

Martin Rossmann

Entwicklung einer Methode zur Modellierung elektrischer Energiespeicher für die Crashsimulation

Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs

Studienrichtung: Wirtschaftsingenieurwesen-Maschinenbau

Technische Universität Graz

Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften

Betreuer: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hermann Steffan

Institut für Fahrzeugsicherheit

Graz, im April 2012

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

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 entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am 09. März 2012


(Unterschrift)

Englische Fassung:

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

9th of March 2012
date


(signature)

Danksagung

Mit dem Einreichen der vorliegenden Arbeit endet für mich nicht nur ein Projekt, sondern auch der Lebensabschnitt Studium. Das ich beides als gelungen bezeichnen kann, habe ich vielen Menschen zu verdanken, die an dieser Stelle Erwähnung finden sollen.

Allen voran möchte ich mich bei meinen Eltern Annelies und Franz bedanken. Danke, dass ihr mir das Studium ermöglicht und mich auf diesem Weg auch immer unterstützt habt. Ebenso möchte ich mich bei meiner Schwester Ines bedanken. Danke für die Unterstützung und insbesondere für das Korrekturlesen der vorliegenden Arbeit. Ein großes Dankeschön möchte ich auch an Daria richten. Danke für deine Engelsgeduld mit mir und dafür, dass du mir zu jeder Prüfung die Daumen gedrückt hast.

Dank gebührt auch den Mitarbeitern des VIFs für die gute Zusammenarbeit. Allen voran möchte ich mich bei Werner Leitgeb für die Betreuung und für konstruktive Kritik, sowie bei den Projektmitarbeitern Bettina Suhr, Gernot Trattinig und Alexander Thaler für die Bemühungen zur Beantwortung meiner Fragen bedanken. Auch bei Harald Marbler-Gores und Raffael Braunersteiner möchte ich mich für die Unterstützung in allen Belangen rund um PAM-Crash bedanken.

Seitens der TU-Graz möchte ich mich bei Herrn Professor Steffan für die unkomplizierte und zielführende Betreuung zur Erstellung der vorliegenden Arbeit bedanken.

Kurzfassung

Die Verbreitung der Elektromobilität ist unter anderem von der Entwicklung der elektrischen Energiespeicher, auf Basis der Lithium Ionen Batterietechnologie, abhängig. Insbesondere ist die Auswirkung einer mechanischen Belastung auf die Batterie Gegenstand von Untersuchungen. Zur Unterstützung dieser Untersuchungen, sind die elektrischen Energiespeicher in die Gesamtfahrzeugmodelle der Crashesimulation zu integrieren. Zu diesem Zweck beschäftigt sich die vorliegende Arbeit mit der Entwicklung einer Methode zur Modellierung dieser Energiespeicher. Dazu wird Relevantes zu den Themen Hybrid- und Elektrofahrzeuge, elektrische Energiespeicher und Fahrzeugsicherheit zusammengefasst. Zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften der Batterie werden Versuche durchgeführt und darauf aufbauend die Modellierung beschrieben. Dies umfasst die Erstellung von Materialkarten, um das Materialverhalten korrekt abzubilden. Des Weiteren werden Missbrauchstests simuliert, um das Modell auf Tauglichkeit zur Simulation dieser Tests zu untersuchen. Darauf aufbauend werden Schädigungsparameter abgeleitet, die eine Prognose von Schäden infolge einer mechanischen Belastung anhand des Modells ermöglichen. Abschließend werden die Ergebnisse zusammengefasst und die nächsten Schritte zur Weiterentwicklung aufgezeigt.

