ Versuche mit geladenen Zellen durchgeführt. Anordnung des Versuchsaufbaus und die Ausgangsposition der Prüflinge ist identisch zu den Tests mit einem Ladezustand von 0 % SOC. Bei der Durchführung dieser Versuche kam es teilweise zu heftigen thermischen Reaktionen der getesteten Zellen. Die mechanische Beschädigung löste bei den meisten Versuchswiederholungen eine explosionsartige Zerstörung der Prüflinge, gefolgt von einem lauten Knall, aus. Die Kappe am elektrischen Pluspol wurde hierbei aus der Metallhülse heraus getrieben, wodurch der Folienwickel mit den elektrisch aktiven Schichten und das zentrale Stahlrohr austraten. Jene Teilstücke, die aus der Hülse herausgeschleudert wurden und die Metalcan selbst waren kurz nach dem Ereignis heiß bzw. rotglühend. Die übrigen Versuche, bei denen keine derart heftige Reaktion auftrat, zeigten den Eintritt mechanischer und elektrischer Fehlfunktion durch deutliche Rauchentwicklung an. Abbildung 4.22 zeigt die, nach dem Versuch wieder eingesammelten, Bruchstücke des Tests Nr. 02.

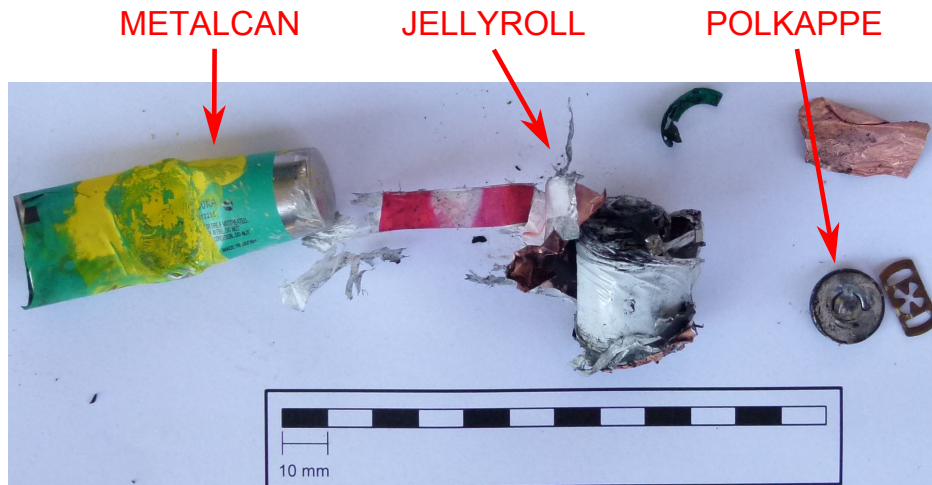


Abbildung 4.22: Zelle Nr. 02 nach dem Penetrations-Versuch mit 100 % SOC.

Abbildung 4.23 zeigt eine Aufnahme der Infrarotkamera unmittelbar nach dem Spannungsabfall. Eine Zone hoher Temperatur nahe dem Pluspol, vermutlich der tatsächliche Ort des ersten Auftretens eines Kurzschlusses, ist im Infrarotbild deutlich als weißer Punkt erkennbar.

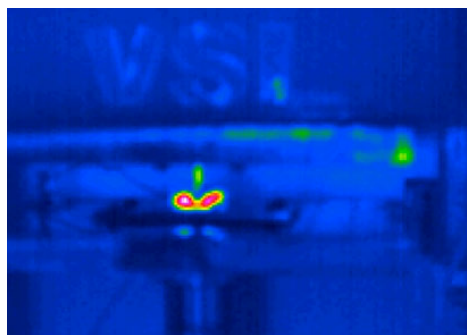


Abbildung 4.23: Infrarotbild bei „Penetration“ mit 100 % SOC.

Die Daten der Kraft-Weg-Messung, ersichtlich im Diagramm in Abbildung 4.24, zeigen einen Anstieg der Prüfkraft auf knapp unter 22.000 N. Die gemessenen Zellspannungen beginnen bei allen Versuchen mit einem Wert von etwa 4,2 V, was der Ladeschlussspannung der Zellen entspricht. Der Spannungsabfall tritt, gleichzeitig mit Erreichen der jeweiligen Maximalkraft, zwischen 8,6 und 9,1 mm Eindrückung auf. Die Versuche Nr. 01 und Nr. 02 wurden nach der Explosion der Zelle abgebrochen, was im Diagramm am Enden der Kraft-Weg-Kurven und der Spannungsaufzeichnung vor dem Erreichen der geplanten 10 mm Deformation zu erkennen ist.

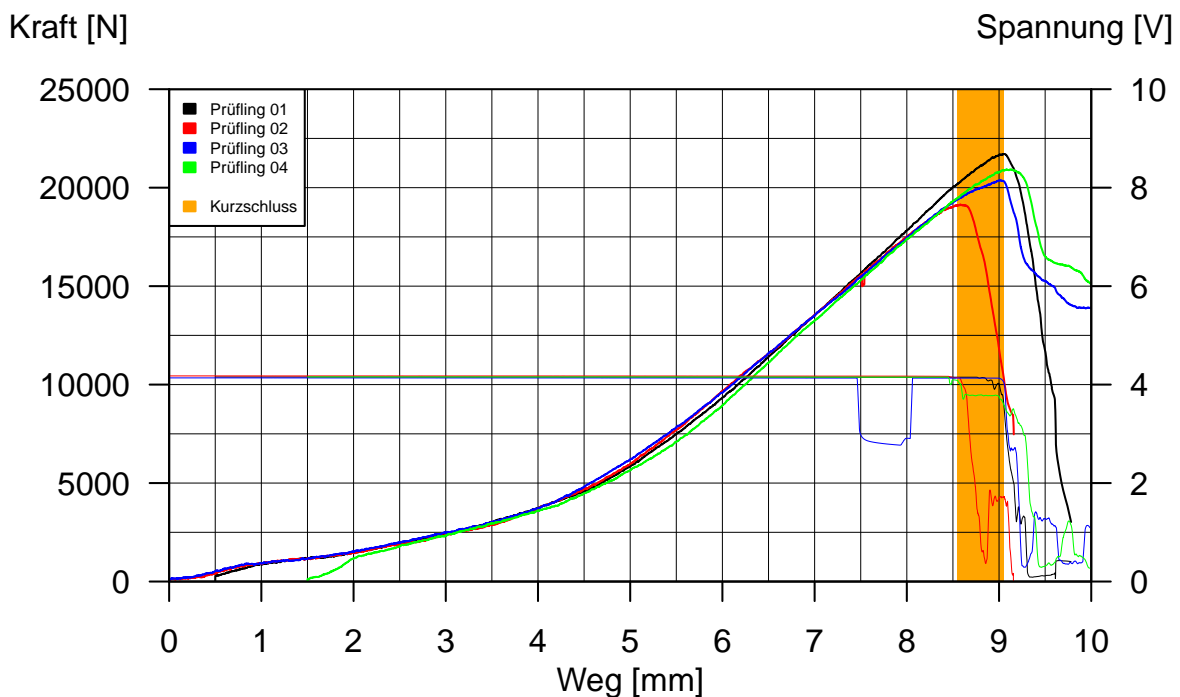


Abbildung 4.24: Kraft-Weg-Kurve bei „Penetration“ mit 100 % SOC.

Die gute Wiederholgenauigkeit der Kraft-Weg-Kurven aller Versuche kann abermals als sehr gute Grundlage für die Validierung des mechanischen Simulationsmodells gesehen werden. Ebenso dient das schmale Band des Kurzschlussauftrittes und die Lokalisierung desselben anhand der Infrarotaufnahme als solide Basis zur Entwicklung eines Versagenskriteriums. Die explosionsartige Zerstörung der Zelle während der Versuchsdurchführung bewirkte ein Loslösen des Thermoelements, sodass bei diesen Versuchswiederholungen kein Temperaturverlauf aufgezeichnet werden konnte. Jene Versuche, die nur mit Rauchentwicklung und Ausgasen reagierten, erreichten Temperaturen von über 100 °C. Dies zeigt das thermische Gefahrenpotenzial einer einzelnen Li-Ionen-Zelle deutlich auf.

4.5.4 Konfiguration „3-Punkt-Biegung“

Wie bereits in Kapitel 3 erwähnt, ist diese Versuchskonfiguration von besonderem Interesse für die Entwicklung eines Simulationsmodells. Gleichzeitig ist im Falle eines Unfalls eine derartige Belastung der Zelle vorstellbar. Aus diesem Grund wurde dieser Lastfall einer genauen Untersuchung unterzogen, wozu die folgenden Versuche mit ungeladenen (0 % SOC) und geladenen (100 % SOC) Zellen durchgeführt wurden. In Abbildung 4.25 ist die Ausgangslage des Prüflings vor dem Test zu sehen.

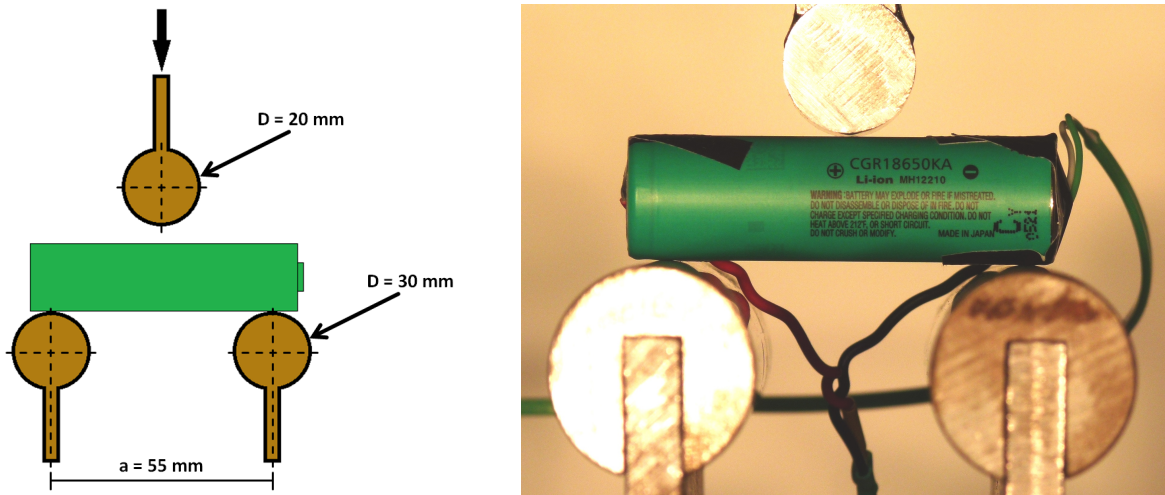


Abbildung 4.25: Konfiguration „3-Punkt-Biegung“.

Wie bei den vorhergehenden Konfiguration trat auch bei diesen Versuchen ein Riss der Metallhülle auf. Die deformierte Zelle nach Versuch Nr. 03 ist in Abbildung 4.26 dargestellt.



Abbildung 4.26: Deformation der Zelle nach einem 3-Punkt-Biege-Versuch.

Abbildung 4.27 zeigt die Kraft-Weg-Kurve während der Versuchsdurchführung in ungeladenem Zustand. Ähnlich allen vorhergegangenen Versuchen ist auch in diesem Fall eine gute Wiederholgenauigkeit gegeben. Die Kraftverläufe der Versuche unterteilen sich grob in zwei Abschnitte. Der erste Abschnitt ist durch einen leicht S-förmigen Anstieg gekennzeichnet, der in einem Peak um 3.500 N bei etwa 8 mm Deformation endet und von einem abrupten Abfall gefolgt wird. Während der Versuchsdurchführung konnte bis zu einer Verformung von 10 mm kein elektrisches Versagen festgestellt werden.

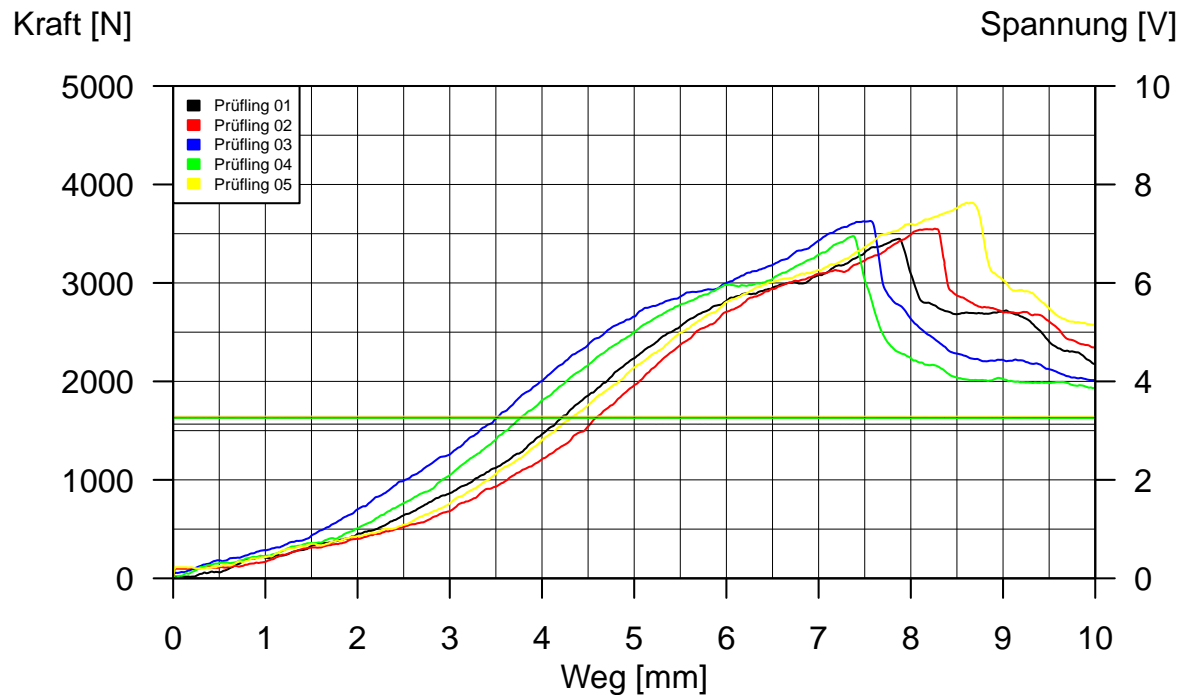


Abbildung 4.27: Kraft-Weg-Kurve bei „3-Punkt-Biegung“ mit 0 % SOC.

Für den plötzlichen Abfall der Prüfkraft bei einer Deformation von etwa 8 mm konnten nach genauer Untersuchung zwei Ursachen gefunden werden. Einerseits ist ein Knicken des zentralen Stahlrohres an dieser Stelle möglich, was zu einem Zusammenbruch des tragenden Verbandes der Zelle führt. Weiter konnte, im Zuge der Auswertung der Videodaten, in diesem Bereich das Einsetzen der Rissbildung in der Metalcan beobachtet werden. Eindeutig kann der Einbruch der Kraft derzeit aber nicht zugewiesen werden.

Zusätzlich wurden in gleicher Versuchskonfiguration Tests mit Zellen durchgeführt, deren Ladezustand 100 % SOC betrug. Die Konfiguration des Versuchsaufbaus bei diesen Tests ist identisch zu jener bei den Versuchen mit ungeladenen Zellen. Während der Durchführung der Versuche kam es zu mäßiger Rauchentwicklung und dem Austritt von Elektrolytflüssigkeit aus den Zellen. Das Diagramm in Abbildung 4.28 zeigt die Verläufe der Prüfkraft und der Zellenspannung über der Deformation. In dieser Versuchskonfiguration wurden vier Wiederholungen durchgeführt. Nach einem anfänglichen Anstieg der Prüfkraft auf etwa 4.500 N bei einer Deformation von 7 bis 8 mm, fallen die Kurven auf Werte bei etwa 2.500 N und sinken danach weiter leicht ab. Die Spannungsmessung zeigt zu Beginn konstante Werte um 4,2 V. Bis zu einer Eindrückung von 10 mm tritt bei keinem Prüfling der elektrische Versagensfall ein.

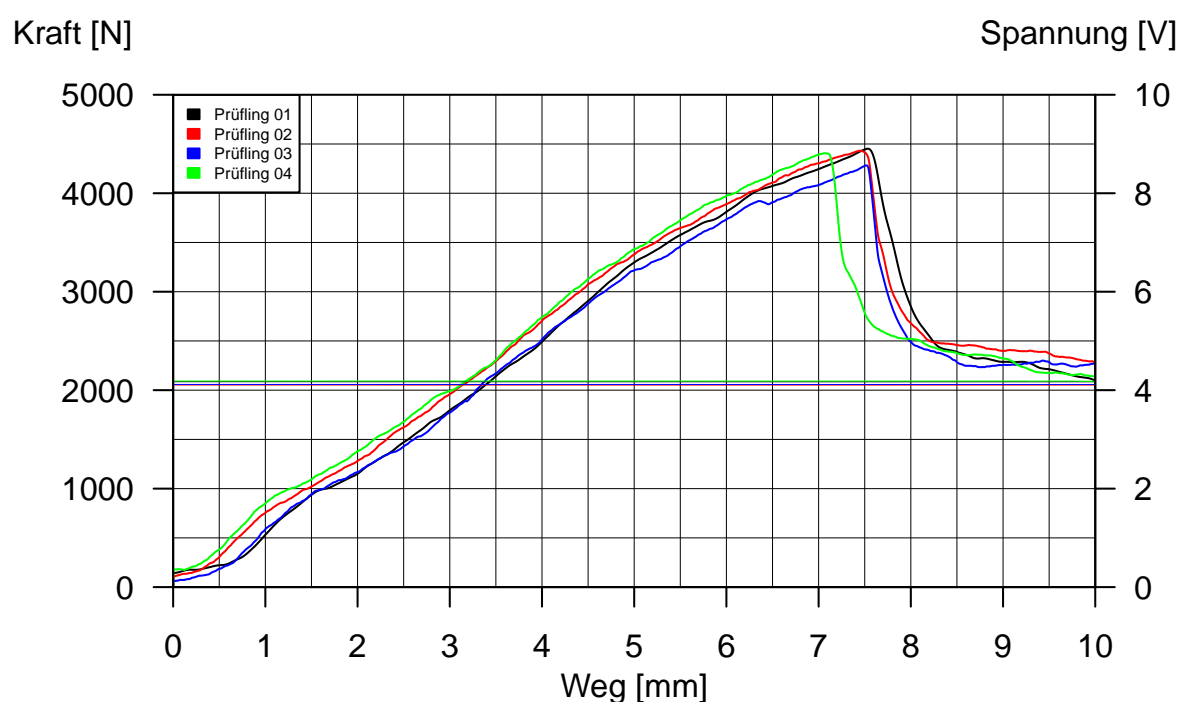


Abbildung 4.28: Kraft-Weg-Kurve bei „3-Punkt-Biegung“ mit 100 % SOC.

Prinzipiell weisen die aufgezeichneten Messwerte eine sehr gute Übereinstimmung und Reproduzierbarkeit untereinander auf und eignen sich daher gut als Validierungsgrundlage für das Simulationsmodell.

4.5.5 Vergleich der Versuche mit 0 % und 100 % SOC

Ein Vergleich der Versuche „Penetration“ bzw. „3-Punkt-Biegung“ mit tief entladenen bzw. voll geladenen Zellen ist in den Abbildungen 4.29 und 4.30 auf den nächsten Seiten zu sehen. Bei beiden Versuchskonfigurationen ist deutlich erkennbar, dass die aufzubringende Prüfkraft im geladenen Zustand höhere Werte erreicht und etwas steilere Gradienten aufweist, als im ungeladenen Fall. Auch kann man in der Konfiguration „Penetration“ ein etwas früheres Auftreten des Kurzschlussereignisses im entladenen Zustand erkennen. Der frühzeitige Abfall der Spannung eines Versuches mit 0 % SOC in Abbildung 4.29 stellt eine Ausnahme dar und könnte als Ausreißer betrachtet werden.

Eine mögliche Erklärung für dieses abweichende Verhalten bei verschiedenen Ladungszuständen könnten die unterschiedlichen Außentemperaturen sein, bei denen die Versuche durchgeführt wurden. Während die Tests mit ungeladenen Zellen im Labor des VSI bei Raumtemperatur (ca. 20 °C) durchgeführt wurden, fanden die geladenen Versuche, aus den weiter oben bereits erwähnten sicherheitstechnischen Gründen, im Freien bei tieferen Temperaturen (ca. -5 °C) statt. Die Temperaturen während der Freiluft-Tests befanden sich im einstelligen Bereich unter Null. Obwohl die Prüflinge in beheizter Umgebung aufbewahrt wurden und nur kurz vor Testbeginn den kalten Umgebungstemperaturen ausgesetzt waren, muss von einer unterschiedlichen Zelltemperatur zu den ungeladenen Versuchen und somit abweichenden Testbedingungen ausgegangen werden.

Eine weitere Theorie zur unterschiedlichen mechanischen Steifigkeit geladener gegenüber ungeladener Zellen folgt aus den elektrochemischen Prozessen im Inneren der Batterien. Während des Ladevorganges lagern sich Lithium-Ionen in die Kristallgitter-Ebenen der Graphit-Anode ein. Einlagerungsvorgänge dieser Art werden „Interkalation“ genannt. Die hierdurch entstandene Verbindung weist gegenüber reinem Graphit eine merkbare Vergrößerung des Abstandes zwischen den einzelnen Gitterschichten auf. Hieraus ergibt sich eine Volumenzunahme, die der Theorie nach bei 9 % liegt [10]. Durch diese Ausdehnung verändert sich die Geometrie und demgemäß das Widerstandsmoment des Folienwickels mit den elektrisch aktiven Schichten. Weiters könnte diese Ausdehnung zu einer höheren Pressung der Schichten aneinander bzw. gegen die Metalcan führen, sodass die Reibkraft zwischen den Lagen zunimmt. Der steilere Anstieg der Prüfkraft und das höhere erreichte Niveau derselben könnten durch diese beiden Effekte begründet werden. Um diese Theorie zukünftig zu bestätigen wären vergleichende Messungen des Zellendurchmessers im geladenen und ungeladenen Zustand nötig.

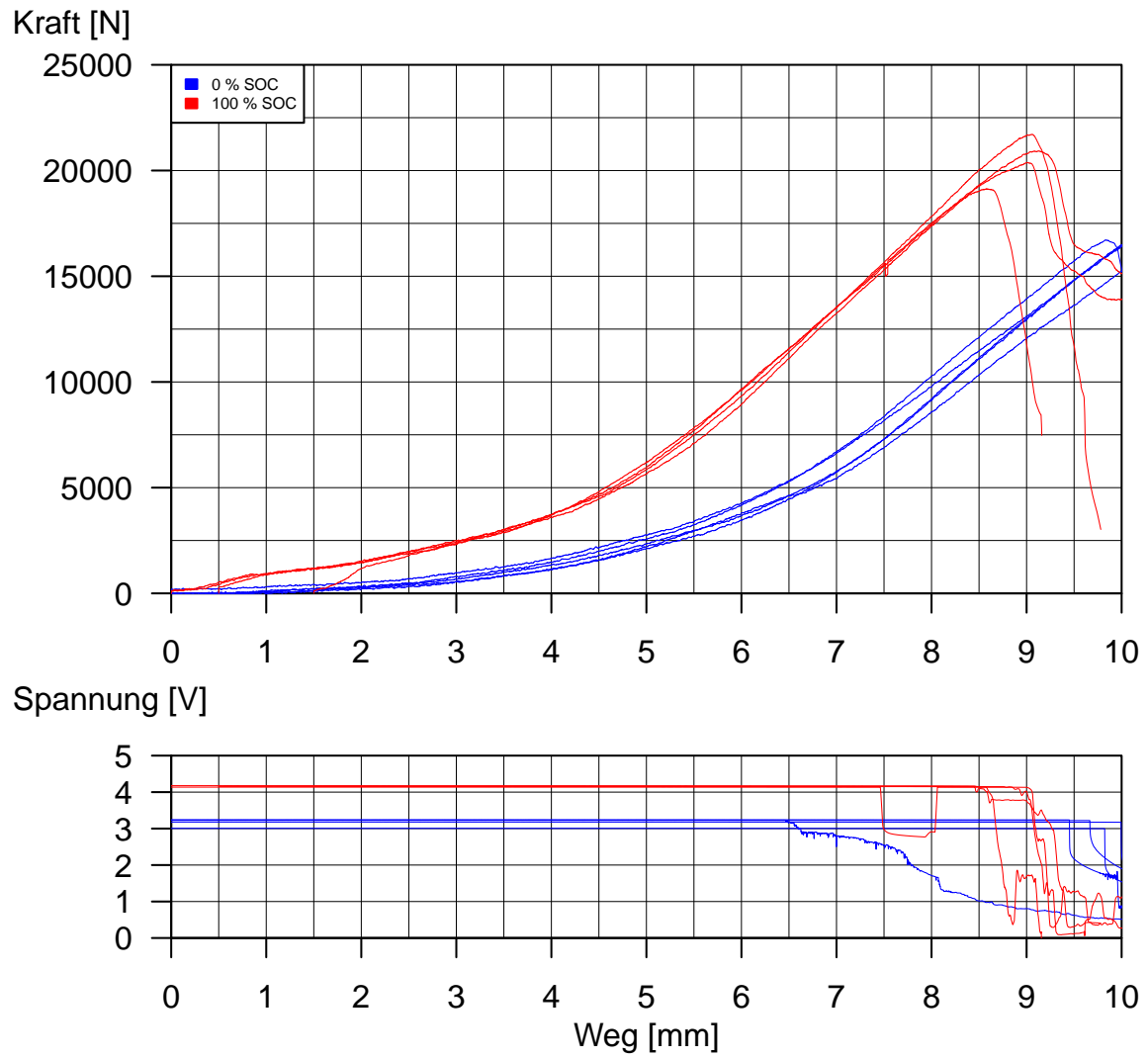


Abbildung 4.29: Vergleich „Penetration“ mit 0% und 100 % SOC.