Abstract

The spreading of the electric mobility is, besides other factors, dependent on the development of electrical energy storage devices, based on the lithium ion battery technology. The effect of mechanical stress on the battery is a particular subject of investigations. To facilitate this study, the electrical energy storage devices should be integrated into the full vehicle models for crash simulation. For this purpose the present work deals with the development of a method to model such energy storage devices. Therefore relevant information to the topics hybrid and electric vehicles, electric energy storage devices and vehicle safety is summed up. To determine the mechanical properties of the battery, tests are carried out and building on this, the accomplishment of the model is described. This includes the creation of material cards to characterize the material behavior correctly. Furthermore abuse tests are simulated, to examine the suitability of the model to simulate such tests. Building on this, parameters are derived, which allow a prediction of damages due to stress using the model. Finally the results are summed up and the next steps for further development are identified.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	12
1.1	Zielsetzung der Arbeit	13
1.2	Vorgehensweise und Aufbau	14
2	Hybrid- und Elektrofahrzeuge	16
2.1	Entwicklung alternativer Antriebskonzepte	16
2.1.1	Historische Entwicklung	16
2.1.2	Motivation für alternative Antriebskonzepte	17
2.1.3	Zukünftige Entwicklung	18
2.2	Hybridfahrzeuge	18
2.2.1	Klassifizierung nach der Anordnung des Antriebsstrangs	19
2.2.2	Klassifizierung nach dem Hybridisierungsgrad	20
2.3	Elektrofahrzeuge	22
3	Elektrische Energiespeicher	23
3.1	Allgemeine Grundlagen	23
3.1.1	Historische Entwicklung	23
3.1.2	Aufbau und Funktion einer elektrochemischen Zelle	24
3.1.3	Anforderungen an elektrische Energiespeicher	25
3.2	Bleibatterie	26
3.3	Alkalische Batterie	27
3.4	Lithium Ionen Batterie	27

4	Fahrzeugsicherheit	30
4.1	Passive Fahrzeugsicherheit	30
4.2	Regelungen der passiven Fahrzeugsicherheit	31
4.2.1	Gesetzliche Regelungen	32
4.2.2	Verbraucherschutzmaßnahmen	32
4.2.3	Aktuelle Regelungen für elektrische Energiespeicher	33
4.3	Missbrauchstests für elektrische Energiespeicher	34
4.3.1	Missbrauchstests nach SAE	35
4.3.2	Erweiterung der Missbrauchstests nach TÜV SÜD und Daimler	36
5	Aufbau des FE-Modells der Batteriezelle	39
5.1	Beschreibung der Batteriezelle	39
5.2	Stauchversuche zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften	41
5.2.1	Beschreibung der Stauchversuche	41
5.2.2	Versuchsaufbau und Durchführung	41
5.2.3	Auswertung der Stauchversuche	43
5.3	Aufbau des Zellmodells	48
5.4	Modellierung im Detail	50
5.4.1	Simulation der Stauchversuche zur Klärung der Einflussfaktoren auf das Zellverhalten	51
5.4.2	Das Zellmaterial	52
5.4.3	Hülle und Capplate	56
5.4.4	Die Verbindung Polplatte/Capplate	59
5.5	Validierung des Zellmodells	59
6	Aufbau des FE-Modells eines generischen Batteriemoduls	62
6.1	Beschreibung des Batteriemoduls	62
6.2	Aufbau des Modulmodells	64
6.3	Verspannung des Moduls	65

6.3.1	Vorspannung des Zellstapels	65
6.3.2	Vorspannung des Gaskollektors	69
6.3.3	Entlastung des Moduls	70
7	Erstellung von Materialkarten zur Zell- und Modulmodellierung	74
7.1	Auswahl der Materialmodelle	74
7.1.1	Feststellung des abzubildenden Verhaltens	75
7.1.2	Auswahl geeigneter Materialmodelle	76
7.2	Parametrisierung der Materialmodelle	77
7.2.1	Ermittlung von Parametern zur Beschreibung des Verformungsverhaltens	77
7.2.2	Ermittlung von Parametern zur Beschreibung der Dehnratenabhängigkeit	79
7.2.3	PAM-Crash-spezifische Parameter	79
7.3	Einfluss von Materialkarten auf das Simulationsergebnis	80
7.3.1	Vergleich von Materialkarten	80
7.3.2	Verifizierung des Einflusses anhand des quasistatischen Drucktests	81
7.3.3	Diskussion des Einflusses von Materialkarten	82
8	Simulation von Missbrauchstests zur Moduluntersuchung	84
8.1	Versuchsaufbau und Durchführung	84
8.2	Auswertung der Simulation	86
8.3	Diskussion der Ergebnisse	90
9	Schadenslokalisierung an Zelle und Modul	91
9.1	Ableitung von Schädigungsparametern zur Schadenslokalisierung an der Zelle	91
9.1.1	Schäden infolge eines mechanischen Versagens	92
9.1.2	Schäden infolge eines elektrischen Versagens	96
9.2	Ableitung von Schädigungsparametern zur Schadenslokalisierung am Modul	98

9.2.1	Schäden infolge eines mechanischen Versagens	98
9.2.2	Schäden infolge eines elektrischen Versagens	101
10	Modellbewertung	103
10.1	Evaluation des FE-Modells	103
10.2	Evaluation der Schadenslokalisierung	104
11	Zusammenfassung und Ausblick	107

Nomenclature

A	Momentanquerschnitt
A0	Ausgangsquerschnitt
Af	Bruchfläche
C	Schwellenwert des Kriteriums im Augenblick der Bruchinitiierung
CAD	Computer-Aided Design (rechnerunterstützte Konstruktion)
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
D	Dehnratenparameter
DIN	Deutsches Institut für Normung
E _{kin}	kinetische Energie
ECE	Economic Commission for Europe (Wirtschaftskommission für Europa)
Epsilon _{eff} punkt	Gesamtdehnrate
Epsilon _f quer	Vergleichsdehnung bei Bruch
Epsilon _p quer	plastische Vergleichsdehnung
Epsilon _{quer}	Vergleichsdehnung
etc.	Et cetera (und im übrigen)
EU	Europäische Union

EUCAR	European Council for Automotive Research and Development
EuroNCAP	European New Car Assessment Programme (Europäisches Neuwagen-Bewertungs-Programm)
FE	Finite-Elemente
FMVSS	Federal Motor Vehicle Safety Standards
fps	Frames per Second (Bilder pro Sekunde)
IEC	International Electrotechnical Commission (Internationale Elektrotechnische Kommission)
IGES	Initial Graphics Exchange Specification
IIHS	Insurance Institute for Highway Safety
INS	Innovation mit Normen und Standards
ISO	International Organization for Standardization (Internationale Organisation für Normung)
l	Momentanlänge
l ₀	Ausgangslänge
m	Masse
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration (zivile US-Bundesbehörde für Straßen- und Fahrzeugsicherheit)
p	Dehnratenparameter
SAE	Society of Automotive Engineers (Verband der Automobilingenieure)
Sigma _{quer}	Von Mises Vergleichsspannung
Sigma _{s y}	quasistatische Fließspannung
Sigma _y	Fließspannung
StVO	Straßenverkehrsordnung
TÜV	Technischer Überwachungs-Verein

UN	United Nations (Vereinte Nationen)
US-NCAP	US New Car Assessment Program (Amerikanisches Neuwagen-Bewertungs-Programm)
USA	United States of America (Vereinigte Staaten von Amerika)
V	Volumen
v	Geschwindigkeit
VDA	Verband der Automobilindustrie
VIF	Virtual Vehicle (Das virtuelle Fahrzeug)

Kapitel 1

Einleitung

Der Individualverkehr wie wir ihn bisher kennen steht vor einem Wandel. Mit jedem Jahr steigt das Interesse an der Elektromobilität, was sich in einer steigenden Anzahl von Beiträgen in Tagesmedien und in zunehmenden Ausstellungen und Konferenzen zu diesem Thema widerspiegelt. Besondere Aufmerksamkeit widmet man der Elektromobilität in Graz, seitdem diese 2010 den Zuschlag zur E-Mobilität-Modellregion erhalten hat. Im ersten Jahr flossen 1,6 Millionen Euro aus dem Förderprogramm des Klima- und Energiefonds und des Lebensministeriums an die Stadt, um unterschiedliche Ansätze in der Praxis zu testen, wie man die Bevölkerung zum Umsteigen bewegt [Graz 2010]. Das übergeordnete Ziel der Elektromobilität liegt einerseits in der Eindämmung des Klimawandels und der globalen Erwärmung, als auch andererseits der Verknappung von Erdöl entgegen zu wirken. Ebenso fördert der Trend nachhaltig handeln zu wollen, sowie die zunehmende Urbanisierung, die neue Mobilitätslösungen für Städte erfordert, die Verbreitung der Elektromobilität [BMW-Group 2010, S. 2 f.].