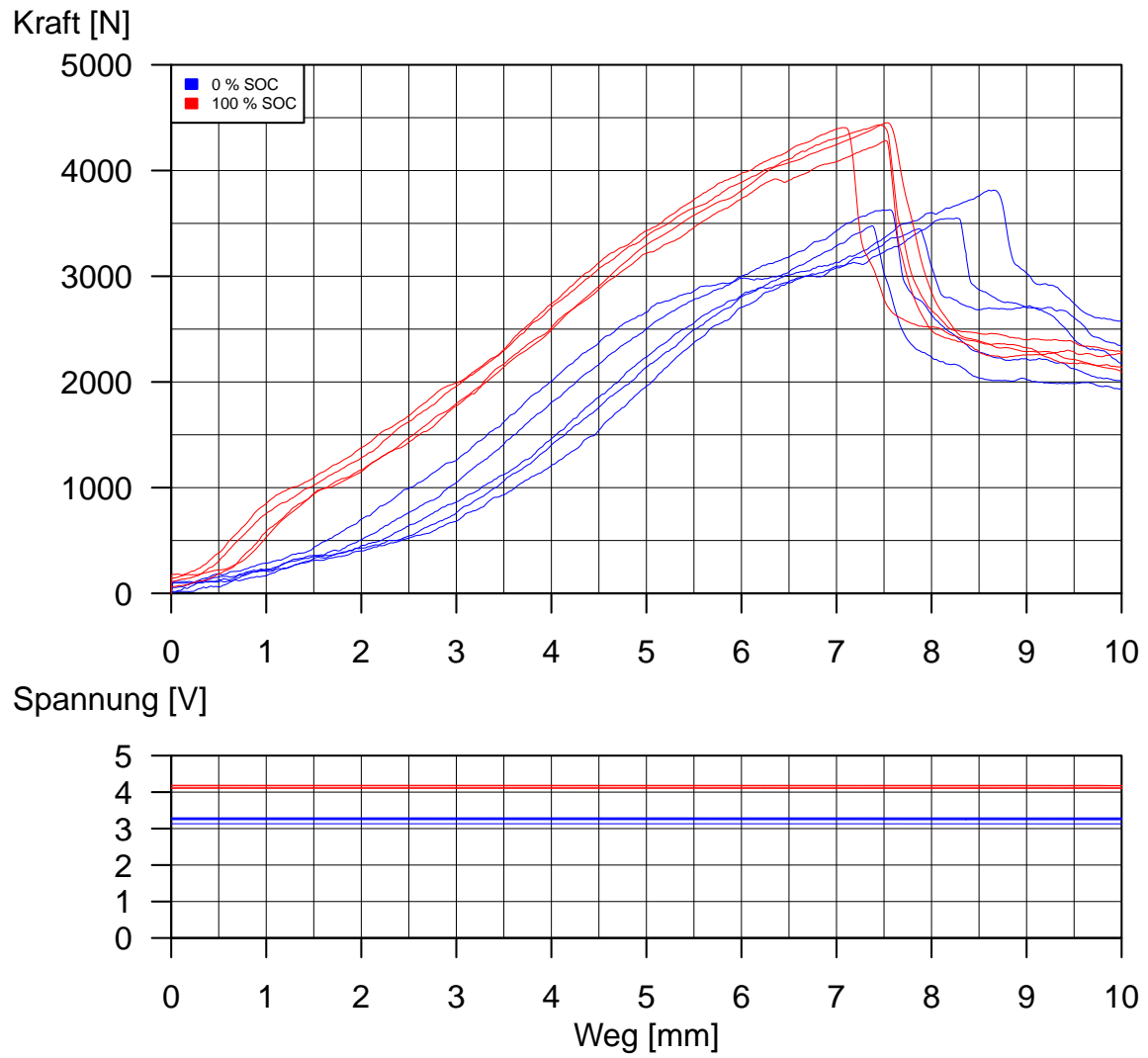


Abbildung 4.30: Vergleich „3-Punkt-Biegung“ mit 0 % und 100 % SOC.

Kapitel 5

Simulationsmodell

5.1 Motivation

Das Ziel bei der Entwicklung des Simulationsmodells war, das tatsächliche, mechanische Verhalten einer Zelle vom Typ „CGR-18650KA“ nachzubilden. Dies bedeutet, dass, bei gleichwertiger äußerer Belastung, das Deformationsverhalten, welches im Simulationsmodell berechnet wurde, ähnlich zu jenem einer Zelle im realen Versuch ist. In weiterer Folge sollen Ort und Zeitpunkt eines etwaigen Kurzschlusses bzw. einer etwaigen thermischen Reaktion sicher prognostiziert werden können. Erfüllt das Modell diese Anforderungen, so wäre eine Einschätzung des Sicherheitsrisikos in einem konkreten Anwendungsfall vorab virtuell möglich. Ein validiertes und damit realitätsnahes Simulationsmodell kann somit während des Entwicklungsprozesses zukünftiger Anwendungen zur Beantwortung von Fragen bzw. zur Beurteilung von Detailvorgängen herangezogen werden.

Zur Abschätzung des Kurzschlussverhaltens ist eine vereinfachte Betrachtung der Geometrie der Zelle zulässig. Eine detailgetreue Nachbildung des Prüflings über einen gewissen Grad hinaus, sowie eine kleinere Netzgröße im FE-Modell, ist im vorliegenden Fall nicht notwendig. Dies erleichtert auch die geplante Integration des Zellen-Modells in eine Gesamtfahrzeugsimulation. Das Batteriemodul des Fahrzeuges ist im konkreten Fall aus 360 Zellen aufgebaut, wodurch ein Höchstmaß an Effizienz bei der Berechnung einzelner Zellen unabdingbar ist. Ein praktikables Funktionieren der Gesamtsimulation kann daher nur erreicht werden, wenn sich der Zeitaufwand zur Simulation einer Zelle in Grenzen hält. Eine geringe Berechnungsdauer ist somit, neben der Exaktheit der Ergebnisse, ein wesentliches Qualitätsmerkmal dieses Simulationsmodells.

5.2 Abstrahierung der realen Batteriezelle

5.2.1 Identifikation der wesentlichen Bauteile

Im Zuge dieser Arbeiten wurden vier Hauptbestandteile identifiziert, welche einen wesentlichen Einfluss auf das mechanische Verhalten der Zelle haben. Diese Bauteile sollen in weiterer Folge das mechanische Verhalten der Zelle adäquat nachbilden. Die folgende Tabelle 5.1 gibt einen Überblick über Funktionen und Werkstoffe dieser Auswahl. Basierend auf dieser Arbeit wurde die Geometrie der Zelle vereinfacht und daraus in Folge das Finite-Elemente-Modell erstellt. Durch diese Vereinfachung wurden einzelne Komponenten der Zelle vernachlässigt. Hierzu zählen unter anderem ein Metallrohr in der Mitte der Jellyroll, Dichtungen und Kunststoffeinlagen zur elektrischen Isolation.

Bauteil	Werkstoff	Funktion
Metalcan	Nickelstahl	Minuspol, steife Schutzhülle
Jellyroll	Al mit Li-Schicht Cu mit Graphit-Schicht	Stromableiter, Elektrode Stromableiter, Elektrode
Polkappe	Nickelstahl, ...	Pluspol, Venting Valve, PTC, ...

Tabelle 5.1: Hauptbauteile einer 18650 Lithium-Ionen-Zelle.

5.2.2 Modellansätze zum Aufbau der Simulation

Prinzipiell sind beim Aufbau eines Simulationsmodells kaum Grenzen gesetzt. Die Wahl des Modellansatzes kann die Qualität des Ergebnisses aber in beträchtlichem Maße beeinflussen und sollte daher wohlüberlegt sein. Maßgeblichen Einfluss auf die Entwicklungstätigkeit hat der Aufwand zum Aufbau bzw. zur Validierung des Modells, sowie die schlussendliche Dauer eines Berechnungsdurchlaufes. Eine kurze Durchlaufzeit eines Iterationsschrittes im Entwicklungsprozess erlaubt ein flexibles und zielgerichtetes Erarbeiten schlüssiger Modellparameter und somit akzeptabler Ergebnisse. Zu diesem Zweck wurde eine Reihe von Kriterien bestimmt, anhand derer drei mögliche Modellvarianten (Skelett, Schichten, Makroskopisch) bewertet wurden. Diese Kriterien sind in der folgenden Aufzählung angeführt.

- Anzahl der Elemente des FE-Netzes
- Anzahl der Komponenten
- Parameter zur Modellierung des Materialverhaltens

Skelett-Modell

Dieser Ansatz besteht im Wesentlichen aus drei konzentrischen Röhren, welche radial durch Feder-Dämpfer-Elemente verbunden sind. Durch Auffinden passender Koeffizienten für alle Verbindungsstellen soll schlussendlich ein realistisches Verhalten des Zellmodells erreicht werden. Das Versagen der Zelle könnte durch ein bestimmtes Maß an Dehnung an einer der Federn prognostiziert werden. Der große Aufwand zur Validierung aller Federn bzw. Dämpfer unter Berücksichtigung deren gegenseitiger Beeinflussung kann als entscheidender Nachteil dieses theoretischen Ansatzes gesehen werden.

Schichten-Modell

Diese Variante stellt einen Mischtyp aus mikro- und makroskopischem Ansatz dar. Die Schichten des Aktivmaterial-Wickels der Zelle werden durch (dickwandige) Schalen grob angenähert. Diesen „Röhren“ wird abwechselnd ein Kupfer- bzw. Aluminiumwerkstoff zugewiesen, wodurch ähnliche Materialeigenschaften wie im realen Vorbild entstehen sollen. Auch hier lässt der prinzipielle Modellaufbau einen großen Arbeitsaufwand zur Validierung erwarten, ohne einen entscheidenden Vorteil anbieten zu können.

Makroskopisches Modell

Dieses Modell stellt die makroskopische Herangehensweise dar und bietet den entscheidenden Vorteil mit möglichst geringem Modellierungs- und Validierungsaufwand realistische Ergebnisse in kurzer Rechenzeit zu liefern. Im Wesentlichen besteht das Modell aus den Bauteilen „Metalcan“, „Polkappe“ und „Jellyroll“. Der Jellyroll kommt hierbei die Aufgabe zu, als so genanntes Summenmaterial, alle mechanischen Eigenschaften der Aktivmaterialschichten der Batteriezelle zu vereinen. Dies wird durch die Wahl eines isotropen Werkstoffes als Ersatzmaterial erreicht.

Die folgende Tabelle 5.2 fasst die Bewertungskriterien für jeden Modellansatz zusammen. Die erste Zeile stellt hierbei die geschätzte Anzahl der Elemente des Modells dar, wobei nicht zwischen Volumen- oder Schalenelement unterschieden wurde. Die zweite Zeile enthält die Anzahl der Komponenten des Zellen-Modells und gibt somit Aufschluss über den Rechenaufwand zur Kontaktmodellierung. Die folgenden Zeilen geben im Wesentlichen jene Materialparameter wieder, welche zur Validierung der virtuellen Werkstoffe zur Verfügung stehen und entsprechend gewählt werden können bzw. müssen. Eine große Auswahl hierbei ermöglicht zwar eine detailliertere Anpassung des Materialverhaltens, erhöht aber gleichzeitig die Freiheitsgrade des Modells und somit den Validierungsaufwand. Die Parameter „Meshsize“, „Elastizitätsmodul“ und „Streckgrenze“ beziehen sich in erster Linie auf das Modell der Metalcan und sind in jedem Fall zu verwenden. Das Verhalten der Jellyroll wird wiederum hauptsächlich durch die Parameter „Materialcharakteristik“ oder „Feder/Dämpfer-Kennlinie“ bestimmt. Wobei die Wahl eines der beiden Parameter vom Modellansatz vorgegeben wird.

	Skelett	Schichten	Makroskopisch
Anzahl Elemente	2100	1200	1300
Anzahl Komponenten	4	10	3
Meshsize	x	x	x
Streckgrenze	x	x	x
Elastizitätsmodul	x	x	x
Materialcharakteristik		x	x
Feder/Dämpfer-Kennlinie	x		

Tabelle 5.2: Bewertung verschiedener Modellansätze.

Diese Gegenüberstellung führte zur Entscheidung, den makroskopischen Ansatz als Grundlage für das Simulationsmodell zu wählen. Ausschlaggebend war hierbei die Möglichkeit, realistische Ergebnisse mithilfe einer überschaubaren Auswahl an Modellparametern erreichen zu können. Der Vorteil gegenüber dem „Schichten“-Ansatz ist der geringere Validierungsaufwand, da hierbei die Materialcharakteristik für jede Schicht bestimmt werden muss. Der makroskopische Ansatz bildet die Jellyroll in einer Komponente ab, sodass diese Tätigkeit hier nur einmal durchgeführt werden muss.

5.3 Aufbau des Modells

Die Umsetzung des „makroskopischen“ Ansatzes wird durch ein Simulationsmodell mit dem FE-Programm LS-DYNA realisiert. Dieser explizite FE-Solver eignet sich lt. Herstellerangabe [8] zur Simulation von nichtlinearen, dynamischen Vorgängen. Dies umfasst unter anderem die Nachstellung von großen Bauteil deformierungen bzw. Fahrzeugcrashes und ist somit für die vorliegende Arbeit zweckmäßig. Das Simulationsmodell besteht aus den Teilsystemen „Zelle“ (Metalcan, Polkappe und Jellyroll) und „Prüfanlage“. Jeder einzelnen Komponente werden zu Beginn entsprechende Materialeigenschaften und Kontaktmodelle zugewiesen, welche in weiterer Folge angepasst und kontinuierlich verbessert werden. Eine Schnittdarstellung des Modellaufbaus ist in Abbildung 5.1 zu sehen.

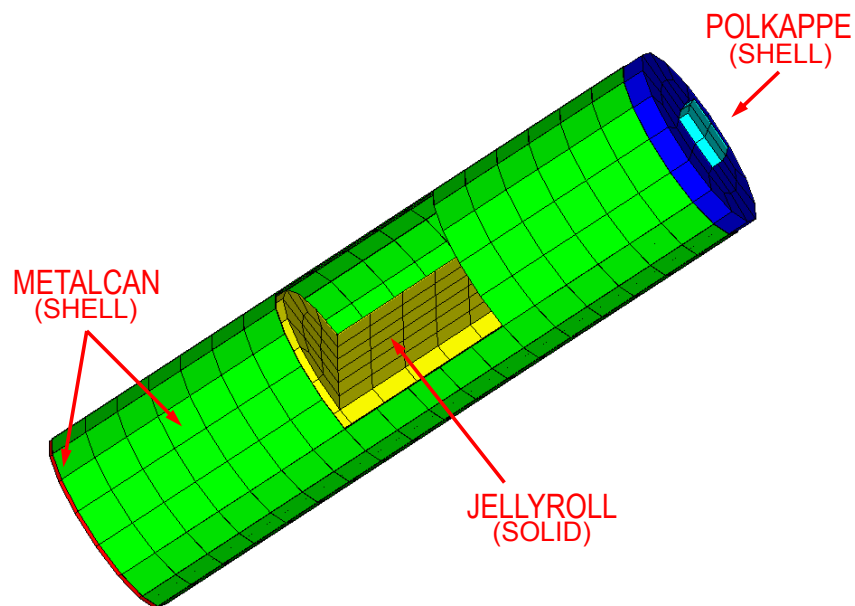


Abbildung 5.1: Schnitt durch das virtuelle Modell.

5.3.1 Element-Typ und Materialmodell

Der Wahl von geeigneten Modellen zur Nachbildung des Werkstoffverhaltens und -versagens kommt bei der Entwicklung eines Simulationsmodells große Bedeutung zu. In einem ersten Schritt wurden die einzelnen Bauteile einem prinzipiellen Element-Typ zugeordnet. Im Falle der Metalcan und der Polkappe ist dies der Typ „SHELL“, also einem flachen Element mit, im Vergleich zu seiner Längenausdehnung, geringen Wandstärke. Für das Verhältnis von Wandstärke zu Länge wurde hierbei ein Wert von etwa 1/10 angenommen. Diesen Bauteilen wird im nächsten Schritt ein Werkstoff zugewiesen, welcher ähnliche Eigenschaften wie Stahl aufweist und in LS-DYNA durch das Materialmodell „MAT_ELASTIC“ repräsentiert wird. Die Einschränkung auf ein elastisches Materialverhalten ist für die weitere Entwicklung des Modells nicht zulässig, durch den einfachen Aufbau dieses Werkstoffmodells jedoch zunächst geeignet, um rasch eine lauffähige Simulation zu erstellen. Im Zuge der Modellvalidierung wird dieses Materialmodell entsprechend ersetzt. Als Ausgangsbasis wurden dem Werkstoff für Metalle typische Materialeigenschaften [37] zugewiesen (Dichte: 7.900 kg/m^3 , Querdehnungszahl: 0,3, Elastizitätsmodul: 210.000 N/mm^2), welche in weiterer Folge konstant gehalten wurden. Die Validierung des Modells erfolgte über Variation der Netzgröße, des Materialmodells, der Streckgrenze, sowie der Spannungs-Dehnungs-Kurve im Bereich plastischer Verformung. Ebenfalls konstant wurden die Wandstärken der Elemente gehalten. Entsprechend den realen Abmessungen wird die Mantelfläche der Hülse mit einer Wandstärke von 0,15 mm modelliert. Das untere Ende dieses Zylinders wird von einem Bodenelement mit einer Wandstärke von 0,35 mm abgeschlossen. Zur Modellierung der Jellyroll werden Volumenelemente des Typs „SOLID“ verwendet, welchen der Werkstoff „MAT_CRUSHABLE_FOAM“ zugewiesen wird. Dieses isotrope Material wird dazu benutzt, die Eigenschaften der Jellyroll in Summe darzustellen. Die Idee zur Verwendung eines Schaumwerkstoffes zur verallgemeinerten Darstellung der Jellyroll wurde von Sahraei [27] übernommen. Das Materialverhalten bei Entlastung ist bei diesem Werkstofftyp ideal elastisch, wodurch nur die Belastungsphase korrekt wiedergegeben werden kann. Da die Kernthematik dieses Modells jedoch die Detektion von Kurzschlüssen bei Belastung bzw. Beschädigung ist, kann dieser Umstand guten Gewissens vernachlässigt werden und stellt keinen direkten Nachteil dar. Einziges relevantes Manko dieses Werkstoffmodells ist die fehlende Richtungsabhängigkeit der Materialeigenschaften. Es muss somit eine gemeinsame Charakteristik gefunden werden, welche dennoch in jeder Belastungsrichtung (längs oder radial) akzeptable Werte liefert. Die Dichte der Jellyroll wurde mit einem Wert von 2.300 kg/m^3 festgelegt. Zusammen mit der - ebenfalls fixierten Dichte der Metalcan - konnte so ein realistischer Wert von etwa 42 g für die Masse der Zelle erreicht werden. Weiters wurde die Querdehnungszahl konstant bei 0,3 gehalten. Die Validierung der Jellyroll erfolgte hauptsächlich über eine Variation des Elastizitätsmoduls, sowie des Verhältnisses von Spannung zu Dehnung im plastischen Bereich.

5.3.2 Kontaktbedingungen

Um mathematische Modelle mechanischer Systeme miteinander koppeln zu können, ist die Definition von eindeutigen Berührstellen notwendig. Im Falle von Finite-Elemente-Simulationen geschieht dies durch die Bestimmung von Kontaktbedingungen, welche die Interaktion der Bauteile bewerkstelligen und so ein realistisches Verhalten erzeugen. In der vorliegenden Simulation sind zwei LS-DYNA-Kontaktmodelle zur Verwendung gekommen, welche in der folgenden Auflistung zu sehen sind:

- CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE
- CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE

Die Kontaktdefinition „CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE“ stellt einen sogenannten „self contact“ dar, welcher die Berührung von Elementen des selben Bauteils untereinander abbildet. Für den gegenseitigen Kontakt zweier unterschiedlicher Teile wird das Modell „CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE“ verwendet. Dies ist vor allem für ein zukünftiges Modell eines Batteriemoduls notwendig, um die Berührung mehrerer Zellen untereinander sowie zum Modulgehäuse modellieren zu können. Hervorzuheben sind hierbei die Parameter „FS“, „FD“, „DC“ und „VC“. Diese Variablen steuern die tribologischen Eigenschaften und bestimmen somit das Reibungsverhalten der Kontaktflächen. Die Berechnungsformel, welche dem Reibungsmodell zu Grunde liegt wurde dem LS-DYNA-Materialhandbuch [38] entnommen und ist in Formel 5.1 ersichtlich.

$$\mu_C = FD + (FS - FD) \cdot e^{-DC \cdot |v_{rel}|} \quad (5.1)$$

„FS“ entspricht hierbei dem statischen, „FD“ dem dynamischen Reibungskoeffizienten. „DC“ repräsentiert einen exponentiellen Abklingkoeffizienten, der den Übergang von dynamischer auf statische Reibung bei Verringerung der Relativgeschwindigkeit v_{rel} der Kontaktpartner beeinflusst. Da bei den vorliegenden Experimenten quasi-statische Lastaufbringung angenommen wird, geht die Relativgeschwindigkeit gegen Null, sodass in weiterer Folge der Reibungskoeffizient nur durch „FS“ bestimmt wird. Der statische Reibungskoeffizient wurde mit 0,2 bzw. 0,3 angenommen, was typisch für trockene Stahl-Stahl-Paarungen [37] ist. Der dynamische Koeffizient, welcher im Moment keinen Einfluss auf das Ergebnis hat, wurde auf den gleichen Wert gesetzt. Ferner ist dafür Sorge zu tragen, dass mögliche Berührungen aller im System vorhandenen Bauteile mit allen übrigen durch eine derartige Kontaktbedingung definiert werden. Wird dem nicht Folge geleistet, so können undefinierte Zustände im Rechenmodell auftreten, welche die Ergebnisse verfälschen können oder einen Programmabbruch erzwingen. Die Abbildungen 5.2 und 5.3 zeigen den LS-DYNA-Code der verwendeten Kontaktmodelle.

```

$ ****
$ CONTACT - DEFINITIONS
$ ****
$...>...1...>...2...>...3...>...4...>...5...>...6...>...7...>...8
*CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE_ID
1Selfcontact_Boden
$ SSID SSTYP SBOX SPR
1 3 0 0
$ FS FD DC VC VDC PENCHK BT DT
0.2 0.2 1 145 0 0 0 0
$ SFS SST SFST FSF VSF
1 1 1 1 1

```

Abbildung 5.2: Kontaktkarte „CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE“.

```

$ ****
$ CONTACT - DEFINITIONS
$ ****
$...>...1...>...2...>...3...>...4...>...5...>...6...>...7...>...8
*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID
51PlatteUnten_Zelle
$...>...1...>...2...>...3...>...4...>...5...>...6...>...7...>...8
$ SSID MSID SSTYP MSTYP SBOX MBOX SPR MPR
200001 18650 3 2 0 0 1 0
$ FS FD DC VC VDC PENCHK BT DT
.3 .3 0 0 20 1 0 0
$ SFS SFM SST MST SFST SFMT FSF VSF
1 1 0 0 1 1 1 1
$ SOFT SOFSCL MAXPAR SBOPT DEPTH BSORT FRCFRQ
1 .1 1.025 0 2 10 1
$ PENMAX THKOPT SHLTHK SNLOG ISYM I2D3D SLDTHK SLDSTF
0 0 0 1 0 0 0 0
$ IGAP IGNORE DPRFAC DTSTIF FLANGL
0 0 0 0 0 0
$
*SET_PART_LIST_TITLE
Part_List_Zelle
18650
300001 300002 300003 300004 300005
$

```

Abbildung 5.3: Kontaktkarte „CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE“.