Vorfälle, wie jener der sich im Jahr 2011 ereignete, als sich der Plug-In Hybrid Chevrolet Volt drei Wochen nach einem Seitenaufprall Crashtest entzündete, sind für eine weite Verbreitung dieser Technologie jedoch hinderlich. Im Zentrum der Untersuchungen zur Unfallursache steht der im Volt eingebaute Energiespeicher, welche auf der Lithium Ionen Batterietechnologie basiert. General Motors versichert, dass dieser Zwischenfall nicht passiert wäre, hätte man das Protokoll zur Deaktivierung der Batterie nach Unfällen befolgt. Die National Highway Traffic Safety Administration, kurz NHTSA, fügt dem hinzu, dass dies der bisher einzige Vorfall dieser Art ist und betont, dass ausgehend von den verfügbaren Daten, Elektrofahrzeuge kein größeres Risiko darstellen als Benzinfahrzeuge [Bunkley 2011]. Dennoch lässt sich daraus

schließen, dass das Risiko infolge mechanischer Belastung auf die Energiespeicher, mangels Erfahrungen, schwer einschätzbar ist.

1.1 Zielsetzung der Arbeit

Dies motiviert die Elektromobilität aus der Sichtweise der Fahrzeugsicherheit zu betrachten, weshalb vorliegende Arbeit auch auf diesen beiden Themenkreisen aufbaut. Der Fokus liegt dabei auf den elektrischen Energiespeichern für automotiv Anwendungen, basierend auf der Lithium Ionen Batterietechnologie. Die kleinste Einheit einer Batterie stellt die Batteriezelle dar, auf der das Batteriemodul, durch Verschaltung mehrerer Einzelzellen, aufbaut. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, eine Methode zur Modellierung eines Batteriemoduls für die Crashsimulation zu entwickeln. Aus der Modellierung für die Crashsimulation resultiert ein Modell, bestehend aus endlich vielen Elementen, daher auch der Name FE-Modell, welches wie in diesem Fall in der Lage ist, die mechanischen Eigenschaften des Batteriemoduls abzubilden. In weiterer Folge dient das FE-Modell des Batteriemoduls die Untersuchungen an Batterien zu unterstützen und durch die gewonnenen Erkenntnisse einen Beitrag zur Sicherheit der Elektromobilität zu leisten. Die Zielsetzung lässt sich dabei in mehrere Teilziele zerlegen, dessen Arbeitsinhalte und die zu erreichenden Meilensteine im Folgenden beschrieben werden:

- *Aufbau des Modulmodells:* Aufbauend auf dem vom Projektpartner zur Verfügung gestellten Daten, ist das FE-Modell des Batteriemoduls aufzubauen. Als Meilenstein ist das FE-Modell zu sehen, das die mechanischen Eigenschaften des Batteriemoduls abbildet.
- *Erstellung von Materialkarten:* Die vom Projektpartner zur Verfügung gestellten Materialkarten sind zu überprüfen und eigene Materialkarten sind mit Hilfe von Materialtests zu erstellen. Dieses Teilziel dient dem Aufbau des Modulmodells, um das Materialverhalten korrekt abzubilden. Das Vorhandensein der benötigten Materialkarten stellt den Meilenstein dar.
- *Simulation von Missbrauchstests zur Moduluntersuchung:* Am FE-Modell sind Missbrauchstests zu simulieren. Dies verfolgt das Ziel, einerseits das FE-Modell auf Tauglichkeit zur Simulation von Missbrauchstests zu untersuchen und andererseits benötigte Rechenergebnisse für die Schadenslokalisierung am Modul zu erstellen. Die Modelle der Missbrauchstests sowie die Rechenergebnisse stellen den Meilenstein dar.

- *Schadenslokalisierung an Zelle und Modul:* Des Weiteren sind Schädigungsparameter abzuleiten, die eine Prognose von Schäden an Zelle und Modul infolge einer mechanischen Belastung ermöglichen. Der Meilenstein umfasst die Identifizierung der Schädigungsparameter zur Schadenslokalisierung.
- *Modellbewertung:* Abschließend sind die Ergebnisse und Aussagen bewertend zusammenzufassen, um die nächsten Schritte zur Weiterentwicklung aufzuzeigen. Meilenstein ist die Bewertung der Abbildbarkeit des Verhaltens und inwieweit die Prognose von Schäden an Zelle und Modul infolge einer mechanischen Belastung möglich ist.

1.2 Vorgehensweise und Aufbau

Die Vorgehensweise zur Erreichung der genannten Ziele ist in Form einer Terminalschiene in Abbildung 1.1 ersichtlich. Der vorliegenden Arbeit ging eine Literaturstudie zu den Themen Hybrid- und Elektrofahrzeuge, elektrische Energiespeicher, Fahrzeugsicherheit und numerische Simulation voraus. Die Einarbeitungsphase umfasste ebenfalls die Erarbeitung von Kenntnissen hinsichtlich der eingesetzten Programme. Dies betraf den Preprozessor HyperMesh von Altair, den Gleichungslöser PAM-Crash der ESI-Group und den Postprozessor HyperView ebenfalls von Altair. Darauf aufbauend erfolgte die Abarbeitung der Arbeitspakete zur eigentlichen Zielerreichung. Zu diesem Zeitpunkt waren jedoch noch benötigte Daten ausständig, weshalb der Aufbau des Modulmodells und die Simulation von Missbrauchstests anhand eines Ersatzmodells erprobt wurden. Dies diente der Erarbeitung einer Strategie zur Erreichung der beiden Ziele, die dann direkt auf das eigentliche Modell übertragen werden konnte. Mit der Durchführung einer Versuchsserie an Batteriezellen waren die Daten vollständig, um die Arbeitspakete zur Erreichung der Ziele Schritt für Schritt abarbeiten zu können. Zur Zielkontrolle fand einerseits ein kontinuierlicher Informationsaustausch mit dem Projektpartner statt und andererseits wurden die Teilziele auch regelmäßig präsentiert. Abschließend wurde die Dokumentation verfasst.

Der Aufbau der vorliegenden Arbeit, hinsichtlich ihrer Struktur, entspricht im Wesentlichen jener der Teilziele. So behandeln die folgenden drei Kapitel die in der Literaturstudie aufgegriffenen Themen Hybrid- und Elektrofahrzeuge, elektrische Energiespeicher und Fahrzeugsicherheit, zur Schaffung der theoretischen Grundlagen. Auf ein eigenes Kapitel zur numerischen Simulation wird verzichtet, da die Vorgehensweise in der Anwendung der Finiten Elemente Methode als bekannt vorausgesetzt wird. Danach folgt die praktische