5.3.3 Virtuelle Prüfanlage

Neben dem Aufbau des Zellen-Modells und dem Nachstellen der Kontaktbedingungen zwischen dessen einzelnen Bauteilen, musste ebenso die Prüfanlage modelliert werden. Das Abbild des Prüfstandes besteht, gleich dem realen Vorbild, aus einer, im Raum fest verankerten, oberen Druckplatte, sowie einer, in Hubrichtung beweglichen, unteren Auflagefläche. Das Modell ist derart konzipiert, dass sich einzelne Komponenten wie Prüfling oder Prüfwerkzeuge (Auflager, Penetratoren, etc.) durch einen einfachen Befehl in die Simulation integrieren bzw. daraus entfernen lassen. Mithilfe der Instruktion „INCLUDE_TRANSFORM“ können Subsysteme, unter Angabe von Koordinatenposition und Ausrichtung, eingefügt werden. Dieser Umstand erlaubt eine einfache „Bedienung“ sowie einen unkomplizierten und schnellen „Umbau“ der virtuellen Anlage, wodurch eine intuitive Benutzung, im logischen Ablauf dem realen Pendant folgend, ermöglicht wird. Dies kann als Vorteil für weitere Anwendungen, welche über diese Arbeit hinausgehen, angesehen werden. Abbildung 5.4 zeigt das Simulationsmodell am Beispiel der Konfiguration „3-Punkt-Biegung“.

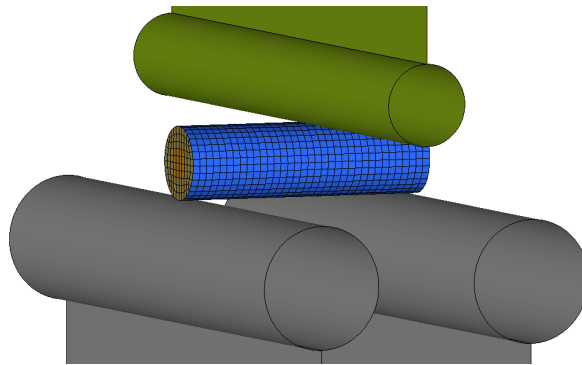


Abbildung 5.4: Simulationsmodell der Prüfanlage.

Die feste Verankerung der oberen Platte wird durch Sperren aller Freiheitsgrade im Modell erreicht. Auf gleiche Weise ist die untere Platte gelagert, wobei jedoch ein translatorischer Freiheitsgrad in Bewegungsrichtung zugelassen wird. Für alle Teile des Modells der Prüfanlage wurde das fiktive Material „MAT_RIGID“, welchem eine ideal unelastische Charakteristik innewohnt, verwendet. Dies soll der, im Gegensatz zum Prüfling um mehrere Größenordnungen höheren, Steifigkeit der Prüfanlage Rechnung tragen. Neben der exakten Abbildung der Geometrie der Anlage ermöglicht das Simulationsprogramm auch die Verwendung eines virtuellen Kraft-Weg-Messsystems. Dem realen Vorbild folgend, werden die berechnete Druckkraft auf die Aufspannflächen und deren Abstand zueinander ermittelt und aufgezeichnet, sodass diese Daten späteren Auswertungen und Vergleichen ohne Nachbearbeitung oder Umrechnung zur Verfügung stehen. Die Hubbewegung der unteren Auflagefläche wird dem Modell durch Vorgabe einer Weg-Zeit-Kurve aufgeprägt. Für die Berechnung wird, entsprechend den realen Versuchen, ein linearer Anstieg auf einen Maximalwert von 10 mm gewählt.

5.4 Parallelisierungsgrad der FE-Berechnung

Die Finite-Elemente-Berechnung erfolgt im Rahmen dieser Arbeit am Supercomputer des ZID [39]. Hierbei handelt es sich um einen Debian Linux-Cluster [40] aus 120 Maschinen (Nodes) mit je 16 Prozessoren (CPUs). Diese sind untereinander durch ein InfiniBand-Hochgeschwindigkeitsnetzwerk [41] verbunden. Dem Benutzer obliegt es, für jede Berechnung die Anzahl der zu verwendenden Knoten und CPUs des Computers zu wählen. Stets bemüht, die vorhandenen Ressourcen möglichst effizient zu nutzen und die Berechnungszeit zu verkürzen, wurde für das Modell ein optimaler Arbeitspunkt ermittelt. Hierzu wurde der Simulationscode mehrmals automatisiert gestartet, wobei alle sinnvollen Kombinationen aus Node-Anzahl und CPU-Anzahl durchlaufen wurden. Nach einer festgelegten Anzahl an Berechnungsschritten wurde jeder Rechenauftrag abgebrochen und die verstrichene Zeit ausgelesen. Aus dieser Zeitspanne kann auf die Dauer zum vollständigen Durchrechnen der Simulation geschlossen werden. Hieraus wurde eine „Performance-Landkarte“ erstellt, welche in Abbildung 5.5 zu sehen ist und den optimalen Betriebspunkt mit der geringsten zu erwartenden Berechnungsdauer aufzeigt. Im vorliegenden Fall der Batteriezelle ist die Berechnung des Modells auf einem Knoten mit 10 CPUs am effizientesten. Die durchgeführte Auswertung hat gezeigt, dass durch geschickte Wahl des Betriebspunktes eine Verkürzung der Berechnungszeit auf beinahe ein Zehntel des ursprünglichen Wertes möglich ist. Der Aufwand zur Durchführung dieser Analyse kann, mit Blick auf die Zeitersparnis bei der darauffolgenden Entwicklung des FE-Modells, vernachlässigt werden. Die automatisierte Abrasterung aller Cluster-Betriebspunkte mag zu Beginn übertrieben erscheinen, da man intuitiv eine möglichst hohe Anzahl an Nodes und CPUs als günstig vermuten würde. Jedoch ist eine (zu) hohe Anzahl an Nodes, vor allem bei einfacheren FE-Modellen, kontraproduktiv, da der Verwaltungsaufwand zur Parallelisierung der Aufträge überproportional steigt und somit eine Verlängerung der Rechenzeit bewirkt. Ein Betrieb des Supercomputers im Optimalpunkt ist somit aus zweierlei Hinsicht von Vorteil. Zum Einen ermöglicht eine Verkürzung der Berechnungsdauer ein effizienteres Entwickeln des FE-Modells. Andererseits wird die teure Hardware optimal ausgelastet, wodurch Ressourcen nicht unnötig (lange) blockiert werden. Dies ermöglicht einen sparsamen und produktiven Betrieb und schont Budget und Umwelt in gleichen Maßen.

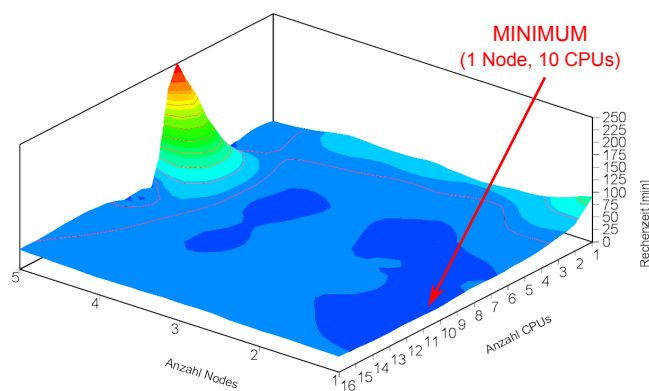


Abbildung 5.5: Optimaler Betriebspunkt des Linux-Clusters.

Kapitel 6

Validierung des Simulationsmodells

6.1 Auswahl geeigneter Versuchsmessdaten

Zur Validierung des Simulationsmodells ist es nötig, repräsentative Messdaten zum Vergleich zwischen Versuch und Simulation zu bestimmen. Obwohl, wie in Kapitel 4 beschrieben, die Messwerte der Versuchswiederholungen in den verschiedenen Testkonfigurationen im Großen und Ganzen gut reproduzierbar sind, muss eine Auswahl getroffen werden, welche Daten tatsächlich als Grundlage zur Validierung herangezogen werden. Zu diesem Zweck werden Fehlmessungen und „Ausreißer“ ignoriert und danach aus jeder der durchgeführten Konfigurationen jene Kurven gewählt, welche das obere bzw. untere Limit darstellen. Diese Vorgehensweise liefert schlussendlich eine Bandbreite, in welcher sich die Kraft-Weg-Kurven aus der Simulation befinden müssen, um als validiert zu gelten. Gleiches Verfahren wird auf die Daten der Spannungsmessung angewandt, wodurch ein Bereich mit sicherem Kurzschlussauftritt bestimmt werden kann. Durch dieses Auswahlprozedere der Vergleichskurven wird die Möglichkeit geschaffen, ein physikalisch sinnvolles Modell zu entwickeln, das realistische Daten liefert.

6.2 Phänomenologische Vorgehensweise

Eine praktikable Herangehensweise an die Validierung stellt der semi-physikalische, phänomenologische Ansatz dar. Hierbei wird das Zusammenspiel von Ursache und Wirkung im Gesamten betrachtet, ohne darunterliegende Teilsysteme detailliert zu beschreiben. Diese Vorgehensweise zur Ermittlung der charakteristischen Kennwerte der Bestandteile des FE-Modells wird auch als „curve fitting“ bezeichnet und ist ein anwendungsorientierter Kompromiss, um ohne zu hohen Aufwand an brauchbare Ergebnisse zu kommen. Der phänomenologische Ansatz zur Bestimmung der Materialparameter kann als logische Folge des makroskopischen Entwurfes des gesamten Simulationsmodells gesehen werden. Erkenntnisse aus möglichen, mikroskopischen Untersuchungen einzelner Aspekte des Materialverhaltens wären aufgrund des unterschiedlichen Abstrahierungsgrades nicht bzw. nur schlecht in das vorliegende Modell integrierbar und würden somit einen Aufwand ohne Mehrwert darstellen.

6.3 Validierung der Metalcan

Gleich den Validierungstests wurde zuerst die Metalcan an sich betrachtet und gesondert untersucht. Das, anfangs nur rudimentäre und auf Standardkennwerte aufbauende, Materialmodell wird in diesem Schritt verändert und dem realen Vorbild angenähert. Dies ist notwendig, da keine Materialdaten zur Metalcan verfügbar waren. Die klassische Herangehensweise durch Zugversuche konnte in diesem Fall ebenfalls nicht gewählt werden, da hierfür zu wenige Prüflinge zur Verfügung standen. Das Ziel der Validierung ist, dass schlussendlich das Deformationsbild der Metalcan während der Versuche möglichst gut mit jenem aus dem Simulationsmodell übereinstimmt. An erster Stelle sollen jedoch die Kraft-Weg-Kurven aus der Simulation innerhalb des Validierungsintervalls zwischen oberer und unterer Grenzkurve liegen. Diese Grenzen wurden bereits in Kapitel 4 definiert.

6.3.1 Meshsize

Nachdem der erste Entwurf des Modells lauffähig entwickelt war, galt es die optimale Netzgröße zu bestimmen. Finite-Elemente-Simulationen ist der Gegensatz zwischen Berechnungszeit und realitätsnahem Ergebnis inhärent. Eine wesentliche Stellschraube zur Steigerung der Qualität der Ergebnisse ist die Netzgröße und Elementqualität. Geringe Längen versprechen ansprechende Verformungsbilder und stetige Kraft-Weg-Kurven, verursachen demgegenüber bei expliziten FE-Codes aber auch lange Rechenzeiten. Übersteigt die Meshsize die Länge der Falten im Material, können diese nicht mehr korrekt abgebildet werden. Ein anschauliches Beispiel des Einflusses der Meshsize auf das optische Ergebnis findet sich in Abbildung 6.1.

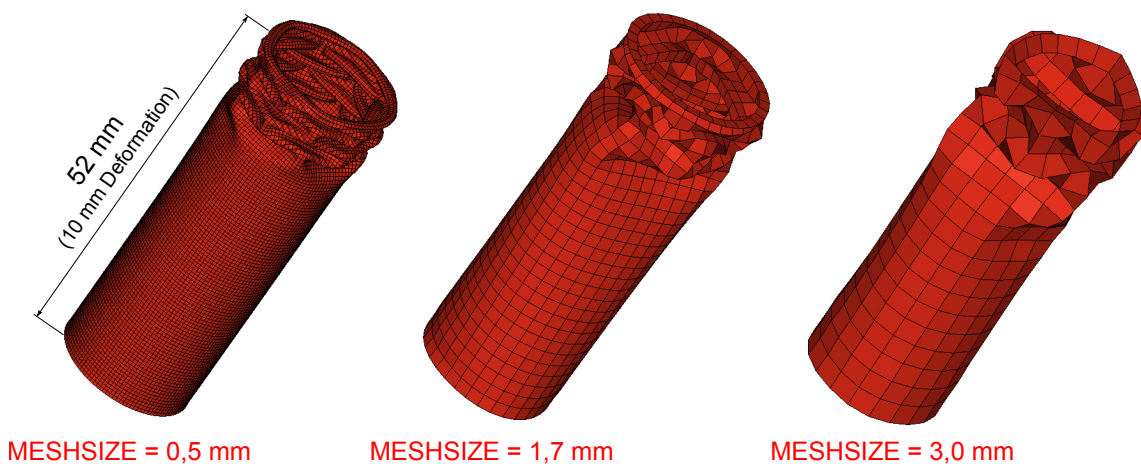


Abbildung 6.1: Einfluss der Meshsize auf das optische Ergebnis.

Eine Maschenweite von 0,5 mm ist jedoch aufgrund der erhöhten Berechnungsdauer, vor allem auch im Hinblick auf eine spätere Integration des Zellen-Modells in ein übergeordnetes Modul- bzw. Fahrzeugmodell, für das verwendete explizite FE-Programm nicht praktikabel. Aus der anfänglich (willkürlich) gewählten Netzlänge von 3 mm konnte ein optimaler Kompromiss bei 1,77 mm gefunden werden. Die Rechendauer in Abhängigkeit der Meshsize der Metalcan ist in Tabelle 6.1 aufgelistet.

Meshsize	Berechnungsdauer
mm	min
0,50	180
1,77	15
3,00	6

Tabelle 6.1: Rechendauer in Abhängigkeit der Meshsize.

6.3.2 Materialmodell und Werkstoff

Nach der Wahl der Netzgröße lag das Augenmerk auf dem Materialmodell. Nachdem in Kapitel 5 der prinzipielle Aufbau des Simulationsmodells bewerkstelligt wurde, gilt es nun, passende Materialkennwerte zu ermitteln. Aus der, weit über 200 Einträge umfassenden, Materialdatenbank in LS-DYNA konnten folgende Werkstoffmodelle entnommen werden, welche das elastisch-plastische Verhalten von Metallen gut wiedergeben.

- (Mat001) MAT_ELASTIC
- (Mat012) MAT_ISOTROPIC_ELASTIC_PLASTIC
- (Mat024) MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY

Das Modell „MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY“ erwies sich als am besten geeignet und wurde für alle weiteren Berechnungen verwendet, um die Eigenschaften von Nickelstahl, aus welchem die Metalcan gefertigt wird, nachzubilden. In der Literatur findet sich bei Sahraei [27] eine Bestätigung der Wahl dieses Werkstoffmodells. Die LS-DYNA-Materialkarte dafür ist in Abbildung 6.2 auf der nächsten Seite dargestellt. Im vorliegenden Modell wird dieses Material sowohl der Metalcan, als auch der Polkappe zugewiesen.


```

$ ****$
$                               M A T E R I A L S                               $
$ ****$
$>...>...1>...>...2>...>...3>...>...4>...>...5>...>...6>...>...7>...>...8
*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY_TITLE
Huelsenmaterial
$>...>...1>...>...2>...>...3>...>...4>...>...5>...>...6>...>...7>...>...8
$      MID      RHO      E      PR      SIGY      ETAN      FAIL      TDEL
$      1      7.89E-9 200000 .33      250      0 100000000 0
$      C      P      LCSS      LCSR      VP
$      0      0      1      0      1
$      EPS1      EPS2      EPS3      EPS4      EPS5      EPS6      EPS7      EPS8
$      0      0      0      0      0      0      0      0
$      ES1      ES2      ES3      ES4      ES5      ES6      ES7      ES8
$      0      0      0      0      0      0      0      0
$
*DEFINE_CURVE_TITLE
Kurve_Huelsenmaterial
$      Id      SIDR      SFA      SFO      OFFA      OFFO      DATTYP
$      1      0      1      1      0      0      0
$      Abscissa      Ordinate
$      0      250
$      .016      860
$      .045      945
$      .0825      1020
$      .13      1090
$      .1665      1132
$      .2      1170
$      .235      1199
$      .25      1205
    
```

Abbildung 6.2: LS-DYNA-Materialkarte der Metalcan und der Polkappe.

Tabelle 6.2 erklärt die Bedeutung der Bezeichnungen in der Materialkarte und ordnet sie gegebenenfalls den Stoffkonstanten des Werkstoffes zu.

Kürzel	Bedeutung bzw. Materialkonstante	Einheit
MID	Eindeutige Identifikationsnummer	
RHO	Dichte	t/mm ³
E	Elastizitätsmodul	N/mm ²
PR	Querdehnungszahl	
SIGY	Streckgrenze	N/mm ²
ETAN	Steigung der σ - ϵ -Kurve im plastischen Bereich	
FAIL	Bruchdehnung	
LCSS	Id-Nr. der zugehörigen σ - ϵ -Kurve	

Tabelle 6.2: Erklärung der LS-DYNA Materialkarte „MAT_024“.

Die Kurvendefinition unten wird der Materialkarte mit der Id-Nr. in „LCSS“ zugewiesen. Dieser Spannungs-Dehnungs-Verlauf charakterisiert das Material im plastischen Verformungsbereich, wobei die Spannungen σ in Ordinatenrichtung, die Dehnungen ϵ in Abszissenrichtung aufgetragen sind. Zum Schaffen einer Ausgangsbasis wurden dem Simulationsmodell zunächst verschiedene, frei erhältliche [42] Materialdefinitionen (σ - ϵ -Kurven) zugewiesen. Da die Metalcan aus Nickelstahlblech gefertigt ist, wurden hierzu vor allem Metall- bzw. Stahlwerkstoffe herangezogen. Ein Vergleich der Ergebnisse zeigt, dass die Sorte „ASTM A653/A653M structural quality grade 80“, ein korrosionsbeständiger Baustahl, eine gute Grundlage zur weiteren Optimierung darstellt.

6.3.3 Elastizitätsmodul und Streckgrenze

Im nächsten Schritt wurde der Elastizitätsmodul und die Streckgrenze des Materials bestimmt. Die Streckgrenze, auch „yield stress“, wurde in fünf Schritten (250, 500, 750, 1000 und 1.250 N/mm²) variiert, um den gängigen Bereich für Stahlwerkstoffe abzudecken. Für den E-Modul wurde ein typischer Wert von 200.000 N/mm² angenommen und konstant gehalten. Als Vergleichsgrundlage wurde Messung Nr. 01 des Penetration-Test der Metalcan herangezogen. Das Ergebnis dieser Tätigkeit ist in Abbildung 6.3 dargestellt.

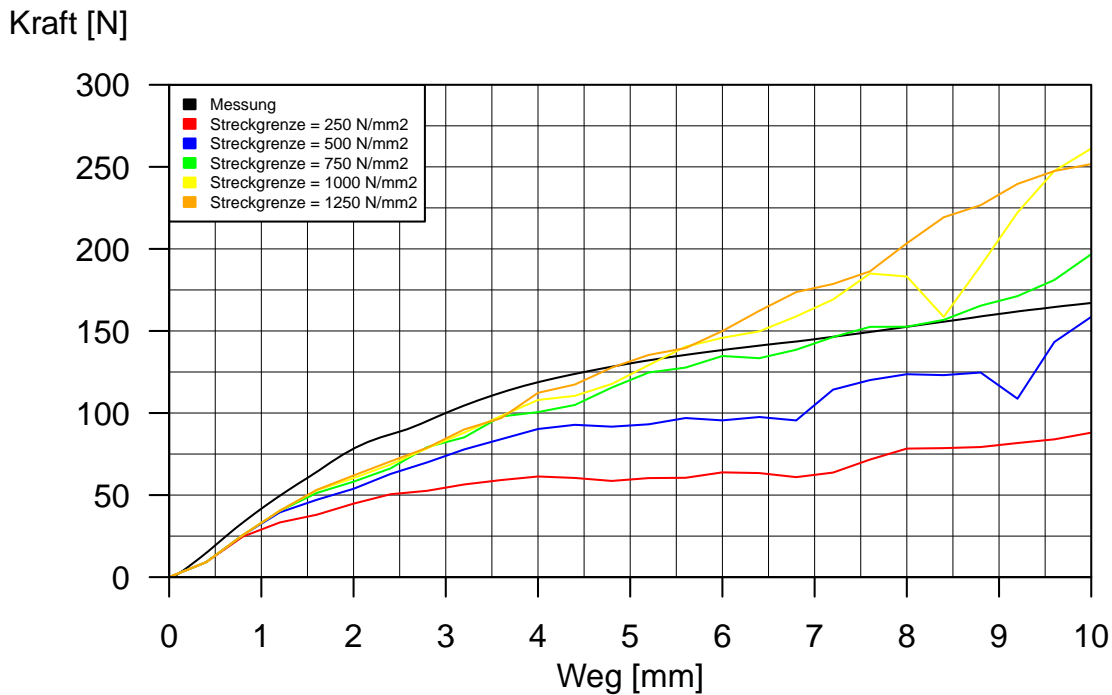


Abbildung 6.3: Variation der Streckgrenze.

Die beste Näherung an die Messung lieferte der dritte Variationsschritt mit einer Streckgrenze von 750 N/mm², was ein vertretbarer Wert für Nickelstähle [37] ist.

6.3.4 Bereich plastischer Verformung

Dem anfänglich linear-elastischen Verhalten, welches durch den E-Modul charakterisiert wird, folgt ab der Streckgrenze ein Bereich plastischer Verformung. Dem Solver wird hier die gewünschte Materialcharakteristik durch Angabe des Verhältnisses von Spannung σ zu Dehnung ϵ mitgeteilt. Das Materialmodell nähert das plastische Verhalten stückweise linear an, wobei die Eingabe durch Definition einer Kurve (LCSS) erfolgt. Hierzu wurden die berechneten Werte für Spannung, Dehnung und Kraft über der Deformation aufgetragen. Als Validierungsgrundlage diente eine experimentell ermittelte Kraft-Weg-Kurve. In mehreren Durchläufen wurden jene Bereiche der simulierten Kraft-Weg-Kurve identifiziert, welche ungenügend mit der Vergleichskurve übereinstimmten. Über die gemeinsame Achse der Deformation konnten so die Werte für Dehnung und Spannung in den betroffenen Bereichen abgelesen und angepasst werden. Auf diese Weise wurde ein Materialverhalten erreicht, welches der Realität nahe kommt. Tabelle 6.3 und Abbildung 6.4 zeigen die ermittelten Werte.

Dehnung	Spannung
%	N/mm ²
0,00	750
1,60	860
4,50	945
8,25	1020
13,00	1090
16,65	1132
20,00	1170
23,50	1199
25,00	1205

Tabelle 6.3: Materialmodell der Metalcan bei plastischer Verformung.

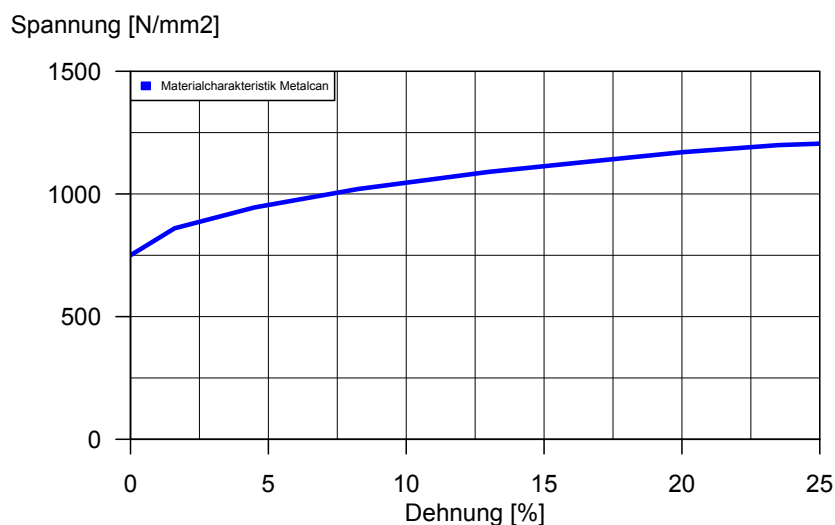


Abbildung 6.4: Materialmodell der Metalcan bei plastischer Verformung.

6.3.5 Ergebnis

Durch die oben beschriebene Vorgehensweise zur Validierung konnte ein ausvalidiertes Modell der Metalcan entwickelt werden. Das Deformationsverhalten des virtuellen Modells stimmt ausreichend mit dem realen Vorbild überein. Dies ist in den vergleichenden Abbildungen 6.5 bis 6.7 ersichtlich. In Abbildung 6.5 sind Versuch und Simulation im Fall „Crush in X-Richtung“ gegenübergestellt. Das Ergebnis der Simulation stimmt hier gut mit dem Versuch überein.