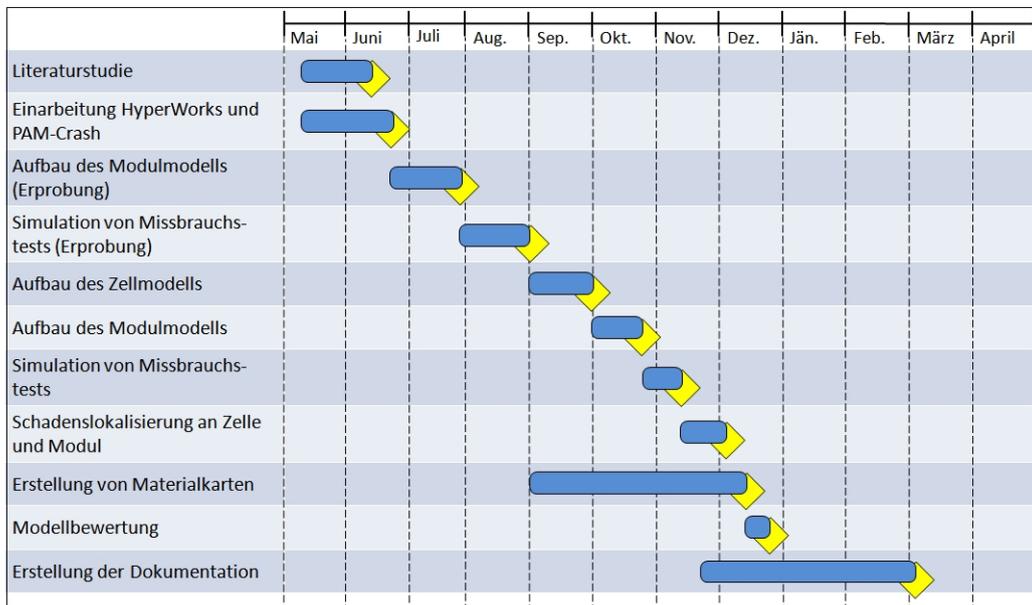


Abbildung 1.1: Terminalschiene zur Erreichung der Projektziele

Umsetzung der Ziele, wobei dem Aufbau des Zellmodells, dem Aufbau des Modulmodells, der Erstellung von Materialkarten, der Simulation von Missbrauchstests, der Schadenslokalisierung, sowie der Modellbewertung eigene Kapiteln gewidmet werden. In einem abschließenden Kapitel werden die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zusammengefasst und die nächsten Schritte zur weiterführenden Modellierung elektrischer Energiespeicher in Form eines Ausblicks aufgezeigt.

Kapitel 2

Hybrid- und Elektrofahrzeuge

Um das Einsatzgebiet der elektrischen Energiespeicher für automotiv Anwendungen kennenzulernen und um die Anforderungen an diese abzuleiten, werden Hybrid- und Elektrofahrzeuge in diesem Kapitel näher betrachtet. Dies umfasst einen Blick auf deren Entwicklung und auf die technische Umsetzung dieser Fahrzeuge, wobei der Bezug zu den elektrischen Energiespeichern hergestellt wird.

2.1 Entwicklung alternativer Antriebskonzepte

Zum Einstieg wird im Zuge dieses Abschnitts auf die historische Entwicklung von Hybrid- und Elektrofahrzeugen, sowie auf dessen Daseinsberechtigung und zukünftige Entwicklung eingegangen.

2.1.1 Historische Entwicklung

Bemerkenswert ist, dass Hybrid- und Elektrofahrzeuge keine neue Entwicklung darstellen, denn ihre Geschichte ist fast genauso alt, wie die des Automobils selbst. Bereits 1900 stellte Ferdinand Porsche, den von ihm konstruierten Lohner Porsche, auf der Weltausstellung in Paris vor. Dieses Fahrzeug wurde durch Radnabenmotoren angetrieben, die von einer Batterie versorgt wurden, während ein Generator, gekoppelt an einen Benzinmotor, den elektrischen Energiespeicher lud. Der Lohner Porsche gilt als das erste Hybridfahrzeug. Zu dieser Zeit waren Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor noch nicht ausgereift und daher unzuverlässig, weshalb in den USA mehr Hybrid- und Elektrofahrzeuge, als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor zugelassen waren.

Im Zuge der Entwicklung nahmen die Vorteile des Verbrennungsmotors überhand und die Hybrid- und Elektrofahrzeuge wurden vom Markt verdrängt [Bady/Biermann 2000, S. 1 f.].