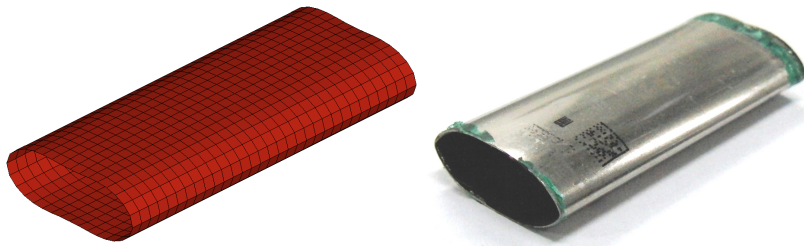


Abbildung 6.5: Deformationsbild von Simulation und Versuch bei „Crush in X-Richtung“.

In der Konfiguration „Crush in Z-Richtung“ ist anzumerken, dass die Faltenbildung in Abbildung 6.6 vom Experiment abweicht, was auf die gewählten Netzgröße im FE-Mesh zurückzuführen ist.

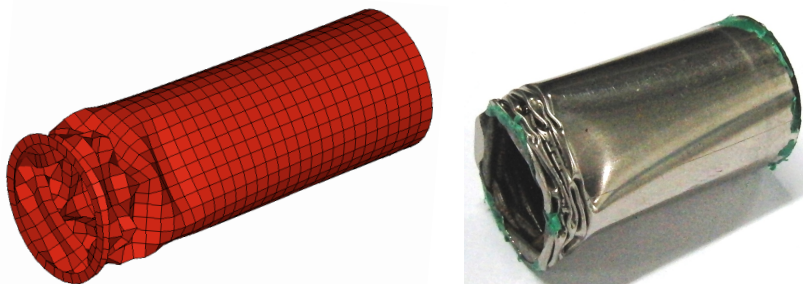


Abbildung 6.6: Deformationsbild von Simulation und Versuch bei „Crush in Z-Richtung“.

Die Verformung der Metalcan im Versuch „Penetration“ konnte gut wiedergegeben werden, was in Abbildung 6.7 ersichtlich ist.

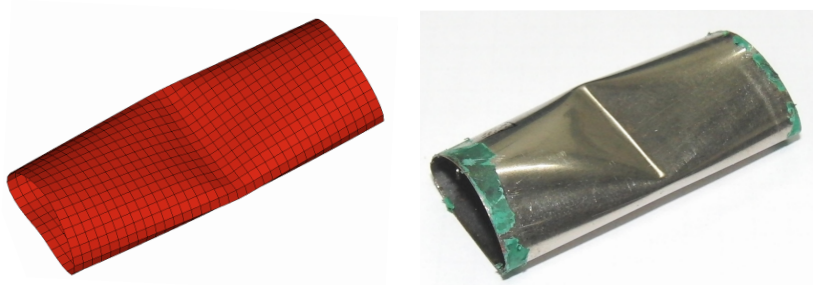


Abbildung 6.7: Deformationsbild von Simulation und Versuch bei „Penetration“.

Ebenso liegen die Kraft-Weg-Kurven von Versuch und Simulation nahe beieinander, was darauf schließen lässt, dass das Modell physikalisch sinnvolle Ergebnisse liefert. Die Abbildungen 6.8 bis 6.10 zeigen die aufgenommenen Messwerte.

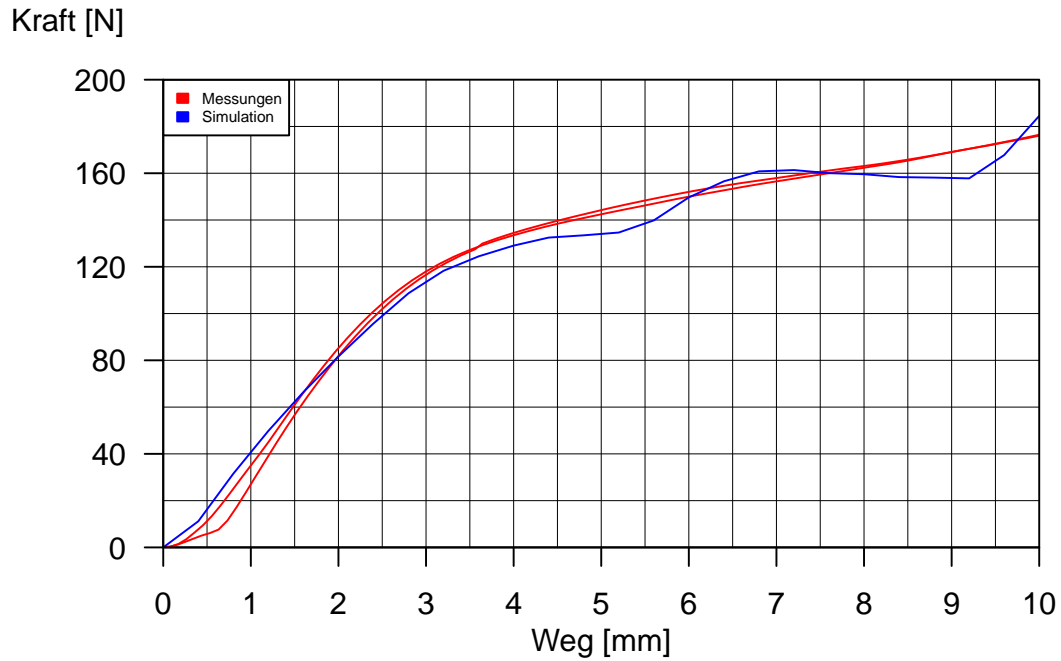


Abbildung 6.8: Simulation und Versuch bei „Crush in X-Richtung“.

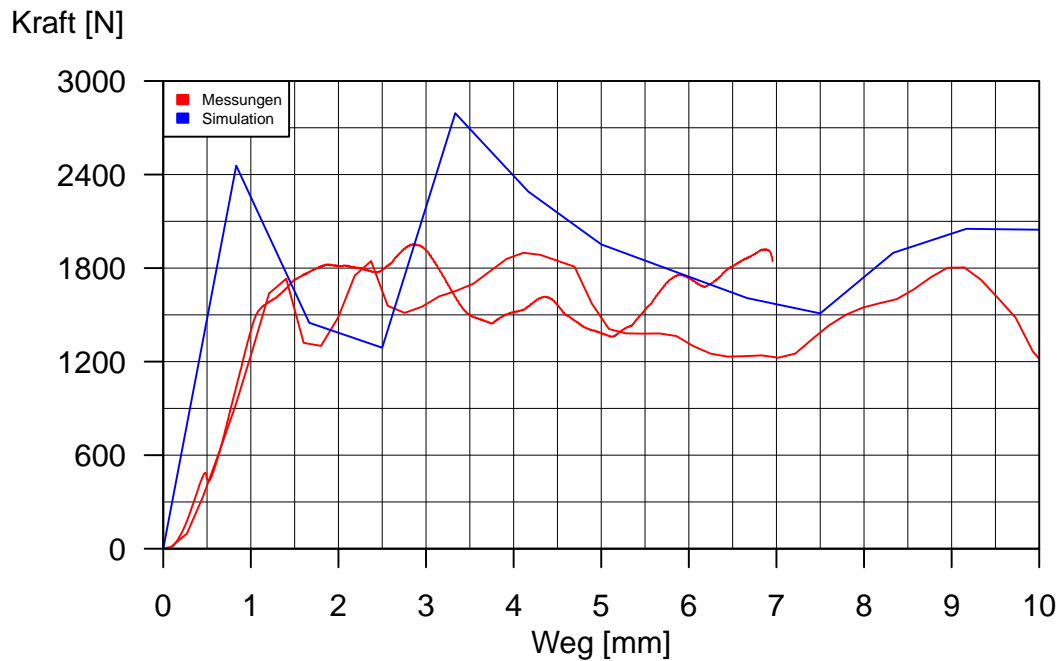


Abbildung 6.9: Simulation und Versuch bei „Crush in Z-Richtung“.

Abbildung 6.10 zeigt den Verlauf der Kraft-Weg-Kurve der Metalcan im Versuch „Penetration“. Im Bereich bis etwa 8 mm zeigt die Simulation einen tendenziell niedrigeren Wert als die Messungen. Generell kann aber von einer ausreichenden Näherung gesprochen werden.

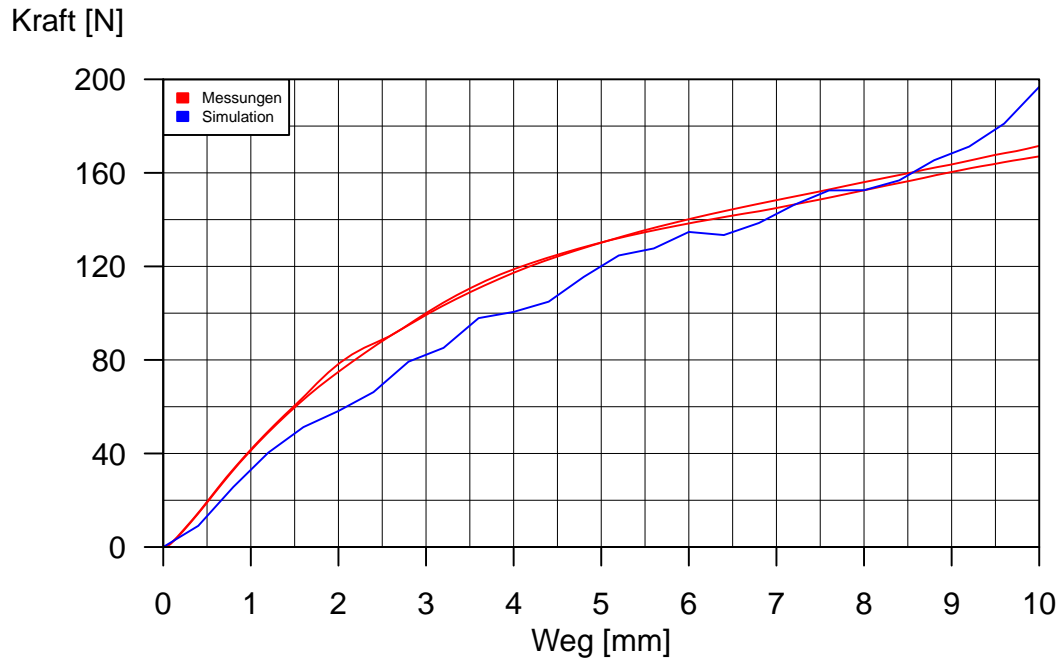


Abbildung 6.10: Simulation und Versuch bei „Penetration“.

Die unstetig verlaufende Kraft-Weg-Kurve im Falle der Konfiguration „Crush in Z-Richtung“, sowie die grobe Auflösung der Faltenbildung in Abbildung 6.6 können durch das relative weitmaschige Netz im FE-Modell erklärt werden. Wie bereits zuvor beschrieben, geschah dies aus Gründen der Rechengeschwindigkeit. Tendenz und Kraftniveau der Kurve können jedoch als genügend bezeichnet werden. Der Einfluss unterschiedlicher Netzgrößen auf den Kraftverlauf kann in Abbildung 6.11 gesehen werden. Hierzu wurde die Simulation in der Konfiguration „Crush in Z-Richtung“ bei verschiedenen Netzgrößen (0,5, 1,7 und 3,0 mm) durchlaufen.

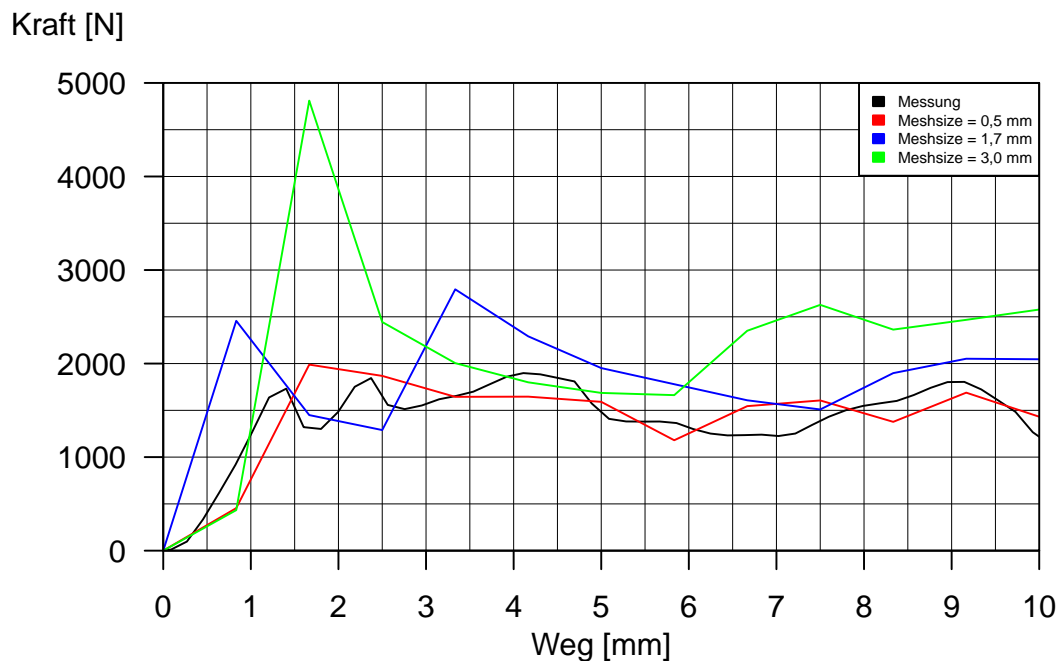


Abbildung 6.11: Variation der Meshsize.

Neben einem feineren FE-Mesh gibt es bei der Stauchung in Längsrichtung noch weitere Verbesserungsmöglichkeiten, welche in Kapitel 10 beschrieben werden. Da ein derartiger Belastungsfall während eines Crashes jedoch nicht erwartet wird, wurde in dieser Arbeit nicht weiter auf dieses Thema eingegangen.

6.4 Validierung der gesamten Zelle

Das Gesamtmodell der Batteriezelle wird im Wesentlichen von den Teilen „Metalcan“ und „Jellyroll“ bestimmt. Da das Materialmodell der Hülse bereits mit zufriedenstellendem Ergebnis entwickelt wurde, konnte nun das gesamte Modell aufgebaut und indirekt über das Werkstoffverhalten der Jellyroll validiert werden. Neben der Bestimmung der charakteristischen Eigenschaften des Folienwickels liegt das Hauptaugenmerk hierbei auf einem korrekten Zusammenspiel aller Unterbaugruppen. Da die Jellyroll als Summenmaterial die Eigenschaften mehrere realer Bauteile abbilden soll, hat dieser indirekte Weg den Vorteil, dass so mögliche Quereinflüsse zugleich erfasst und berücksichtigt werden. Eine Untersuchung der Jellyroll alleine würde einen Mehraufwand an Versuchs- und Validierungsarbeit bedeuten, ohne diese Quereinflüsse einbeziehen zu können.

6.4.1 Meshsize

Wie bereits bei der Metalcan war auch hier der erste Schritt die Bestimmung der Maschenweite des Simulationsnetzes. Da bei der Jellyroll keine feine Auflösung zur Darstellung von Verformungen nötig ist und das „Innenleben“ der Zelle als Summenmaterial dargestellt werden soll, ist eine gröbere Netzgröße als bei der Metalcan zulässig. Das Mesh der Jellyroll, welches als Schnittbild in Abbildung 6.12 zu sehen ist, besteht aus prismatischen Elementen mit einer Kantenlänge von etwa 3 mm. Dieser Wert ergab sich während der Netzgenerierung und ermöglichte, bei einem Durchmesser der Jellyroll von knapp unter 18 mm, ein optisch ansprechendes, symmetrisches Netz. Da mit dieser Wahl die Rechenzeit des Modells zufriedenstellend war, war eine weitere Änderung nicht nötig.

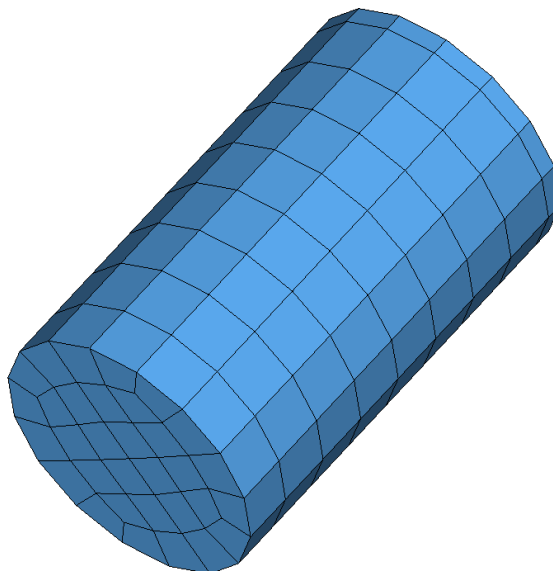


Abbildung 6.12: Schnitt durch das FE-Netz der Jellyroll.

6.4.2 Materialmodell und Werkstoff

Zur Simulation der Jellyroll wurde das Werkstoffmodell „MAT_CRUSHABLE_FOAM“ verwendet. Dieses bildet Schaumwerkstoffe nach und soll als makroskopische Abstrahierung des gesamten Aktivmaterials der Batteriezelle dienen. Das Materialmodell wurde ursprünglich für Energieabsorber, wie z.B. Stoßfänger an PKWs, entwickelt und sollte daher für Crush-Versuche von Batteriezellen geeignet sein. Da bisher wenig Erfahrung mit makroskopischen Modellansätzen vorlag, musste in der Literatur nach ähnliche Anwendungsfällen gesucht werden. Eine entsprechende Applikation konnte bei Sahraei [27] gefunden werden. Die LS-DYNA-Materialkarte für das gewählte Modell ist in Abbildung 6.13 dargestellt.

```

$ ##### $
$                                     M A T E R I A L S                                     $
$ ##### $
$...>...1...>...2...>...3...>...4...>...5...>...6...>...7...>...8
*MAT_CRUSHABLE_FOAM_TITLE
Aktivmaterial
$...>...1...>...2...>...3...>...4...>...5...>...6...>...7...>...8
$      MID      RHO      E      PR      LCID      TSC      DAMP
$      2      2.3E-9      2400      .3      2      .8      .1
$
*DEFINE_CURVE_TITLE
Kurve_Aktivmaterial
$      Id      SIDR      SFA      SFO      OFFA      OFFO      DATTYP
$      2      0      1      1      0      0      0
$      Abscissa      Ordinate
$      0.0      0.0100
$      0.1      0.0200
$      0.25      20.0000
$      0.35      80.0000
$      0.50      120.0000
$      1.0      200.0000

```

Abbildung 6.13: LS-DYNA-Materialkarte der Jellyroll.

6.4.3 Bereich plastischer Verformung

Das Verhältnis von relativer Volumenänderung zur Fließgrenze ist die wichtigste „Stellschraube“ zur Entwicklung des Materials für die Jellyroll. Die Berechnung der Spannungen im Material erfolgt hierbei in vier Schritten. Diese sind in der folgenden Auflistung angeführt und werden anschließend genauer betrachtet. Die entsprechenden Formeln gelten speziell für das LS-DYNA-Materialmodell „MAT_CRUSHABLE_FOAM (MAT_063)“ und wurden dem Theoriehandbuch [43] entnommen.

- Kräftegleichgewicht an Knotenpunkten
- Spannungstensor abschätzen
- Hauptspannungen mit Fließfläche vergleichen und ggf. skalieren
- Rücktransformation der Hauptspannungen auf Elementkoordinaten

Zunächst wird vom Solver ein Kräftegleichgewicht an den Knoten des FE-Modells angesetzt. Dies liefert für jeden Knoten eine entsprechende örtliche Verschiebung. Hieraus wird mithilfe von Formel 6.1 der Spannungszustand abgeschätzt, wobei σ_{ij}^n die Spannung aus dem vorhergegangenen Zeitschritt, E den Elastizitätsmodul, $\dot{\varepsilon}_{ij}^{n+\frac{1}{2}}$ die Änderungsrate der Verschiebung und $\Delta t^{n+\frac{1}{2}}$ die verstrichene Zeit darstellen.

$$\sigma_{xy}^{trial} = \sigma_{xy}^n + E \dot{\varepsilon}_{xy}^{n+\frac{1}{2}} \Delta t^{n+\frac{1}{2}} \quad (6.1)$$

Aus dem so ermittelte Spannungstensor (6.2) werden anschließend durch Formel 6.3 die Hauptspannungen berechnet. \mathbf{I} stellt hierbei die Einheitsmatrix dar.

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

$$\det(\mathbf{S} - \sigma \mathbf{I}) = 0 \quad (6.3)$$

Nach dieser Berechnung werden die drei Hauptspannungen mit der Fließgrenze σ_y , welche sich über die Materialcharakteristik in Tabelle 6.4 aus der momentanen relativen Volumenänderung ergibt, verglichen. Überschreitet eine der Hauptspannungen die Fließgrenze, so wird sie auf die Fließfläche skaliert. Dieser Rechenschritt ist in Formel 6.4 ersichtlich.

$$\text{falls } \sigma_y < |\sigma_i^{trial}| \quad \text{dann } \sigma_i^{n+1} = \sigma_y \frac{\sigma_i^{trial}}{|\sigma_i^{trial}|} \quad (6.4)$$

Anschließend werden die, gegebenenfalls skalierten, Hauptspannungen in das Koordinatensystem des Elements rücktransformiert und stehen dort zur Verfügung. So kann mittels der folgenden Materialcharakteristik das Verhalten des Werkstoffes bestimmt werden. Durch geeignete Variation dieser Kurve konnte dem Modell ein realistisches Materialverhalten aufgeprägt werden. Tabelle 6.4 und Abbildung 6.14 zeigen die ermittelten Werte.

Relative Volumenänderung	Fließgrenze
%	N/mm ²
0,00	0,01
0,10	0,02
0,25	20,00
0,35	80,00
0,50	120,00
1,00	200,00

Tabelle 6.4: Materialmodell der Jellyroll.

Fließgrenze [N/mm²]

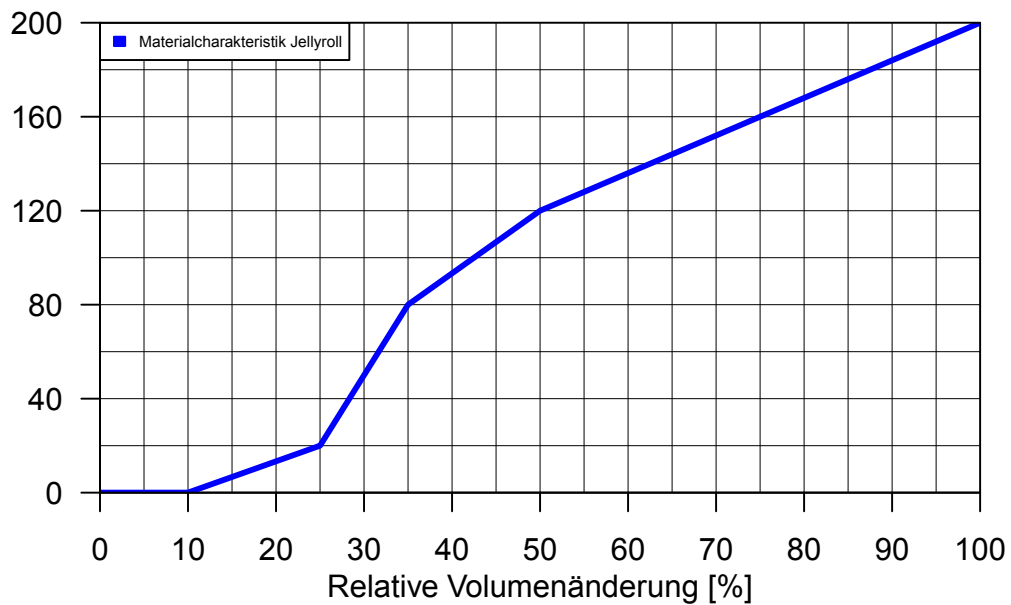


Abbildung 6.14: Materialmodell der Jellyroll.

6.4.4 Ergebnis

Das Verformungsverhalten in allen Konfigurationen kann als gute Näherung betrachtet werden. Ein Vergleich der Deformationsbilder ist in den Abbildungen 6.15 bis 6.18 dargestellt. Der Deformationsweg betrug bei allen Versuchen und Simulationen 10 mm.

Abbildung 6.15 zeigt Simulation und Versuch in der Konfiguration „Crush in X-Richtung“. Das Verhalten der Zelle in der Simulation kann hierbei als gut angesehen werden. Vor allem die gute Näherung der Faltung des Bodens der Zellen lässt darauf schließen, dass hier ein korrektes Werkstoffverhalten erzielt wurde. Das Reißen der Metalcan, welches in der Abbildung ersichtlich ist, wurde im Simulationsmodell nicht berücksichtigt.