2.1.2 Motivation für alternative Antriebskonzepte

Heute erleben Hybrid- und Elektrofahrzeuge eine Renaissance. Ein Grund hierfür ist der Klimawandel und die damit verbundene globale Erwärmung, welche durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe und das dadurch entstehende CO_2 vorangetrieben wird. Des Weiteren kommt es zur Erreichung des Ölfördermaximums infolge Ressourcenverknappung mit der Folge, dass zukünftig nicht mehr der gesamte Bedarf gedeckt werden kann. Auch die Gesellschaft übernimmt zunehmend Verantwortung für nachfolgende Generationen und möchte nachhaltig handeln. Diese Entwicklungen machen ein Umlenken im Einsatz von fossilen Brennstoffen auf erneuerbare Energiequellen notwendig. Verstärkt wird dies durch die fortschreitende Urbanisierung, denn während 2007 bereits mehr als die Hälfte der Weltbevölkerung in Städten wohnte, werden für 2030 etwa 60 % und für 2050 bereits 70 % prognostiziert. Um der damit einhergehenden erhöhten Umweltbelastung in Städten entgegen zu wirken, sind neue Mobilitätskonzepte gefordert [BMW-Group 2010, S. 2 f.].

Abbildung 2.1 zeigt die CO_2 Emissionen der EU-15 im Jahr 2005, verteilt auf die verursachenden Sektoren. Da 24% der CO_2 Emissionen auf den Transport entfallen, ist ein Potential zur Emissionseinsparung in diesem Sektor gegeben. Dieses Optimierungspotential und die globalen Entwicklungen spiegeln sich in der Gesetzgebung wieder. So ist der Flottenausstoß an CO_2 Emissionen bis 2020 um bis zu 30 % gegenüber dem Vergleichsjahr 2008 zu reduzieren [BMW-Group 2010, S. 4]. Zur Erfüllung dieser Vorschrift werden Hybrid- und Elektrofahrzeuge, aufgrund ihres Kraftstoffsparpotenzial und der damit verbundenen Reduktion von Emissionen, als interessante Perspektive betrachtet. Würden in Deutschland alle Klein-, Mittel- und Oberklassewagen auf Hybrid- und Elektrofahrzeuge umgestellt werden, könnten etwa 29 Millionen Tonnen CO_2 äquivalente Treibhausgase vermieden werden. Durch Verwendung von Strom ausschließlich aus erneuerbaren Energiequellen wären es sogar 67 Millionen Tonnen. Dies entspricht 46 % der Emissionen des deutschen Straßenverkehrs [Marwede/Knoll 2010, S. 3 f.].

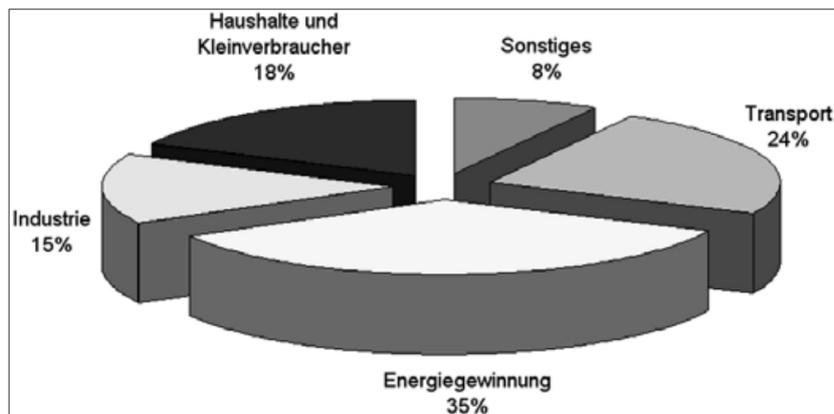


Abbildung 2.1: Verteilung der CO_2 Emissionen der EU-15 im Jahr 2005 auf die verursachenden Sektoren [Hofmann 2010, S. 3]

2.1.3 Zukünftige Entwicklung

Aufgrund der geänderten Gegebenheiten konnte Toyota 1997 mit dem Prius, viele Jahre nach dem Lohner Porsche, wieder ein Hybridfahrzeug am Markt etablieren. Mittlerweile arbeiten alle großen Hersteller an Hybrid- und Elektrofahrzeugen, während dessen Verbreitung forciert wird [Hofmann 2010, S. 10 f.]. Abbildung 2.2 zeigt die Entwicklung der verschiedenen Antriebsformen für Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen weltweit. Für das Jahr 2015 wird der Anteil alternativer Antriebe auf 17 % geschätzt.