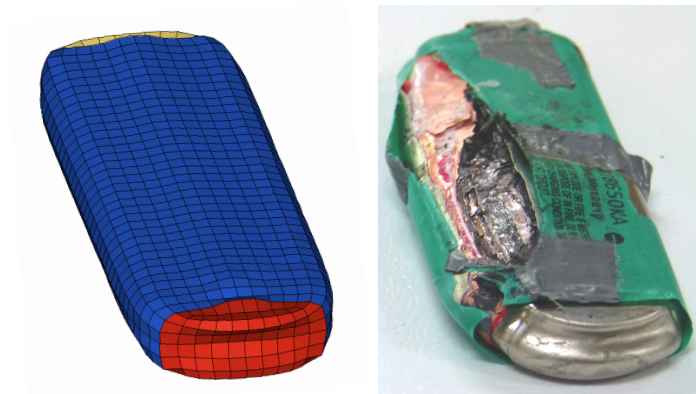


Abbildung 6.15: Deformationsbild von Simulation und Versuch bei „Crush in X-Richtung“.

In Abbildung 6.16 sieht man den Vergleich in der Konfiguration „Crush in Z-Richtung“. Im Gegensatz zur vorherigen Konfiguration konnte hier keine deutliche Übereinstimmung erzielt werden. Vor allem das, in der Abbildung erkennbare, Knicken der Zelle aus der Bildebene heraus konnte in der Simulation nicht nachgestellt werden.

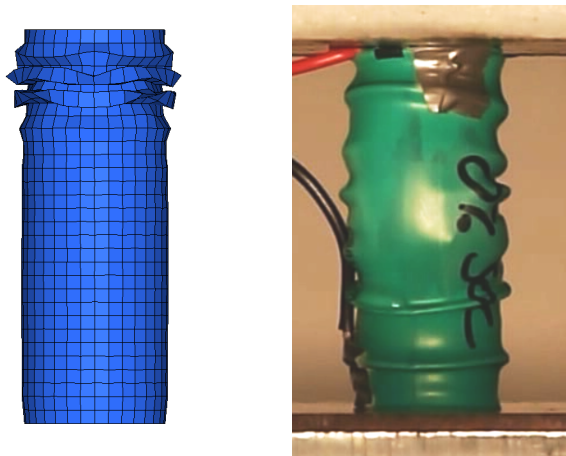


Abbildung 6.16: Deformationsbild von Simulation und Versuch bei „Crush in Z-Richtung“.

Das Simulationsergebnis in Abbildung 6.17 entspricht wiederum weitgehend der Realität. Klar erkennbar ist hier auch die korrekt wiedergegebene Wölbung des Zellenbodens rechts im Bild.

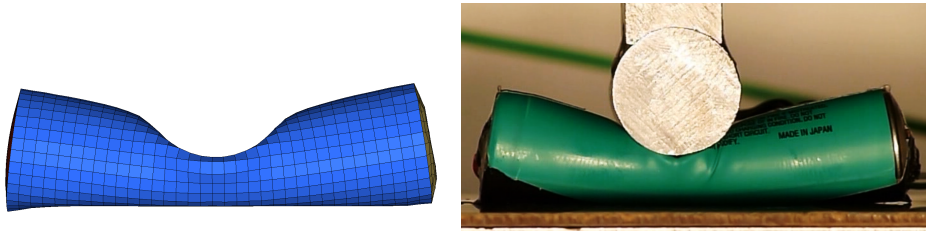


Abbildung 6.17: Deformationsbild von Simulation und Versuch bei „Penetration“.

Das Ergebnis der Berechnung in der Konfiguration „3-Punkt-Biegung“ ist in Abbildung 6.18 zu sehen. Auch hier konnte eine gute Übereinstimmung mit dem Deformationsverhalten im Versuch erreicht werden.

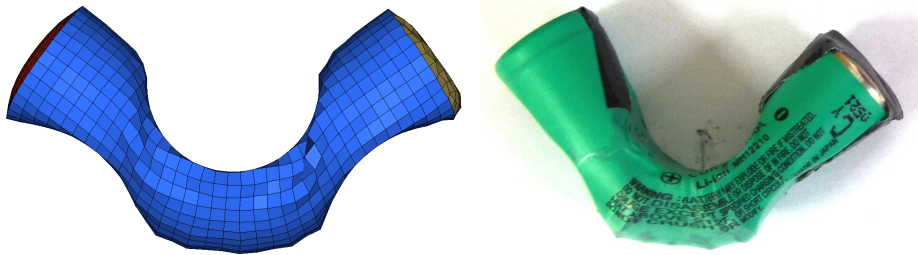


Abbildung 6.18: Deformationsbild von Simulation und Versuch bei „3-Punkt-Biegung“.

In den Abbildungen 6.19 bis 6.22 sind die Kraft-Weg-Kurven von Simulation und Versuch gegenübergestellt. Im Falle von „Crush in X-Richtung“ sowie „Penetration“ konnte eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messdaten erreicht werden, wohingegen bei den Konfigurationen „Crush in Z-Richtung“ und „3-Punkt-Biegung“ teilweise eine deutliche Abweichung zu erkennen ist. Der orange Balken in den Abbildungen stellt jenen Bereich dar, in welchem während der Versuche Kurzschlüsse aufgetreten sind. Die roten Linien repräsentieren jeweils zwei Versuche einer Konfiguration, welche die Ober- bzw. Untergrenze der ermittelten Daten darstellen.

Abbildung 6.19 vergleicht die Kraft-Weg-Kurven von Versuch und Simulation bei „Crush in X-Richtung“. Die blaue Linie stellt die berechneten Werte der Simulation dar. Abgesehen vom Bereich zwischen 3 und 6 mm Deformation erreicht diese Kurve eine gute Näherung an die Versuchsdaten. Vor allem im wichtigen Abschnitt kurz vor dem Kurzschlussbereich konnte den Versuchskurven gut gefolgt werden. Der Kraftabfall nach dem Eintritt des Versagens kann im Simulationsmodell nicht dargestellt werden, da hier im Experiment thermische Reaktionen für eine Zerstörung der Zelle gesorgt haben.

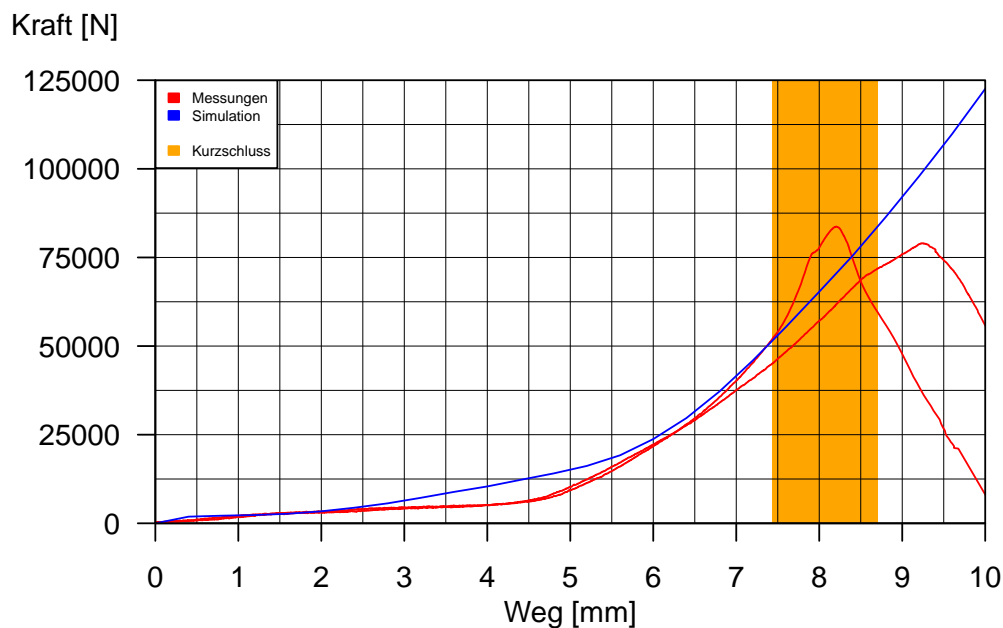


Abbildung 6.19: Simulation und Versuch bei „Crush in X-Richtung“.

In Abbildung 6.20 sind die Kraft-Weg-Kurven in der Konfiguration „Crush in Z-Richtung“ ersichtlich. In diesem Fall konnte keine zufriedenstellende Übereinstimmung erreicht werden. Eine Begründung hierfür liefert das isotrope Materialverhalten des Werkstoffmodells der Jellyroll. Dadurch reagiert die Simulation richtungsunabhängig, wodurch keine Anpassung an einen bestimmten Lastfall möglich ist. Als Begründung für die Wahl eines derartigen Materialmodells kann die einfache Parameterfindung genannt werden. Weiters wird angenommen, dass eine Stauchung der Zelle in Längsrichtung ein eher unwahrscheinlicher Lastfall in Unfallsituationen ist. Für zukünftige Entwicklungen sollte die Verwendung eines anisotropen Materialmodells jedenfalls aber in Betracht gezogen werden.

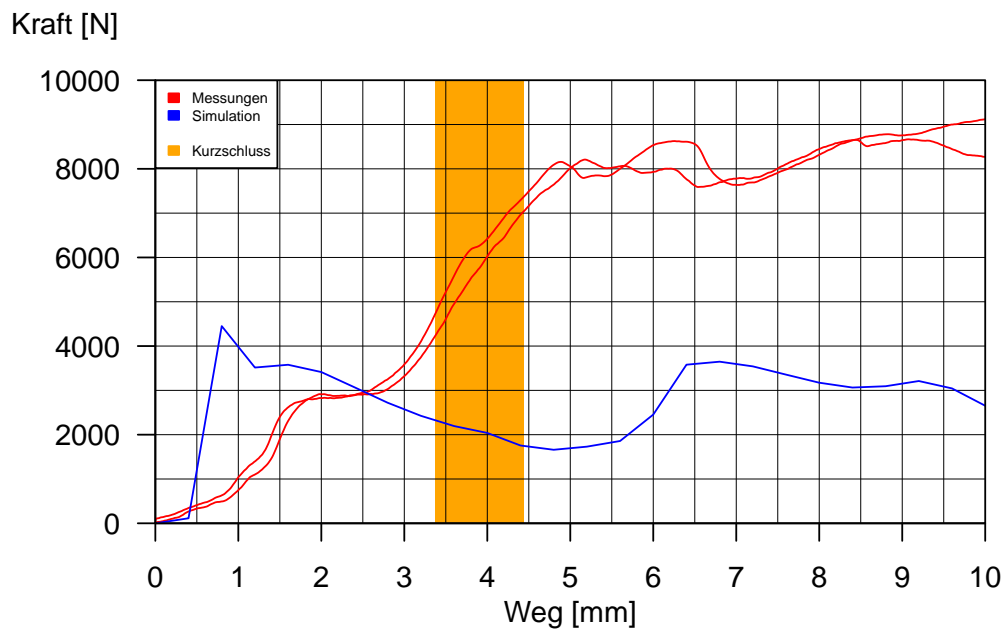


Abbildung 6.20: Simulation und Versuch bei „Crush in Z-Richtung“.

Der Lastfall „Penetration“ ist in Abbildung 6.21 dargestellt. Der Kraft-Weg-Verlauf der Simulation schmiegt sich über den gesamten Verlauf gut an die untere Versuchskurve. Dies rührt daher, dass diese Untergrenze während der Validierung als Referenz diente. Gleich wie im Fall „Crush in X-Richtung“ kann der Kraftabfall etwas vor dem Kurzschlussbereich nicht vom Simulationsmodell nachgebildet werden.

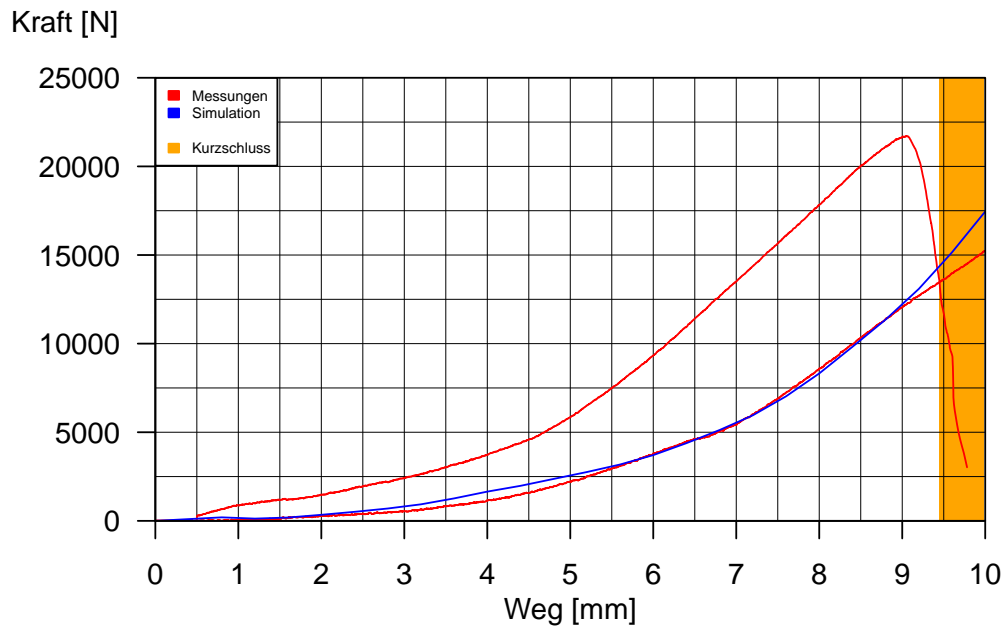


Abbildung 6.21: Simulation und Versuch bei „Penetration“.

Abbildung 6.22 zeigt die Ergebnisse der Validierung im Lastfall „3-Punkt-Biegung“. Auch hierbei kann der Nachteil des isotropen Werkstoffmodells als Begründung für die Abweichung der Simulationskurve angegeben werden. Trotzdem befindet sich die Simulation im Bereich bis zu einer Deformation von etwa 4 mm zwischen Ober- und Untergrenze. Mögliche Verbesserungsvorschläge werden im Ausblick (Kapitel 10) behandelt. In diesem Fall trat bis zu einer Verformung von 10 mm kein elektrisches Versagen auf, wodurch das Fehlen des Kurzschlussbereiches in der Abbildung erklärt wird.

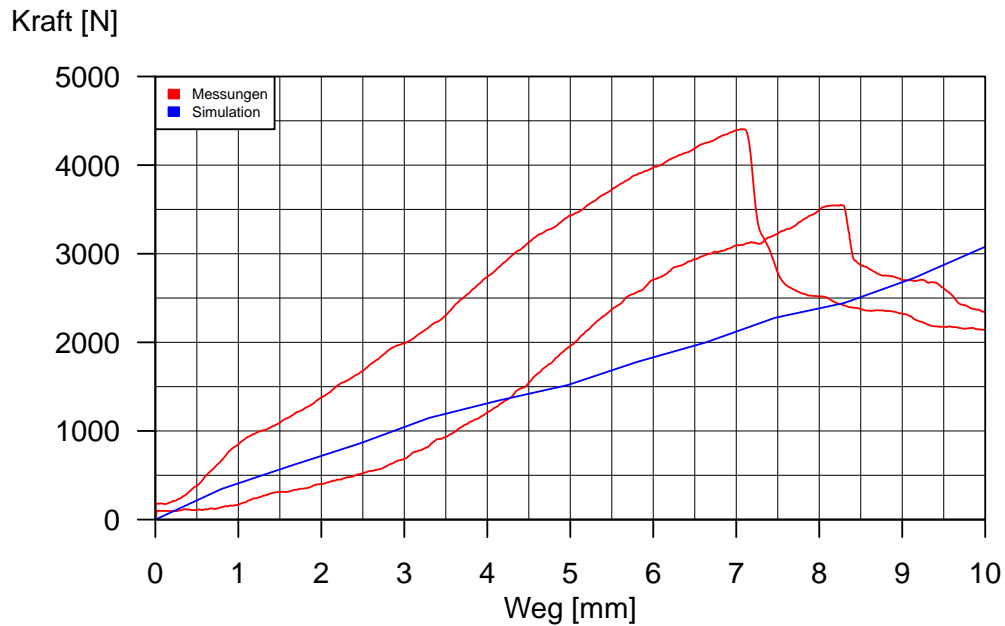


Abbildung 6.22: Simulation und Versuch bei „3-Punkt-Biegung“.

Da der Ansatz des makroskopischen Modells gewählt wurde, wurden bestimmte Bauteile mit anderen kombiniert, nur näherungsweise nachgebildet oder ganz vernachlässigt. Ein Beispiel für letzteren Fall ist ein Stahlrohr in der Mitte der Jellyroll. Dieses trägt nicht direkt zur Funktionsfähigkeit der Batterie bei, wird jedoch für den Herstellungsprozess benötigt. Ein Einfluss des Rohres auf das Verhalten der Zelle könnte eine mögliche Erklärung für die Abweichungen in den Versuchskonfigurationen „Crush in Z-Richtung“ und „3-Punkt-Biegung“ sein. Um diese Vermutung zu überprüfen wurde eine Versuchsreihe durchgeführt, deren Aufbau der „3-Punkt-Biegung“ entspricht. Statt einer Zelle wurde in diesem Fall jedoch nur das Stahlrohr als Prüfling verwendet. Die Messdaten der durchgeführten Versuche sind in Abbildung 6.23 ersichtlich.

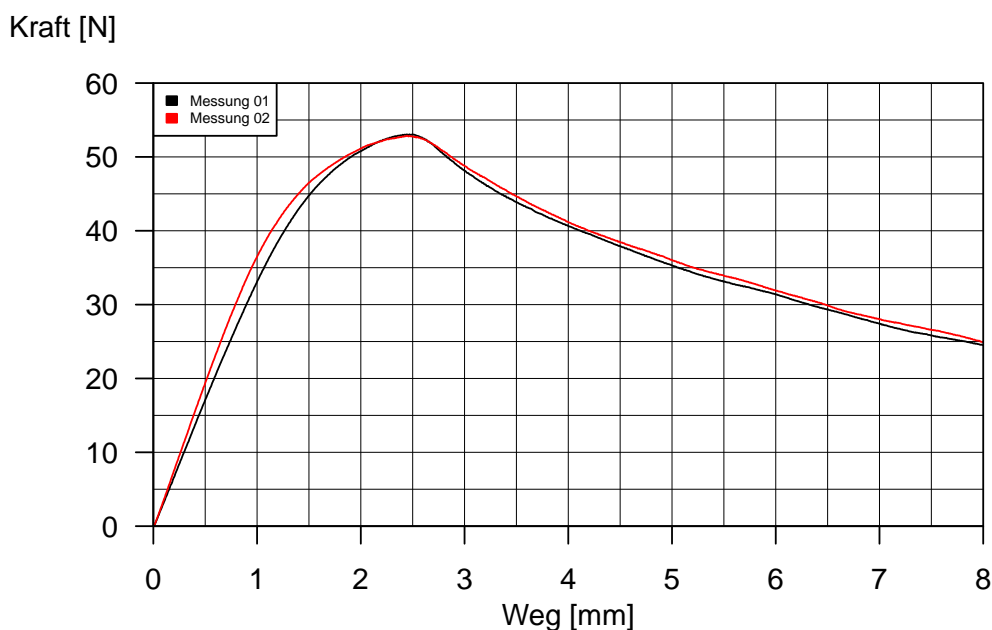


Abbildung 6.23: Kraft-Weg-Kurve des Stahlrohres bei „3-Punkt-Biegung“.

Die Kraftkurve beider Versuche steigt bis zu einer Deformation von ca. 2,5 mm auf ein Niveau von etwas über 50 N. Danach knickt das Rohr aus und verursacht dadurch einen Abfall der Prüfkraft. Dieses Verhalten kann als Ursache für den Einbruch der Kraftkurve im 3-Punkt-Biege-Versuch gedeutet werden. Weiter kann vermutet werden, dass die Längssteifigkeit des Rohres einen entscheidenden Einfluss auf das Verhalten der Zelle im Versuch „Crush in Z-Richtung“ hat. Jedenfalls muss angenommen werden, dass ein Durchstoßen von Isolatorschichten durch das Rohr in diesem Fall zu einem elektrischen Versagen der Zelle führt. Der mögliche Einfluss dieses Bauteils auf das Verhalten der Zelle wurde zu Beginn der Arbeit nicht erkannt. Ein nachträgliches Integrieren in das vorhandene Zellen-Modell hätte den zeitlichen Rahmen dieser Arbeit gesprengt und war deshalb nicht möglich. Eine Berücksichtigung dieses Bauteils in der weiteren Entwicklung der Simulation ist jedoch anzuraten.

Kapitel 7

Versagenskriterium

7.1 Motivation

Die Fähigkeit, den Zeitpunkt des Versagens einer Lithium-Ionen-Zelle und mögliche Folgen bei gegebener Belastung prognostizieren zu können, ist während der Entwicklung elektrisch angetriebener Fahrzeuge von immenser Wichtigkeit. Vor allem im Bereich der Crash-Analyse stellt das Wissen um die Belastbarkeit des Batterypacks eine Grundvoraussetzung zur fundierten Abschätzung des Risikopotenzials dar. In diesem Teil der Arbeit wird aus Versuchsdaten ein geeignetes Kriterium extrahiert, welches das Versagen einer Zelle zufolge mechanischer Belastung indiziert. Dieser Schwellwert wird anschließend im Simulationsmodell hinterlegt und ermöglicht die Prädiktion des elektrischen Versagens der Zelle.

7.2 Identifikation eines Kriteriums

Neben der Validierung der mechanischen Eigenschaften der Materialmodelle dienten die quasi-statischen Versuche aus Kapitel 4 dem Auffinden einer aussagekräftigen Kennzahl, welche bei Eintreten des Kurzschlusses in jeder Konfiguration einen vergleichbaren Wert annimmt. Durch Gegenüberstellung der Messdaten aus den Tests und der berechneten Werte der Simulationen konnte so ein charakteristisches Versagenskriterium ermittelt werden. Bei der Durchführung der Experimente fiel auf, dass der Zeitpunkt des Kurzschlussauftritts oft mit die Ausbildung eines Risses in der Metalcan zusammenfällt. Es kann angenommen werden, dass einem Reißen der Hülse eine gleichermaßen schwerwiegende Schädigung der Jellyroll vorausgeht bzw. nachfolgt. Dies lässt sich durch ein Überschreiten eines Spannungs- bzw. Dehnungsschwellwertes in den Elementen der Jellyroll erklären und hat das elektrische Versagen der Zelle zur Folge. Ebenso liegt die Vermutung nahe, dass ein bestimmtes Maß an eingebrachter Verformungsenergie zu einem Defekt führen kann. In der Literatur findet man mehrere Varianten zur Identifikation eines Versagenskriteriums aus Versuchsdaten. Beispielsweise wären dies ein plötzlicher Abfall der Prüfkraft in Kombination mit Spannungs- und Temperaturmessung [27] oder ein Materialversagen in der Jellyroll [26] zufolge mechanischer Spannungen. Zur Überprüfung dieser theoretischen Überlegungen zu möglichen Schadensmechanismen wurde eine

Analyse der Simulationsdaten vorgenommen. Als Vergleichsbasis wurden hierbei die Konfigurationen „Penetration“ und „Crush in X-Richtung“ herangezogen, da diese Varianten die beste Übereinstimmung in der Validierungsphase gezeigt haben. Da ein Versagen der Zelle durch eine Materialschädigung der Jellyroll verursacht wird, wurden für die folgenden Untersuchungen nur die Elemente dieses Bauteils berücksichtigt. Die Aufzählung gibt einen Überblick über die betrachteten Schadensmechanismen.

- Mechanische Spannung
- Volumenänderung
- Absorbierte Energie

7.2.1 Mechanische Spannung

Zunächst wurden die mechanischen Spannungen im Material untersucht. Um den räumlichen Spannungszustand der Volumenelemente übersichtlich darstellen zu können, wurde für jedem Zeitpunkt und jedes Element eine Vergleichsspannung nach der Gestaltänderungsenergiehypothese nach Richard von Mises berechnet und über der Deformation aufgetragen. Die von-Mises-Hypothese gilt im Allgemeinen für verformbare Werkstoffe [44], wie zum Beispiel duktile Metalle. Da die Jellyroll hauptsächlich aus Kupfer- bzw. Aluminiumschichten aufgebaut ist, wurde die Zulässigkeit dieses Verfahrens für den vorliegenden Fall angenommen. Die Berechnung der von-Mises-Spannung σ_v ist in Formel 7.1 erklärt und wurde Dubbel [44] entnommen.

$$\sigma_v := \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + \sigma_{zz}^2 - \sigma_{xx}\sigma_{yy} - \sigma_{xx}\sigma_{zz} - \sigma_{yy}\sigma_{zz} + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)} \quad (7.1)$$

7.2.2 Relative Volumenänderung

Ein weiterer Ansatz zur Identifikation eines Kurzschlusskriteriums besteht im Vergleich der integrierten, relativen Volumenänderung der Elemente im FE-Modell. Die relative Volumenänderung γ wird im LS-DYNA-Theoriehandbuch [43] als „volumetric strain“ bezeichnet und ist durch Formel 7.2 definiert. Hierbei ist V_{rel} das Verhältnis zwischen momentanem und ursprünglichem Elementvolumen. LS-DYNA liefert für jedes Element den Integralwert von γ über der Zeit, welcher zur Auswertung herangezogen wird.

$$\gamma := \ln V_{rel} = \ln \frac{V}{V_0} \quad (7.2)$$

7.2.3 Absorbierte Energie

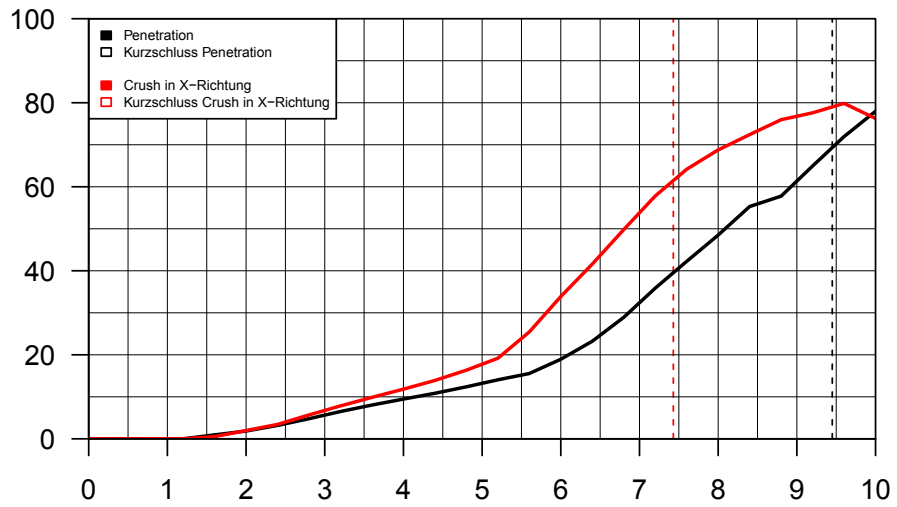
Ebenso könnte die von der gesamten Zelle während des Tests absorbierte Energie einen Hinweis auf das Versagen der Batterie liefern. Der Begriff „absorbierte Energie“ bezeichnet in diesem Fall das Integral der vektoriellen Prüfkraft \mathbf{F} über der Deformation \mathbf{s} . Beide Vektoren sind senkrecht zur Auflagefläche der Prüfanlage gerichtet und demnach parallel zur Hubbewegung. Die mathematische Definition ist in Formel 7.3 ersichtlich. Nachteilig ist hierbei, dass dieses Kriterium einen globalen Wert über die gesamte Zelle liefert. Es könnte somit der Eintritt des Versagens bestimmt werden, die Vorhersage des genauen Ortes des Kurzschlusses ist jedoch nicht möglich.

$$E_a := \int \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s} \quad (7.3)$$

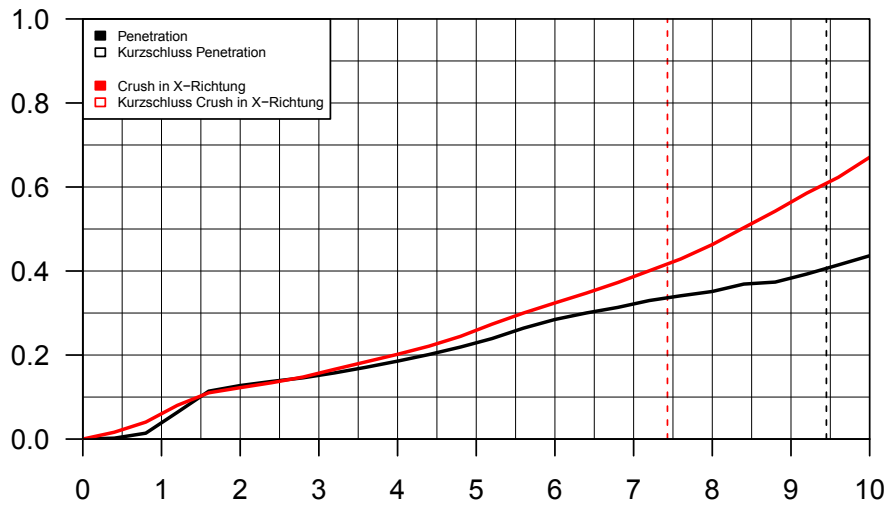
7.2.4 Festlegen eines Kriteriums

Es wurden nun diese drei Werte in beiden Versuchskonfigurationen berechnet und über der Deformation aufgetragen. Diese Werte, sowie der Beginn des Kurzschlussstreubandes für die jeweilige Konfiguration, sind in den Kurven in Abbildung 7.1 ersichtlich.

Spannung [N/mm²]



Volumenänderung [-]



Absorbierte Energie [J]

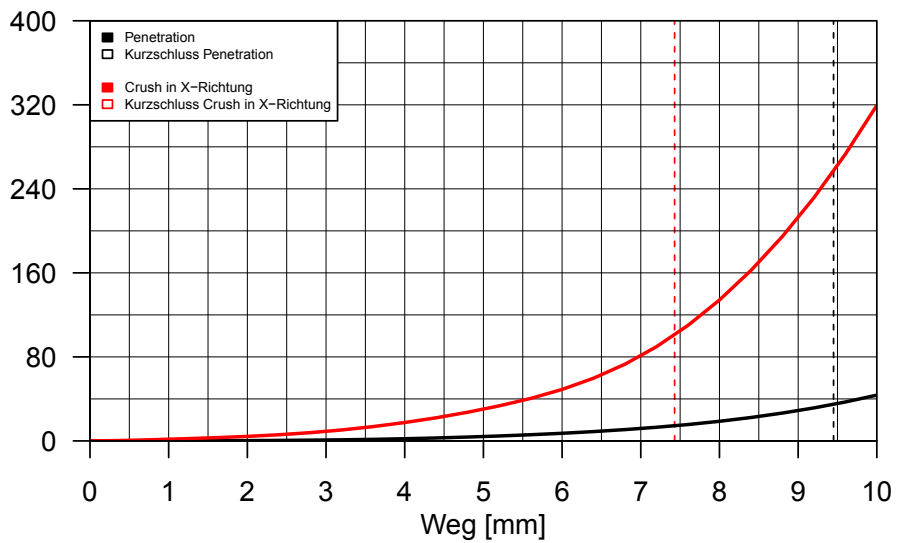


Abbildung 7.1: Identifikation eines Versagenskriteriums.

Die absorbierte Energie wird global für die gesamte Zelle ermittelt. Die Berechnung der mechanischen Spannungen und der relativen Volumenänderung ist jedoch auf ein Element bezogen. Als Grundlage für die folgenden Berechnungen wurde das Volumenelement „E300354“ (siehe Abbildung) gewählt. Dieses Element ist bei beiden Berechnungen und in beiden Konfigurationen hohen Belastungen ausgesetzt und somit als Vergleichsbasis gut geeignet. Da in den vorliegenden Fällen eher Druckbelastungen auftreten, würden sich für die relative Volumenänderung meist negative Zahlenwerte ergeben. Zur übersichtlicheren Darstellung wird die Ordinate dieser Kurve daher mit dem Faktor „-1“ skaliert. Die Werte an den Schnittpunkten der berechneten Kurven mit den Kurzschlussdeformationen KS_{min} sind in Tabelle 7.1 eingetragen. Ebenso ist die prozentuale Abweichung vom Mittelwert angegeben.

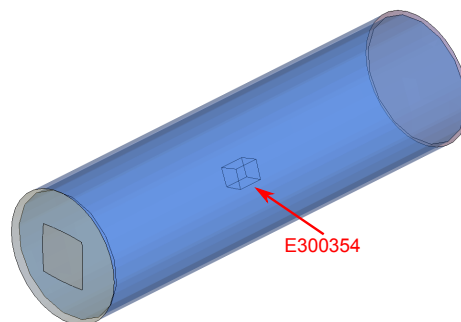


Abbildung 7.2: Position des hochbelasteten Elements „E300354“.

Konfiguration	KS_{min}	σ_v	γ	E_a
	mm	$\frac{N}{mm^2}$	-	J
Penetration	9,45	69	0,41	100
Crush in X-Richtung	7,43	62	0,42	35
Abweichung in %	11,97	5,34	1,20	48,15

Tabelle 7.1: Identifikation eines Versagenskriteriums.

Es ist klar ersichtlich, dass die Werte der absorbierten Energie große Unterschiede zueinander aufweisen und somit keine Eignung haben, um als allgemein gültiges Versagenskriterium zu dienen. Im Gegensatz dazu liegen die Werte für die mechanischen Spannungen relativ nahe zusammen. Es kann hierfür eine Abweichung vom Mittelwert von knapp über 5 % angegeben werden. Sehr gute Übereinstimmung zeigt die integrierte, relative Volumenänderung bei Werten von etwas über 0,4. Mit einer relativen Abweichung der beiden Konfigurationen zueinander von ca. 1 % kann dies somit als aussagekräftigstes Kriterium angesehen werden. Ein weiterer Vorteil des Kriteriums „Volumenänderung“ ist der Bezug auf ein konkretes Element. Somit ist eine exakte, örtliche Vorhersage eines eventuellen Kurzschlusses möglich. Die Genauigkeit dieser Positionsangabe ist durch die Meshsize der Jellyroll vorgegeben. Ebenso ist dieses Kriterium unabhängig von der Richtung der Lastaufbringung, da zur Bestimmung des Versagens die Volumenänderung des Elements entscheidend ist. Die Art der Last (Zug, Druck)

hat jedoch entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis, da abhängig davon der Integralwert der relativen Volumenänderung erhöht oder vermindert wird (siehe Formel 7.2). Abschließend ist noch anzumerken, dass der Einfluss des Ladezustandes der Zelle in diesen Betrachtungen nicht berücksichtigt wurde. In der Konfiguration „Crush in X-Richtung“ wurden nur Versuche mit entladenen Zellen durchgeführt. Um die Vergleichbarkeit zu erhalten wurden daher auch in der Konfiguration „Penetration“ nur Versuchsdaten von Tests mit 0 % SOC herangezogen.

Kapitel 8

Anwendungsbeispiel

8.1 Motivation

Im vorhergehenden Kapitel wurde ein aussagekräftiges Kriterium zur Vorhersage des Zellversagens ermittelt. Dieses Kriterium wird nun im Simulationsmodell hinterlegt. Die Funktionsfähigkeit der Kurzschlussprädiktion wird nun durch Nachstellen einer dynamischen Belastung auf die Zelle, welche für Fahrzeugunfälle charakteristisch ist, demonstriert.

8.2 Auswahl eines dynamischen Lastfalles

Der folgende Abschnitt beschäftigt sich mit der Suche nach einer geeigneten Versuchskonfiguration, anhand der das Simulationsmodell auf seine Tauglichkeit zur Vorhersage von Kurzschlussereignissen hin untersucht werden soll. Als Entscheidungsgrundlage hierfür dienen Erfahrungen aus den Versuchen in Kapitel 4, Ergebnisse von Crashtests, welche anhand statistischer Auswertung von Unfalldaten konzeptioniert wurden und Prüfverfahren aus einschlägigen Normen.

8.2.1 Quasi-statische Versuche

Bei der Durchführung der Versuche zeigte sich, dass geladene Zellen (100 % SOC) vom Typ „18650“ bei mechanischer Belastung äußerst heftig reagieren. Als Beispiel hierfür dient Abbildung 8.1, welche das explosionsartige Ausgasen einer Zelle während eines Penetration-Versuchs deutlich erkennen lässt.



Abbildung 8.1: Reaktion einer 18650-Zelle bei mechanischer Beschädigung.

Eine qualitative Beurteilung der möglichen Reaktionen von Zellen ist mithilfe der Hazard-Severity-Levels nach EUCAR [45] möglich. Tabelle 8.1 wurde inhaltlich SAE J2464 [28] entnommen und listet diese Gefahrenklassen und deren Merkmale zur Einteilung auf.

Level	Beschreibung	Klassifizierung und Auswirkung
0	Keine Auswirkung	keine Auswirkung keine Funktionseinschränkung
1	Passives Schutzsystem spricht an	keine Beschädigung, keine Leckage kein Gasaustritt, kein Feuer, kein Bruch keine Explosion, keine exotherme Reaktion kein Thermal Runaway Zelle reversibel beschädigt Reparatur des Schutzsystems notwendig
2	Beschädigung	keine Leckage, kein Gasaustritt kein Feuer, kein Bruch, keine Explosion keine exotherme Reaktion, kein Thermal Runaway Zelle irreversibel beschädigt Reparatur notwendig
3	Leckage Masseverlust < 50 %	kein Gasaustritt, kein Feuer kein Bruch, keine Explosion Elektrolyt-Austritt < 50 %
4	Gasaustritt Masseverlust \geq 50 %	kein Feuer, kein Bruch keine Explosion Elektrolyt-Austritt \geq 50 %
5	Bruch	keine Explosion keine herumfliegenden Teile
6	Feuer	keine Explosion, Funkenbildung \neq Feuer herumfliegenden Teile
7	Explosion	Explosionsartige Zerstörung der Zelle

Tabelle 8.1: Bewertung der Zell-Reaktionen nach EUCAR [45] [28].

Während der Versuchsdurchführung wurden neun Prüflinge im geladenen Zustand solange deformiert, bis eine deutliche Reaktion nach Hazard-Level 3 oder höher auftrat. Dies geschah in den Konfigurationen „3-Punkt-Biegung“ und „Penetration“. Im erstgenannten Fall trat bei sieben Prüflingen eine Schädigung nach Hazard-Level 5 auf. Weitere zwei müssen Level 7 zugeordnet werden. Bei den Penetration-Tests trat Level 5 lediglich bei zwei Versuchen auf. Fünfmal konnte Level 6 festgestellt werden und zweimal Level 7. Aufgrund dieser Betrachtung kann die Versuchskonfiguration „Penetration“ für die untersuchte Zelle als die brisantere angesehen werden. Da hierbei somit ein höheres Gefahrenpotenzial erkannt werden konnte, erscheint eine Demonstration des Simulationsmodells anhand eines entsprechenden Belastungsszenarios als plausibel. In Tabelle 8.2 ist die Auftrittshäufigkeit der verschiedenen Hazard-Levels für beide Versuchskonfiguration angegeben.

	Penetration	3-Punkt-Biegung
Level 0	-	-
Level 1	-	-
Level 2	-	-
Level 3	-	-
Level 4	-	-
Level 5	2	7
Level 6	5	-
Level 7	2	2

Tabelle 8.2: Einteilung der Reaktionen in den Versuchen nach Häufigkeit.

8.2.2 Erkenntnisse aus durchgeführten Crashtests

Im Zuge eines Projekts am Institut für Fahrzeugsicherheit in Zusammenarbeit mit KTM-Sportmotorcycle AG wurde ein Vorserienprototyp einem Crashtest unterzogen. Zur Ermittlung geeigneter, aussagekräftiger Versuchsanordnungen wurde im Vorfeld der Tests eine Analyse von Realunfällen mithilfe der Unfalldatenbank ZEDATU [46] durchgeführt. Diese Untersuchung führte zur Erkenntnis, dass Seitenaufprall-Situationen eine häufig auftretende Konfiguration bei Motorradunfällen im Ortsgebiet (Tempolimit 50 km/h) darstellen und daher besonderer Beachtung bedürfen. Um diesem Umstand nachzukommen, wurde ein dementsprechender Test durchgeführt. Abbildung 8.2 zeigt die Position der Unfallgegner kurz vor dem Crash. Der PKW wird hierbei auf eine Geschwindigkeit von 36 km/h gebracht und trifft das Motorrad seitlich in einem Winkel von 90°.



Abbildung 8.2: Crashtest „Seitenaufprall“ mit PKW und Motorrad.

Bei der Auswertung dieses konkreten Crashtests ging hervor, dass eine starke Belastung des Batterypacks durch ein Anschlagen des Rohrrahmens an das Gehäuse des Energiespeichers verursacht wurde. Die Einbausituation der Batteriezellen gegenüber dem Fahrzeugrahmen ist in der Fotomontage in Abbildung 8.3 ersichtlich. Hierbei wird deutlich, dass dieser Lastfall wiederum den Zellversuchen in der Konfiguration „Penetration“ ähnlich ist. Eine derartige Beanspruchung der Zelle entspricht somit einer möglichen, realen Unfallsituation.

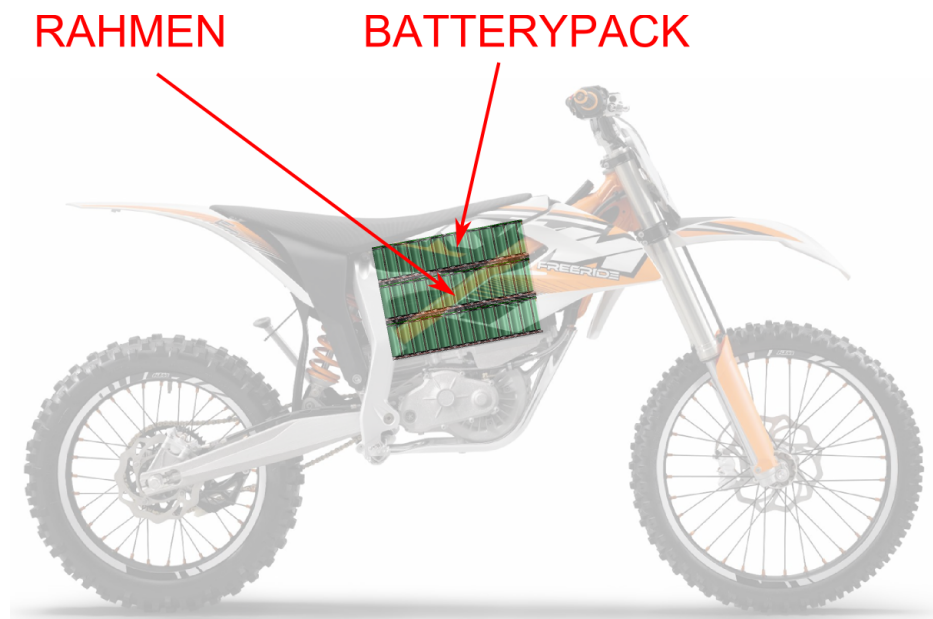


Abbildung 8.3: Einbausituation der Batteriezellen im Fahrzeug.

8.2.3 Lastfall in der Norm

In die Suche nach einem charakteristischen Lastfall für Lithium-Ionen-Zellen in Crashsituationen wurden auch die Ergebnisse der Literaturrecherche in Kapitel 3 einbezogen. Dies führte auf den „Impact-Test“ nach Norm UL1642, welcher eine „dynamische Variante des Penetration-Tests“ darstellt. Die Anordnung dieses Versuches ist in Abbildung 8.4 nochmals dargestellt.

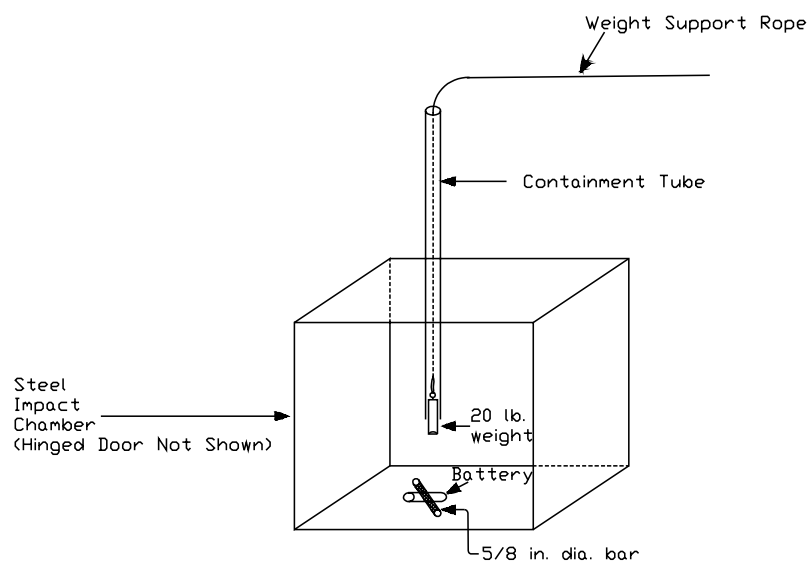


Abbildung 8.4: Impact-Test nach UL1642.

8.3 Konkrete Anwendung des Zellen-Modells

Nachdem nun ein charakteristisches Versagenskriterium ($\gamma \geq 0,4$) ermittelt wurde, kann ein entsprechendes FE-Modell aufgebaut werden. LS-DYNA ist als expliziter FE-Solver gut geeignet, dynamische Vorgänge zu simulieren. Als Lastfall wird die Versuchsanordnung des „Impact“-Test nach UL1642 nachgestellt. Um ähnliche Belastungen wie im realen Crash-test zu erhalten, wird als Versuchsgeschwindigkeit - abweichend von UL1642 - ein Wert von 36 km/h gewählt. Eine direkte Anwendung des Zellen-Modells im Motorrad ist nicht möglich, da zur Zeit kein vollständiges Simulationsmodell des gesamten Fahrzeuges verfügbar ist. Zur Vorhersage des Zellversagens wird die integrale, relative Volumenänderung jedes Elements der Jellyroll zu jedem Zeitschritt der Simulation aufgezeichnet und prozentual auf das Versagenskriterium (0,4) skaliert. Sobald $\gamma \geq 0,4$ wird, erreicht die Risikozahl einen Wert von 100 % und signalisiert damit, dass ein Versagen der Zelle sehr wahrscheinlich ist. Gleichzeitig wird der höchste, bis zu diesem Zeitschritt erreichte, Wert dieser „Risikozahl“, gemeinsam mit dem Identifikator des zugehörigen Elements, für spätere Auswertungen vorgemerkt. Diese Variable enthält nach Durchlauf aller Zeitschritte die ID des höchstbelastetsten Elements. Der Ablauf des gesamten Berechnungsvorganges ist in Abbildung 8.5 zu sehen.

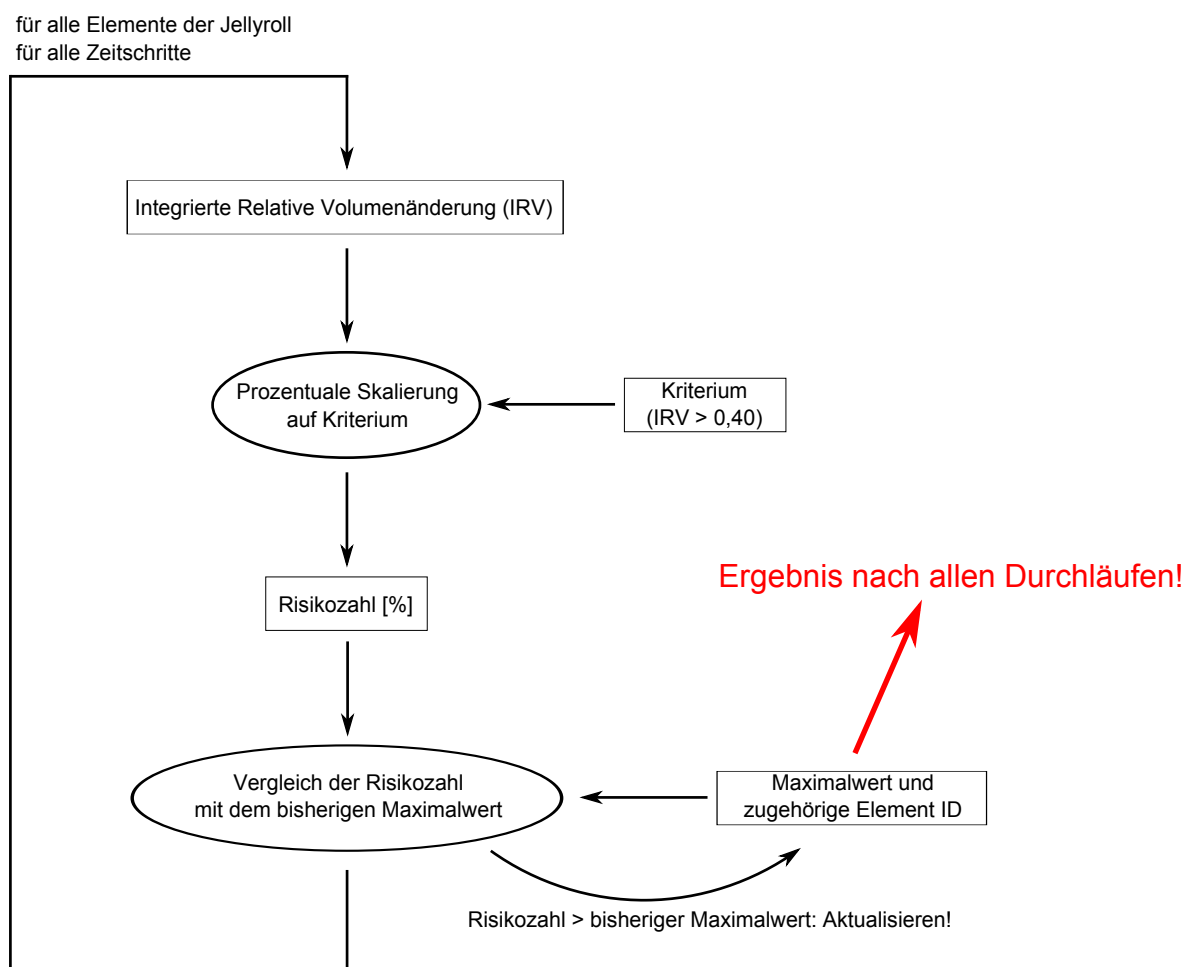


Abbildung 8.5: Ablauf der Berechnung der Risikozahl.

Die Funktionsdefinition in LS-DYNA zur Berechnung dieser Risikozahl ist in Abbildung 8.6 für einige Elemente des FE-Modells beispielhaft dargestellt.

```

$ *****
$                                     F U N C T I O N
$ *****
$.>...1>...2>...3>...4>...5>...6>...7>...8
*DEFINE_CURVE_FUNCTION
$ ID
  400001
$ FUNCTION
MIN(ABS(ELHIST(300001,0,7,-1,1))*100/0.4,100)

.
.
.

*DEFINE_CURVE_FUNCTION
$ ID
  400576
$ FUNCTION
MIN(ABS(ELHIST(300576,0,7,-1,1))*100/0.4,100)
    
```

Abbildung 8.6: Definition einer FUNCTION in LS-DYNA.

Die Simulation liefert das Ergebnis, dass ab einer Verformung von 9,5 mm zumindest ein Element (konkret „E300255“) das Kriterium erreicht hat und somit ab dieser Marke ein Versagen der Zelle wahrscheinlich ist. Es lässt sich also folgern, dass bei einer realen Nachstellung dieses Versuches mit einem Kurzschluss gerechnet werden muss. Für den Fall, dass die hierzu verwendeten Zellen einen Ladezustand von 100 % SOC aufweisen, besteht zusätzlich die Gefahr einer heftigen, thermischen Reaktion. Die Position des Elements „E300255“ in der Zelle und somit der berechnete Ort des Kurzschlusses ist in Abbildung 8.7 ersichtlich.

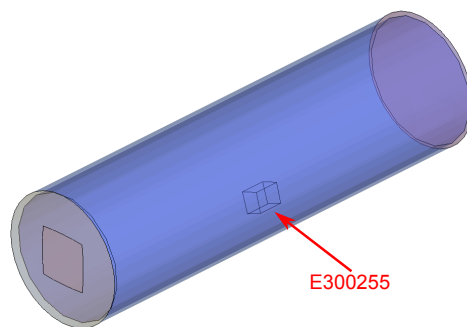


Abbildung 8.7: Berechneter Ort des Kurzschlusses.

Die Deformation der Zelle durch den eindringenden Gegenstand während des dynamischen Versuches ist in Abbildung 8.8 dargestellt. Der Prüfkörper mit einer Masse von 9,1 kg trifft in diesem Versuch mit einer Geschwindigkeit von 36 km/h auf die Zelle auf.

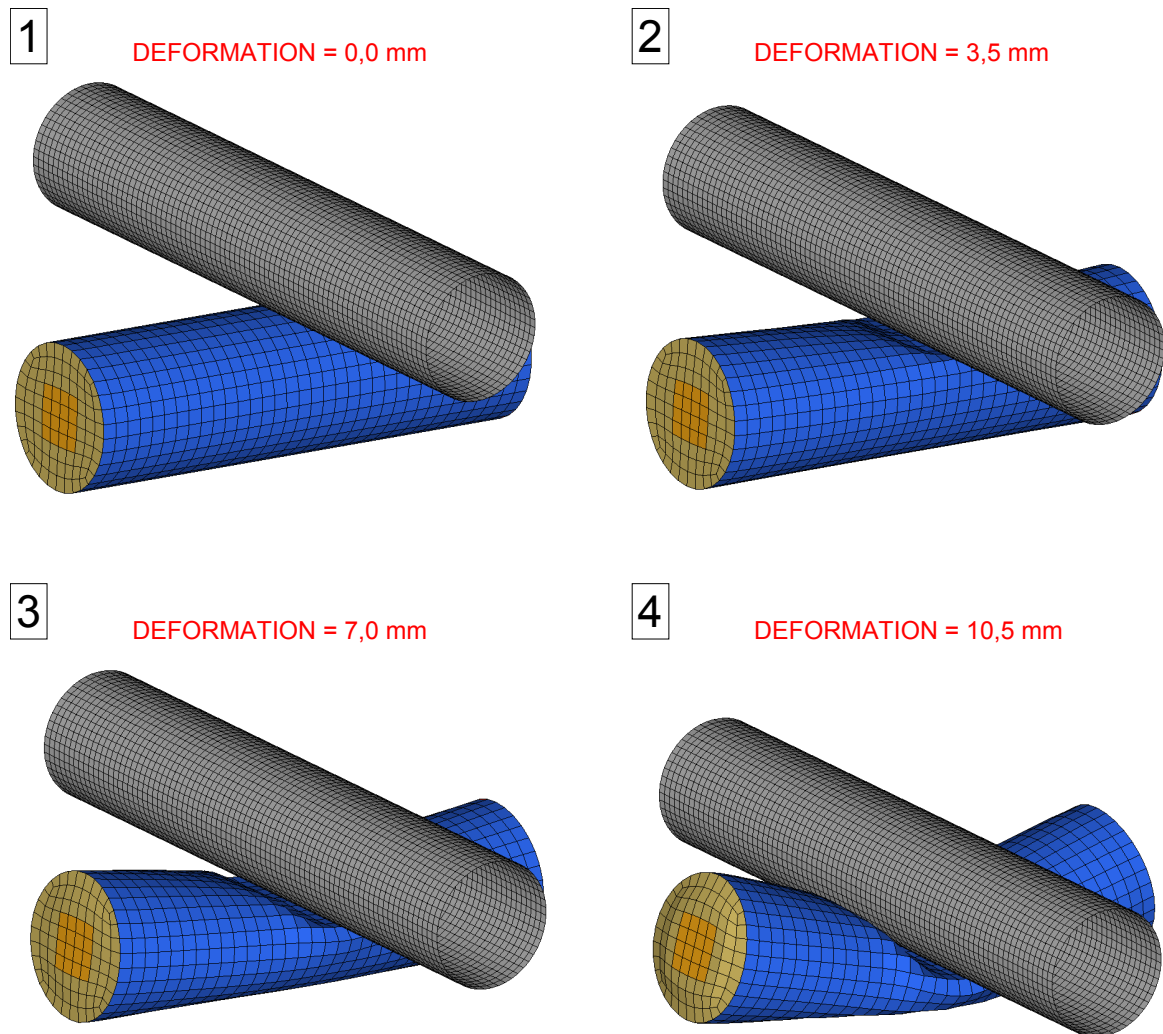
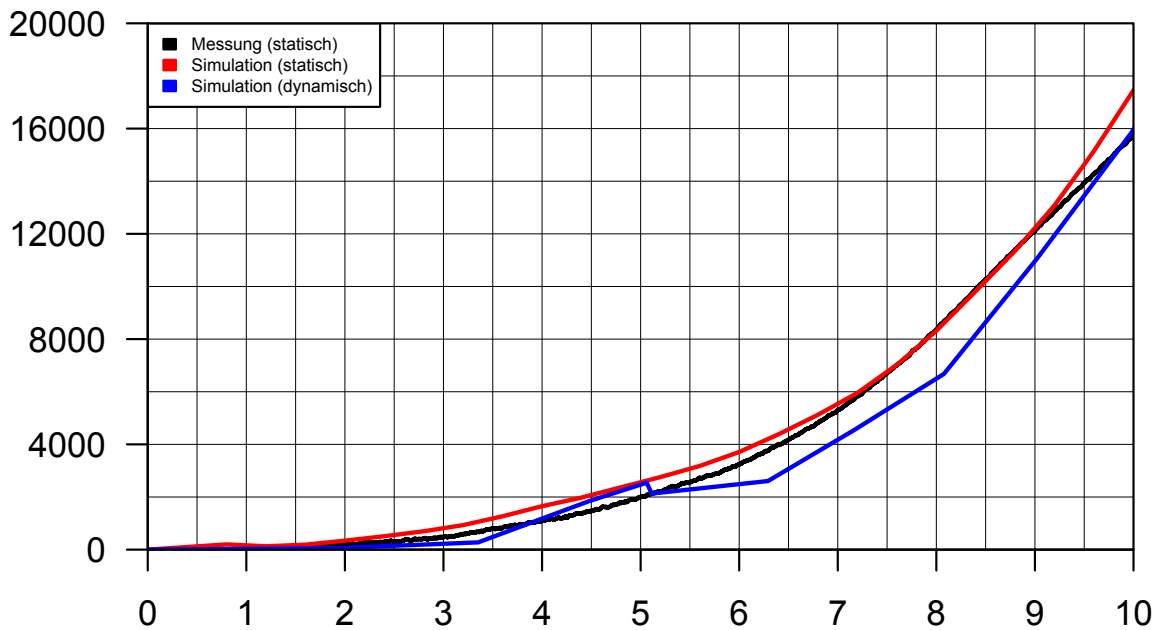


Abbildung 8.8: Verformung der Zelle während der dynamischen Simulation.

Die Kraft-Weg-Kurve des simulierten „Impact“-Tests ist in Abbildung 8.9 oben zu sehen. Zum Vergleich sind ebenso die Ergebnisse der statischen Penetration-Simulation, sowie des statischen Validierungstests eingezeichnet. Im unteren Bereich der Abbildung ist der Verlauf der „Risikozahl“ des Elements „E300255“ dargestellt. Dieses war in der durchgeführten Simulation jenes Element, welches den konkreten Höchstwert von 100 % als erstes der gesamten Zelle erreicht hat. Aus der Abbildung kann eine Deformation bei Versagen von etwa 9,5 mm abgelesen werden. Der Unterschied der Kraft-Weg-Kurve zum statischen „Penetration“-Tests kann auf den Einfluss dynamischer Effekte zurückgeführt werden. Ein Ansatz zur Verminderung dieser Abweichung wäre die Berücksichtigung der Dehnratenabhängigkeit im Materialmodell.

Kraft [N]



Risikozahl [%]

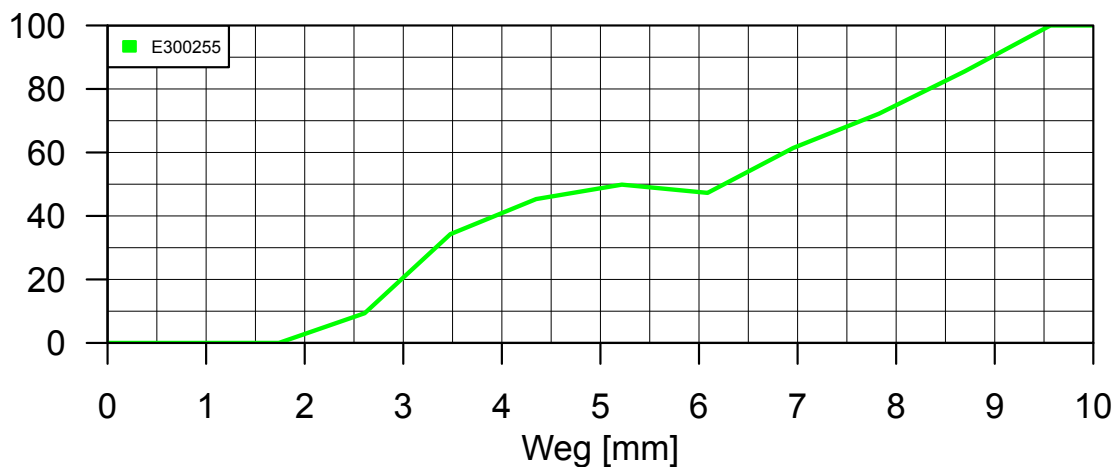


Abbildung 8.9: Kraft-Weg-Kurve und Risikozahl des simulierten „Impact“-Tests.

Kapitel 9

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde der konstruktive Aufbau einer Lithium-Ionen-Zelle vom Typ „18650“ analysiert und in weiterer Folge in einem abstrakten Modell nachgestellt. In mehreren Versuchsreihen wurde eine umfassende Datenbank an Messwerten aufgebaut. Diese enthält die charakteristischen (Material-)eigenschaften der Zelle, sowie Informationen zum Auftritt von Kurzschlüssen. Durch Validierung des Simulationsmodells anhand dieser Datenbasis konnte dem Modell ein realistisches Verhalten aufgeprägt werden. Die Ergebnisse in einigen Lastfällen zeigten jedoch auch Möglichkeiten zur Verbesserung des Modells auf. Weiters konnte aus den Messdaten erfolgreich ein aussagekräftiges Versagenskriterium extrahiert werden. Dies ermöglichte die Koppelung von mechanischen Deformationen und elektrischem Verhalten der Zelle. Dieser Grenzwert, der den Auftrittszeitpunkt eines Kurzschlusses anzeigt, wurde anschließend im Simulationsmodell hinterlegt, sodass zu jedem Zeitpunkt des Berechnungsvorganges kontrolliert werden kann, ob ein Versagen der Zelle vorliegt. Im Konkreten konnte die integrierte Volumenänderung der Elemente der Jellyroll als aussagekräftiges Kriterium ermittelt werden. Erreicht diese dimensionslose Kennzahl einen Wert von 0,4, so ist ein Versagen der Zelle sehr wahrscheinlich. Zur anschaulichen Darstellung wird dieser Wert vom Simulationsprogramm auf eine Prozentskala umgelegt, sodass ein „Kurzschlussrisiko“ in Prozent ausgegeben wird. Abschließend kann angemerkt werden, dass die gestellten Aufgaben erreicht wurden und somit ein Simulationsmodell verfügbar ist, welches mechanische Deformationen einer Li-Ionen-Zelle in realistischer Weise nachstellen und ein mögliches Versagen prognostizieren kann.

Kapitel 10

Ausblick

10.1 Verbesserung des Modells

Da für die Entwicklung eines makroskopischen Zellen-Modells noch keine Erfahrungswerte vorlagen, ergaben sich neben dem gewonnenen Know-how logischerweise auch Verbesserungsmöglichkeiten. Wie bereits in Kapitel 6 erwähnt, konnte bei den Versuchskonfigurationen „Crush in Z-Richtung“ und „3-Punkt-Biegung“ kein optimales Ergebnis erreicht werden. Die festgestellten Abweichungen zwischen Versuch und Simulation können möglicherweise auf eine fehlende Richtungsabhängigkeit des Modells zurückgeführt werden. Diese wurde während der Entwicklung zunächst unterschätzt. Durch eine Berücksichtigung des mittig angeordneten Stahlrohres im FE-Modell könnte hier wahrscheinlich eine Verbesserung erzielt werden. Es bieten sich zwei Varianten zur Abbildung des Einflusses des Rohres an. Zum einen würde durch den Einbau eines Balken-Elementes (BEAM) mit anisotroper Charakteristik die nötige Steifigkeit in die jeweilige Belastungsrichtung geschaffen werden. Zum anderen wäre es ebenso denkbar, das Stahlrohr als solches zu modellieren und den Detaillierungsgrad des Modells damit zu heben. Diese Erweiterung hätte aber zur Folge, dass neben einer höheren Anzahl an Elementen im Rechenetz auch die Zahl der notwendigen Kontakt- und Randbedingungen ansteigt. Die so erzielte Verbesserung der Ergebnisqualität würde in diesem Fall mit stark erhöhtem Rechenaufwand erkaufte werden. Ob dieser Schritt die Qualität des Simulationsmodells im Gesamten steigert, bleibt fraglich und müsste im Einzelnen untersucht und beurteilt werden. Mit der Erfahrung aus den bisher durchgeführten Crashtests kann jedoch argumentiert werden, dass eine Belastung der Zelle in Längsrichtung (Z-Richtung) als eher unwahrscheinlich anzusehen ist und daher einen untergeordneten Lastfall darstellt. Ein weiterer Ansatz zur Erzielung einer höheren Längs- bzw. Biegesteifigkeit wäre die Verwendung eines anisotropen Materialmodells für die Jellyroll. Hierdurch könnte die notwendige Richtungsabhängigkeit der Materialeigenschaften erreicht werden. Der hierzu nötige Aufwand würde durch ein Simulationsmodell entschädigt werden, welches unabhängig vom Lastfall korrekte Werte liefert.

Im Fall der Konfiguration „3-Punkt-Biegung“ gibt es noch weitere Punkte, die einer Klärung bedürfen. Bei einer Deformation im Bereich um 7,5 mm (siehe Abbildung 6.22 in Kapitel 6) ist in den Versuchsdaten ein deutlicher Einbruch der Prüfkraft zu erkennen. Dies kann möglicherweise durch ein Aufreißen der Metalcan begründet sein. Ein Studium des Videomaterials unterstützt diese Annahme. Zur Überprüfung wurde dem Materialmodell der Metalcan eine Versagensbedingung (FAIL) hinterlegt. Hierbei löscht der FE-Solver alle Elemente des Modells, welche eine vorher definierte Grenzdeformation (Dehnung $> 50\%$) überschreiten. Diese Funktionalität des Programms soll dem tatsächlichen Reißen des Materials bei Erreichen der Bruchdehnung Rechnung tragen. Obwohl das dahingehend angepasste Simulationsmodell eine Rissbildung in der Metalcan nachbilden konnte, wurde trotzdem kein nennenswerter Einfluss auf den Kraftverlauf festgestellt.

Einen weiteren wichtigen Punkt zur Verbesserung des Simulationsmodells stellt die Kontrolle des ermittelten Versagenskriteriums dar. Da zur Identifikation desselben nur zwei validierte Versuchskonfigurationen („Penetration“ und „Crush in X-Richtung“) zur Verfügung standen, kann nicht von einer repräsentativen Stichprobe gesprochen werden. Ein Vergleich mit den vorliegenden Simulationsergebnissen der Konfiguration „3-Punkt-Biegung“ liefert zwar eine tendenzielle Bestätigung, kann jedoch nicht als Beweis angesehen werden. Zusätzlich konnten zur Ermittlung des Kriteriums nur jene Versuche herangezogen werden, welche bei einem Ladezustand von 0 % SOC durchgeführt wurden. Da in der Konfiguration „Crush in X-Richtung“, im Gegensatz zu „Penetration“, keine Daten von voll geladenen Zellen vorliegen, musste, aus Gründen der Vergleichbarkeit, dieser Kompromiss eingegangen werden. Die Ergebnisse aus Kapitel 4 lassen darauf schließen, dass Zellen bei 100 % SOC bereits bei geringerer Deformation zum Kurzschluss neigen, als jene im ungeladenen Zustand. Ein veränderter Wert für das Versagenskriterium ist daher wahrscheinlich.

Um zukünftig eine erweiterte Datenbasis zur Auswertung zur Verfügung zu haben, sollten zusätzliche Tests unternommen werden. Eine entsprechend große Zahl an Versuchen würde statistisch repräsentative Ergebnisse liefern. Diese Versuche sollten möglichst viele verschiedene Lastfälle bei unterschiedlichen Ladezuständen der Zelle abdecken. Zur Abschätzung des Temperatureinflusses sollten auch Experimente bei verschiedenen, kontrollierten Umgebungstemperaturen durchgeführt werden.

10.2 Validierung des dynamischen Versuches

Das in Kapitel 7 gezeigte Anwendungsbeispiel zur Demonstration der Praxistauglichkeit des Simulationsmodells sollte in weiterer Folge validiert werden. Eine Nachstellung des Versuchsaufbaus und die Durchführung mehrerer Testwiederholungen würde eine Datenbasis schaffen, anhand der eine Kontrolle der Berechnungsergebnisse möglich werden würde. Dies würde die Glaubwürdigkeit des Rechenmodells erhöhen und dessen Eignung für den Einsatz in Gesamtfahrzeug- bzw. Crashesimulationen bescheinigen. Ein Vergleich der Messdaten aus dem durchgeführten, quasi-statischen „Penetration“-Test mit den Resultaten der entsprechenden Simulation mit quasi-statischer bzw. dynamischer Lastaufbringung zeigt bereits jetzt eine gute Übereinstimmung. Ohne eine Überprüfung dieser Daten durch eine Versuchsreihe kann jedoch keine fundierte Aussage getroffen werden.

10.3 Implementierung in übergeordnete Modelle

Das im Zuge dieser Arbeit erstellte Simulationsmodell einer Lithium-Ionen-Zelle wurde einem makroskopischen Modellierungsansatz folgend entwickelt und kann Ergebnisse von genügender Genauigkeit in relativ kurzer Berechnungszeit liefern. Daher ist eine Eignung zum Einbau des Zellmodells in eine übergeordnete Simulation eines Batteriemoduls bzw. eines Gesamtfahrzeuges gegeben. Zur Absicherung der Ergebnisse wäre in diesen Fällen jedoch weitere Validierungsarbeit zu leisten. Die bereits durchgeführten Crashtests mit dem Fahrzeugprototypen würden die Grundlage für eine derartige Überprüfung liefern. Die simulationsmäßige Nachstellung dieser Tests und ein darauf folgender Vergleich der Rechenergebnisse mit den Messdaten könnten eine glaubwürdige, virtuelle Darstellung des gesamten Fahrzeuges ermöglichen.

10.4 Praktische Anwendung des Simulationsmodells

Zum Abschluss seien noch zukünftige Verwendungsmöglichkeiten des Simulationsmodells zu erwähnen. Ein validiertes Modell der Batteriezelle, des Batteriemoduls oder des Fahrzeuges könnte zur Konzeptionierung von geplanten Crashtests herangezogen werden. Durch eine Vorabuntersuchung mittels numerischer Methoden könnten so Rahmenbedingungen für Prüfungen oder Testkonfigurationen ermittelt werden, wodurch eine Abschätzung des Testverlaufes und des Verhaltens des Prüflings möglich wäre. Der hauptsächliche Anwendungsfall ist jedoch die Integration des Modells in übergeordnete Gesamtfahrzeugsimulationen. Vor allem zur Weiterentwicklung der Crashesicherheit kann hier bedeutender Beitrag geleistet werden. Interessante Untersuchungsgebiete wären etwa die Ermittlung einer optimalen Einbaulage der Zellen im Fahrzeug, sowie die Auslegung des Batteriegehäuses zum Schutz der Zellen vor Beschädigungen durch äußere Einflüsse.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Well-to-Wheel Betrachtungen verschiedener Antriebskonzepte [7].	4
1.2	Vorgehensweise bei der Entwicklung.	6
2.1	Einteilung elektrochemischer Energiespeicher.	9
2.2	Funktionsprinzip einer Li-Ionen-Zelle [13].	11
2.3	Entwicklungspfad der Antriebsstrangentwicklung nach Wallentowitz [11]. . . .	13
2.4	KTM Freeride E [21].	14
2.5	Zusammensetzung der Reaktionsprodukte beim Ausgasen einer 18650 Li-Ionen-Zelle [23].	16
3.1	„Impact“-Test nach UL1642.	19
3.2	Versuch „3-Punkt-Biegung“ nach Sahraei [27].	20
4.1	Ein Li-Ionen-Akkumulator vom Typ „Panasonic CGR-18650KA“.	24
4.2	Schematische Darstellung einer 18650 Li-Ionen-Zelle [15].	25
4.3	Schnitt durch eine 18650 Li-Ionen-Zelle.	25
4.4	Vom Hersteller empfohlene Lade-Charakteristik [32].	27
4.5	Vom Hersteller empfohlene Entlade-Charakteristik [32].	27
4.6	Kraft-Weg-Kurve der Metalcan bei „Crush in X-Richtung“.	29
4.7	Deformation der Metalcan bei „Crush in X-Richtung“.	29
4.8	Kraft-Weg-Kurve der Metalcan bei „Crush in Z-Richtung“.	30
4.9	Deformation der Metalcan bei „Crush in Z-Richtung“.	30
4.10	Kraft-Weg-Kurve der Metalcan bei „Penetration“.	31
4.11	Deformation der Metalcan bei „Penetration“.	31
4.12	Konfiguration „Crush in X-Richtung“.	32
4.13	Zellen Nr. 01 bis Nr. 04 nach dem Test.	32
4.14	Detailansicht nach dem Versuch Nr. 04.	32
4.15	Kraft-Weg-Kurve bei „Crush in X-Richtung“.	33
4.16	Konfiguration „Crush in Z-Richtung“.	34
4.17	Zelle Nr. 03 nach dem Versuch.	34
4.18	Kraft-Weg-Kurve bei „Crush in Z-Richtung“.	35
4.19	Konfiguration „Penetration“.	36
4.20	Deformation der Zelle nach einem Penetrations-Versuch.	36
4.21	Kraft-Weg-Kurve bei „Penetration“ mit 0 % SOC.	37

4.22	Zelle Nr. 02 nach dem Penetrations-Versuch mit 100 % SOC.	38
4.23	Infrarotbild bei „Penetration“ mit 100 % SOC.	38
4.24	Kraft-Weg-Kurve bei „Penetration“ mit 100 % SOC.	39
4.25	Konfiguration „3-Punkt-Biegung“.	40
4.26	Deformation der Zelle nach einem 3-Punkt-Biege-Versuch.	40
4.27	Kraft-Weg-Kurve bei „3-Punkt-Biegung“ mit 0 % SOC.	41
4.28	Kraft-Weg-Kurve bei „3-Punkt-Biegung“ mit 100 % SOC.	42
4.29	Vergleich „Penetration“ mit 0% und 100 % SOC.	44
4.30	Vergleich „3-Punkt-Biegung“ mit 0 % und 100 % SOC.	45
5.1	Schnitt durch das virtuelle Modell.	50
5.2	Kontaktkarte „CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE“.	53
5.3	Kontaktkarte „CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE“.	53
5.4	Simulationsmodell der Prüfanlage.	54
5.5	Optimaler Betriebspunkt des Linux-Clusters.	55
6.1	Einfluss der Meshsize auf das optische Ergebnis.	57
6.2	LS-DYNA-Materialkarte der Metalcan und der Polkappe.	59
6.3	Variation der Streckgrenze.	60
6.4	Materialmodell der Metalcan bei plastischer Verformung.	61
6.5	Deformationsbild von Simulation und Versuch bei „Crush in X-Richtung“.	62
6.6	Deformationsbild von Simulation und Versuch bei „Crush in Z-Richtung“.	62
6.7	Deformationsbild von Simulation und Versuch bei „Penetration“.	62
6.8	Simulation und Versuch bei „Crush in X-Richtung“.	63
6.9	Simulation und Versuch bei „Crush in Z-Richtung“.	63
6.10	Simulation und Versuch bei „Penetration“.	64
6.11	Variation der Meshsize.	65
6.12	Schnitt durch das FE-Netz der Jellyroll.	66
6.13	LS-DYNA-Materialkarte der Jellyroll.	67
6.14	Materialmodell der Jellyroll.	69
6.15	Deformationsbild von Simulation und Versuch bei „Crush in X-Richtung“.	70
6.16	Deformationsbild von Simulation und Versuch bei „Crush in Z-Richtung“.	70
6.17	Deformationsbild von Simulation und Versuch bei „Penetration“.	71
6.18	Deformationsbild von Simulation und Versuch bei „3-Punkt-Biegung“.	71
6.19	Simulation und Versuch bei „Crush in X-Richtung“.	72
6.20	Simulation und Versuch bei „Crush in Z-Richtung“.	73
6.21	Simulation und Versuch bei „Penetration“.	74
6.22	Simulation und Versuch bei „3-Punkt-Biegung“.	75
6.23	Kraft-Weg-Kurve des Stahlrohres bei „3-Punkt-Biegung“.	76
7.1	Identifikation eines Versagenskriteriums.	80
7.2	Position des hochbelasteten Elements „E300354“.	81

8.1	Reaktion einer 18650-Zelle bei mechanischer Beschädigung.	83
8.2	Crashtest „Seitenaufprall“ mit PKW und Motorrad.	86
8.3	Einbausituation der Batteriezellen im Fahrzeug.	87
8.4	Impact-Test nach UL1642.	87
8.5	Ablauf der Berechnung der Risikozahl.	88
8.6	Definition einer FUNCTION in LS-DYNA.	89
8.7	Berechneter Ort des Kurzschlusses.	89
8.8	Verformung der Zelle während der dynamischen Simulation.	90
8.9	Kraft-Weg-Kurve und Risikozahl des simulierten „Impact“-Tests.	91

Tabellenverzeichnis

1.1	Vergleich verschiedener Energieträger [4] [5].	3
2.1	Elektrochemische Spannungsreihe ausgewählter Elemente [12].	10
2.2	Inhaltsstoffe einer 18650 Li-Ionen-Zelle und deren Gefahrenpotenzial [24]. . .	16
3.1	Einteilung von Prüfverfahren nach UL1642.	18
3.2	Ausgewählte Lastfälle.	22
4.1	Produktspezifikation „Panasonic CGR-18650KA“.	24
5.1	Hauptbauteile einer 18650 Lithium-Ionen-Zelle.	47
5.2	Bewertung verschiedener Modellansätze.	49
6.1	Rechendauer in Abhängigkeit der Meshsize.	58
6.2	Erklärung der LS-DYNA Materialkarte „MAT_024“.	59
6.3	Materialmodell der Metalcan bei plastischer Verformung.	61
6.4	Materialmodell der Jellyroll.	69
7.1	Identifikation eines Versagenskriteriums.	81
8.1	Bewertung der Zell-Reaktionen nach EUCAR [45] [28].	84
8.2	Einteilung der Reaktionen in den Versuchen nach Häufigkeit.	85

Literaturverzeichnis

- [1] Umweltbundesamt GmbH, Wien. **Klimaschutzbericht 2013**. URL <http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0420.pdf>. Abgerufen am 22.08.2013.
- [2] Oliver Wyman. **Auto und Umwelt 2007**. URL http://www.oliverwyman.de/deu-insights/PM_Auto_und_Umwelt.pdf. Abgerufen am 03.07.2013.
- [3] Institut für Energie-und Umweltforschung Heidelberg und Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung mbH. **Volkswirtschaftliche Effekte der Energiewende**. URL http://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/studie_effekte_energiewende.pdf. Abgerufen am 03.07.2013.
- [4] David Linden, Thomas B. Reddy. *Handbook of Batteries (3rd Edition)*. McGraw-Hill, 2002.
- [5] Cornel Stan. *Alternative Antriebe für Automobile*. Springer, Berlin-Heidelberg-New York, 2012.
- [6] G. Girishkumar, B. McCloskey, A. C. Luntz, S. Swanson, W. Wilcke. *Lithium-Air Battery: Promise and Challenges*. The Journal of Physical Chemistry Letters, 2010.
- [7] European Council for Automotive RD. **Well to Wheels Report 2007**. URL http://ies.jrc.ec.europa.eu/uploads/media/WTW_Report_010307.pdf. Abgerufen am 27.06.2013.
- [8] Livermore Software Technology Corporation. **LS-DYNA**, . URL <http://www.lstc.com/products/ls-dyna>. Abgerufen am 18.08.2013.
- [9] Iran Chamber Society. **Parthian Battery (Ancient Iranians, The Inventors of Battery)**. URL http://www.iranchamber.com/history/articles/parthian_battery.php. Abgerufen am 19.04.2013.
- [10] Lucien F. Trueb, Paul Rüetschi. *Batterien und Akkumulatoren - Mobile Energiequellen für heute und morgen*. Springer, Berlin-Heidelberg-New York, 1998.
- [11] Henning Wallentowitz, Arndt Freialdenhoven, Ingo Olschewski. *Strategien zur Elektrifizierung des Antriebstranges*. VIEWEG+TEUBNER, Wiesbaden, 2010.

- [12] Peter Kurzweil, Paul Scheipers. *Chemie - Grundlagen, Aufbauwissen, Anwendungen und Experimente*. VIEWEG+TEUBNER, Wiesbaden, 2012.
- [13] Karlsruher Institut für Technologie (Institut für Thermische Verfahrenstechnik). **Funktionsprinzip einer Li-Ion-Zelle**. URL http://www.tvt.uni-karlsruhe.de/21_984.php. Abgerufen am 15.04.2013.
- [14] Römpp Lexikon Chemie. **RÖMPP Online**. URL [http://www.roempp.com/prod/\(Stichwort:"Interkalation","Einlagerungsverbindungen"\)](http://www.roempp.com/prod/(Stichwort:). Abgerufen am 17.04.2013.
- [15] Panasonic Industrial Europe GmbH. **Overview of Lithium ion batteries**, . URL http://www.panasonic.com/industrial/includes/pdf/Panasonic_LiIon_Overview.pdf. Abgerufen am 17.08.2013.
- [16] Technisches Museum Wien. **Elektrofahrrad Lohner-Porsche, 1900**. URL <http://www.technischesmuseum.at/objekt/elektrofahrrad-lohner-porsche-1900>. Abgerufen am 08.07.2013.
- [17] Volkswagen AG. **Mehr als drei Jahrzehnte Forschung für eine emissionsfreie Zukunft**, . URL http://www.volkswagenag.com/content/vwcorp/info_center/de/themes/2010/11/Volkswagen_Concept_Car__Golf_blue-emotion/CityStromer.html. Abgerufen am 08.07.2013.
- [18] Williams Hybrid Power. **Applications - Motorsport**. URL <http://www.williamshybridpower.com/#%2Fapplications%2Fporsche>. Abgerufen am 08.07.2013.
- [19] BMW AG. **BMW ActiveHybrid**, . URL <http://www.bmw.at/de/neufahrzeuge/3/activehybrid-3/2011/effizienz.html>. Abgerufen am 09.07.2013.
- [20] Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. **Verkehrsprognose Österreich 2025+**. URL http://www.bmvit.gv.at/verkehr/gesamtverkehr/verkehrsprognose_2025/download/vpoe25_kap4.pdf. Abgerufen am 23.08.2013.
- [21] KTM Sportmotorcycle AG. **KTM Freeride E**, . URL <http://www.ktm.com/at/freeride/freeride-e>. Abgerufen am 09.07.2013.
- [22] Wolfgang Sinz. *Concepts for Mechanical Abuse Testing of High-Voltage Batteries*. SAE International, 2012.
- [23] E. Peter Roth. *Thermal Abuse Performance of 18650 Li-Ion Cells*. Sandia National Laboratories, 2004.
- [24] Michael Sternad, Martin Wilkening. *Forschungsprojekt „Select“ 2012 - Abschlussbericht*. Institut für Chemische Technologie von Materialien (TU Graz), 2013.
- [25] Underwriters Laboratories Inc. *UL Standard for Safety for Lithium Batteries*. Underwriters Laboratories Inc., 1999.

- [26] Lars Greve, Clemens Fehrenbach. *Mechanical testing and macro-mechanical finite element simulation of the deformation, fracture, and short circuit initiation of cylindrical Lithium ion battery cells*. Journal of Power Sources, 2012.
- [27] Elham Sahraei, John Campbell, Tomasz Wierzbicki. *Modeling and short circuit detection of 18650 Li-ion cells under mechanical abuse conditions*. Journal of Power Sources, 2012.
- [28] SAE International. *Electric and Hybrid Electric Vehicle Rechargeable Energy Storage System Safety and Abuse Testing*. SAE International, 2009.
- [29] Panasonic Canada Inc. **Panasonic - About Li-ion batteries**. URL https://panasonic.ca/english/powertools/assembly/li_features.asp. Abgerufen am 18.04.2013.
- [30] Landesfeuerwehrverband Steiermark. **Feuerwehr- und Zivilschutzschule Steiermark**. URL <http://www.lfv.steiermark.at/Home/Feuerweherschule.aspx>. Abgerufen am 29.07.2013.
- [31] International Organization for Standardization. *Electrically propelled road vehicles. Test specification for lithium-ion traction battery packs and systems*. International Organization for Standardization, 2011.
- [32] Panasonic Industrial Europe GmbH. **Panasonic CGR-18650KA LITHIUM-ION PSS TECHNOLOGY**, . URL <http://industrial.panasonic.com/eu>. Abgerufen am 17.09.2012.
- [33] Thümler GmbH, Nürnberg. **Testmatic Materialprüfmaschinen**. URL <http://www.testmatic.de>. Abgerufen am 26.08.2013.
- [34] Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt. **HBM U2B - Kraftaufnehmer für Messungen von Zug- und Druckkräften**, . URL <http://www.hbm.com/de/menu/produkte/aufnehmer-sensoren/kraft/u2b>. Abgerufen am 26.08.2013.
- [35] Christoph Knauder. *Entwicklung einer Prüfumgebung zur Untersuchung der mechanischen Eigenschaften von lithiumbasierenden Batterien*. Institut für Fahrzeugsicherheit (TU Graz), 2012.
- [36] Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt. **HBM C6A - Kraftaufnehmer: Hohe Nennkräfte bei kleinsten Abmessungen**, . URL <http://www.hbm.com/de/menu/produkte/aufnehmer-sensoren/kraft/c6a>. Abgerufen am 26.08.2013.
- [37] Karl Schilling, Max Heinzler, Werner Röhrer, Ulrich Fischer. *Tabellenbuch Metall*. Verlag Europa-Lehrmittel, Haan-Gruiten, 2008.

- [38] Livermore Software Technology Corporation. **LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUAL VOLUME II Material Models**, . URL <http://www.dynamore.de/de/download/manuals/ls-dyna/ls-dyna-971-manual-vol-ii-material-models>. Abgerufen am 02.05.2013.
- [39] Zentraler Informatikdienst der TU-Graz. **Hochleistungsrechnen HLR (HPC)**. URL <http://portal.tugraz.at/portal/page/portal/zid/hpc>. Abgerufen am 25.07.2013.
- [40] Software in the Public Interest, Inc. **Debian - Das universelle Betriebssystem**. URL <http://www.debian.org/>. Abgerufen am 27.08.2013.
- [41] InfiniBand Trade Association. **InfiniBand Trade Association: Home**. URL <http://www.infinibandta.org/>. Abgerufen am 27.08.2013.
- [42] Roadsafe LLC. **Materials for Trailers**. URL http://roadsafellc.com/NCHRP22-24/RSVVP/ExampleCases/Case4/Uncompressed_files/SIM_090518/02c_TrailerMaterials_09-0413.k. Abgerufen am 19.11.2012.
- [43] Livermore Software Technology Corporation. **LS-DYNA THEORY MANUAL**, . URL <http://www.dynamore.de/de/download/manuals/ls-dyna/ls-dyna-theory-manual-2005-beta>. Abgerufen am 15.08.2013.
- [44] Heinrich Dubbel, Karl-Heinrich Grote, Jörg Feldhusen. **DUBBEL - Taschenbuch für den Maschinenbau**. Springer, Berlin-Heidelberg-New York, 2007.
- [45] European Council for Automotive Research and Development. **European Council for Automotive Research and Development**. URL <http://www.eucar.be>. Abgerufen am 25.07.2013.
- [46] Institut für Fahrzeugsicherheit (TU Graz). **ZEDATU - Zentrale Datenbank zur Tiefenanalyse von Verkehrsunfällen**. URL <http://www.vsi.tugraz.at/index.php?id=40>. Abgerufen am 08.08.2013.

Anhang A

Liste der verwendeten Abkürzungen, Formelzeichen und Einheiten

A	Ampere (Elektrische Stromstärke)
Ah	Amperestunde (Elektrische Ladung)
Al	Aluminium
C	Kohlenstoff, Graphit, Ruß
CAD	Computer Added Design
CC/CV	Constant Current/Constant Voltage
Cd	Cadmium
C ₂ H ₂ F ₂	Polyvinylidendifluorid
C ₃ H ₄ O ₃	Ethylencarbonat
C ₃ H ₆ O ₃	Dimethylcarbonat
C ₄ H ₈ O ₃	Ethylmethylcarbonat
Co	Cobalt
Co _x O _y	Cobalt(-oxid)
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CPU	Central Processing Unit (Hauptprozessor)
Cu	Kupfer
e ⁻	Elektron (negative Elementarladung)
E _a	Absorbierte Energie
EES	Electrical Energy Storage

etc.	et cetera
EUCAR	European Council for Automotive Research & Development
Fe	Eisen
FE, FEM	Finite Elemente, Finite Elemente Methode
g	Gramm (Masse)
g CO _{2,eq} /km	Gramm Kohlendioxidäquivalent pro Kilometer (Treibhausgasemission)
H ₂	Wasserstoff
ID	Identifikator (Kennzahl, eindeutige Nummer)
IRV	Integrierte Relative Volumenänderung
J	Joule (Energie, Arbeit)
kg	Kilogramm (Masse)
kg/m ³	Kilogramm pro Kubikmeter (Dichte)
km	Kilometer (Länge)
kW	Kilowatt (Leistung)
kWh/kg	Kilowattstunde pro Kilogramm (Spezifische Energie)
Li	Lithium
Li ⁺	Lithiumkationen
Li _x C _y	Lithium-Einlagerung in Kohlenstoff (Interkalationsverbindung)
LiCoO ₂	Lithium-Cobalt-Dioxid
Li-Ion	Lithium-Ionen (Akkumulator)
Li _x MO ₂	Lithium-Metall-Dioxid
LiPF ₆	Lithiumhexafluorophosphat
LiPo	Lithium-Polymer (Akkumulator)
LPG	Liquefied Petroleum Gas (Flüssiggas)
mA	Milliampere (Elektrische Stromstärke)
min	Minute
min.	mindestens
MJ/100km	Megajoule pro Hundert Kilometer
mm	Millimeter (Länge)
Mn _x O _y	Mangan(-oxid)
N	Newton (Kraft)
Ni	Nickel
NiCd	Nickel-Cadmium (Akkumulator)
NiMH	Nickel-Metallhydrid (Akkumulator)
Ni _x O _y	Nickel(-oxid)
Nm	Newtonmeter (Drehmoment)
N/mm ²	Newton pro Quadratmillimeter (Spannung, Elastizitätsmodul)
Nr.	Nummer

OEM	Original Equipment Manufacturer (Erstausrüster, Fahrzeughersteller)
Pb	Blei
PKW	Personenkraftwagen
PSS	Panasonic Solid Solution Technology
PTC	Positive Temperature Coefficient (Kaltleiter)
SAE	Society of Automotive Engineers
SOC	State of Charge
t	Tonnen (Masse)
t/mm ³	Tonnen pro Kubikmillimeter (Dichte)
typ.	typisch
UL	Underwriters Laboratories
V	Volt (elektrische Spannung)
V	Volumen
V ₀	Volumen im Ausgangszustand
V _{rel}	Volumen relativ zum Ausgangszustand
VSI	Vehicle Safety Institute
Wh	Wattstunde (Energieinhalt)
Wh/kg	Wattstunde pro Kilogramm (Spezifische Energie)
Wh/L	Wattstunde pro Liter (Energiedichte)
ZEDATU	Zentrale Datenbank zur Tiefenanalyse von Verkehrsunfällen
ZID	Zentraler Informatikdienst der TU Graz
°C	Grad Celsius (Temperatur)
γ	Integrierte Volumenänderung
ε	Längendehnung
σ	Spannung
σ _v	Vergleichsspannung

Anhang B

Datenblatt

Die folgenden Seiten zeigen das Datenblatt der Li-Ionen-Zelle „Panasonic CGR18650-KA“.

Panasonic is one of the leading Lithium-Ion battery manufacturers in the world. A perfect combination of high energy density, safety and long life shows what is possible with this battery technology. A continuous co-development with electrical companies all over the world has led to outstandingly good results. Panasonic especially focuses on enhancing safety technologies such as PSS and HRL in order to always guarantee people's safety. On the top of this we have invented our so called NNP technology which gives us the possibility to achieve eminently high battery capacities. Excellent battery safety on one hand, and superior battery performance on the other: this is what Panasonic stands for.

LI-ION • 3D ILLUSTRATION*1

- 1 Positive pole
- 2 PTC (positive temperature coefficient device)
- 3 Gasket
- 4 Collector
- 5 Insulator
- 6 Cathode
- 7 Anode
- 8 Negative pole (cell can)
- 9 Separator
- 10 CID (current interrupt device)
- 11 Exhaust gas hole



PSS TECHNOLOGY

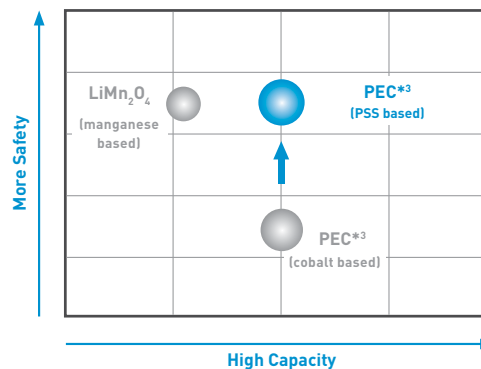
Panasonic has developed a Lithium-Ion battery generation by using a **Solid Solution Technology**. Idea: Development of a future oriented Lithium-Ion cell technology which secures a balance of high capacity on the one hand and high safety on the other hand. The goal was to develop a technology which provides the customer with a high capacity such as the standard Panasonic Lithium-Ion (cobalt based) cells and owns a high safety standard like the LiMn_2O_4 (manganese based) Lithium-Ion batteries.*2

Characteristics of the Panasonic PSS driven Lithium-Ion battery:

- Thermal stability of cathode materials leads to high safety
- Same energy density as cobalt-based Lithium-Ion batteries
- Excellent cycle life
- High reliability at high temperature
- Less voltage drop at initial discharge than cobalt based Lithium-Ion batteries
- Same charge voltage as cobalt-based Lithium-Ion batteries

*1 This battery is not equipped with a PTC.
 *2 Panasonic cells must always be equipped with a safety unit in order to avoid human beings accidents.
 *3 PEC: Panasonic Energy Company.

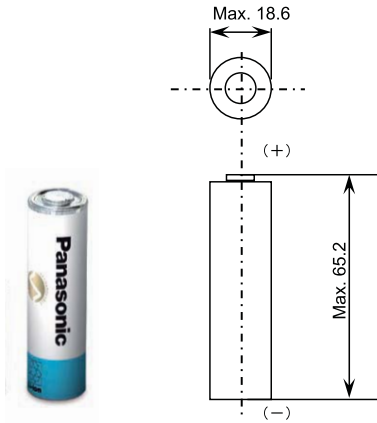
COMPARISON BETWEEN CAPACITY AND SAFETY OF CATHODE MATERIALS



CGR-18650KA

LITHIUM-ION / PSS TECHNOLOGY

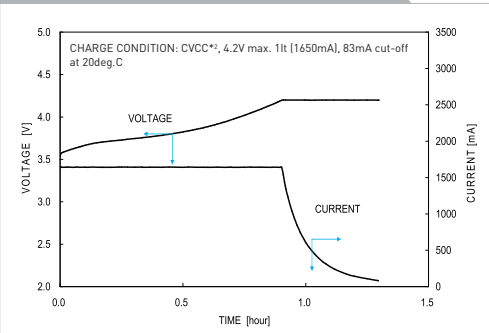
DIMENSIONS (MM)



SPECIFICATIONS

Model Number	CGR-18650KA
Nominal voltage [V]	3.6
Nominal capacity*1 - Minimum [mAh]	1,650
Nominal capacity*1 - Typical [mAh]	1,750
Dimensions - Diameter (mm)	max. 18.6
Dimensions - Height (mm)	max. 65.2
Approx. Weight [g]	43.5

TYPICAL CHARGE CHARACTERISTICS



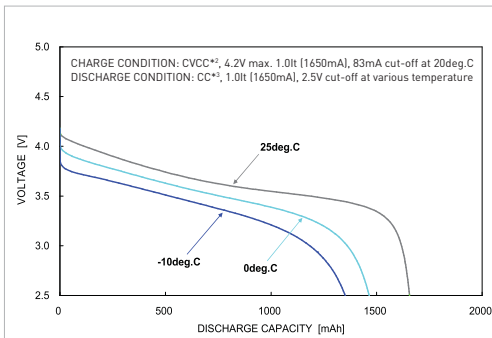
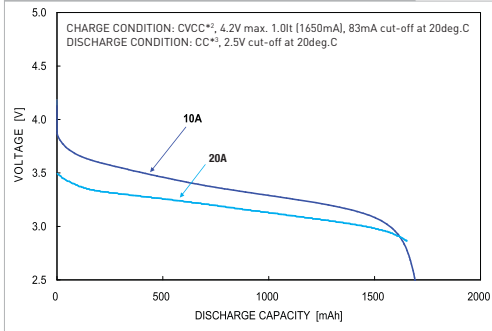
*1 Charge: Constant Voltage / Constant Current, 4.2V, max. 1650mA, 83mA cut-off; Discharge: Constant Current, 330mA, 2.5V cut-off; Temperature: 25deg.C

*2 CVCC: Constant Voltage / Constant Current *3 CC: Constant Current

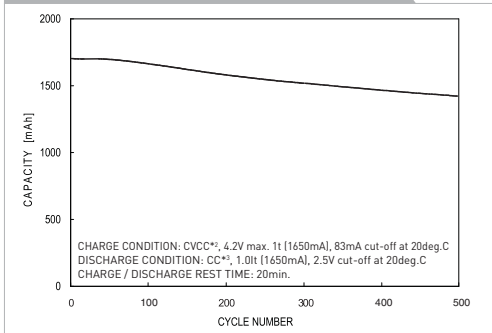
⚠ Notice to Readers

We are unable to support single cell business or accept orders from consumers. We design Lithium-Ion battery packs including a suitable safety unit device based on the technical specification of the customer. Due to the need for careful review when selecting Lithium-Ion battery solutions please contact your local Panasonic Sales Office. In order to avoid a lack of supply please check the battery availability with your Panasonic sales team before design-in.

TYPICAL DISCHARGE CHARACTERISTICS



TYPICAL LIFE CHARACTERISTICS



Panasonic