2.2 Hybridfahrzeuge

Das Wort *Hybrid* bedeutet „von zweierlei“ und stammt aus dem Lateinischen. 2003 definierten die Vereinten Nationen, kurz UN, den Begriff *Hybridfahrzeug* als „Fahrzeug, in dem mindestens zwei Energieumwandler und zwei Energiespeichersysteme (im Fahrzeug eingebaut) vorhanden sind, um das Fahrzeug anzutreiben“ [Hofmann 2010, S. 2 f.]. Diese Definition erlaubt eine Vielzahl von Kombinationen aus Energieumwandler- und Energiespeichersystemen. Die folgende Ausarbeitung beschränkt sich auf die Variante aus elektrochemischen und chemischen Energiespeicher in Form einer Batterie und Kraftstoff, in Verbindung mit Elektromotor und Verbrennungsmotor als Energiewandler, da sich die vorliegende Arbeit mit dieser Kombination beschäftigt.

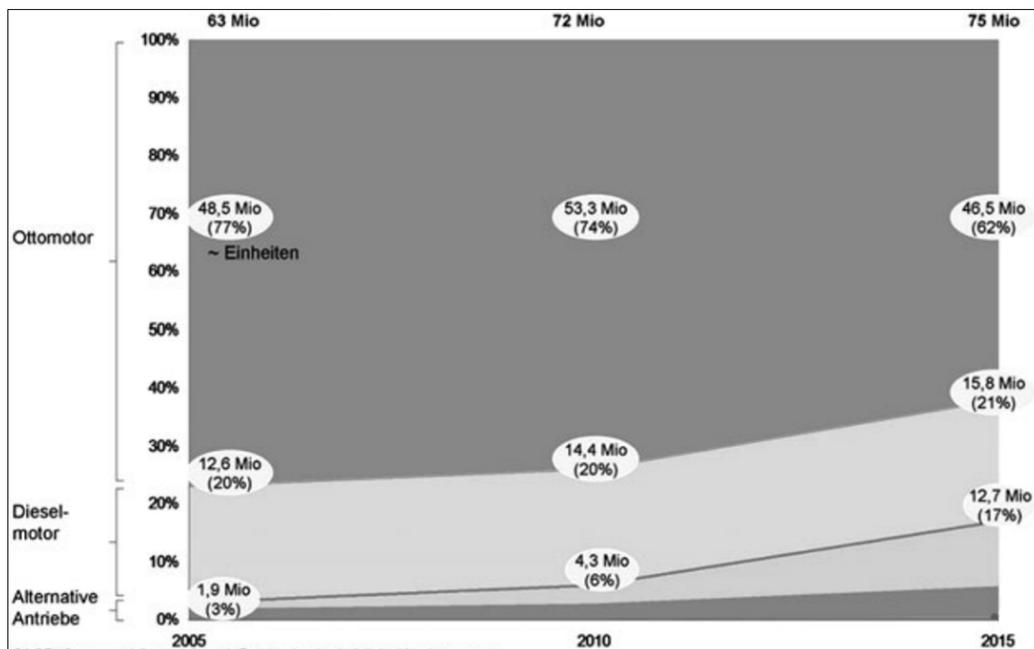


Abbildung 2.2: Entwicklung der verschiedenen Antriebsformen für Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen weltweit [Hofmann 2010, S. 13]

2.2.1 Klassifizierung nach der Anordnung des Antriebsstrangs

Hybridfahrzeuge dieser Art bestehen im Wesentlichen aus den Komponenten Verbrennungsmotor, Elektromotor, Generator, Energiespeicher und Getriebe. In Abhängigkeit der Anordnung dieser Komponenten können Hybridfahrzeuge wie folgt klassifiziert werden:

Serieller Hybrid

Der serielle Hybrid erhält seinen Namen aus der Tatsache, dass hier die Energiewandler in Reihe geschaltet werden, was in Abbildung 2.3 links schematisch dargestellt wird. Der Verbrennungsmotor ist an einen Generator gekoppelt, der die nötige elektrische Energie erzeugt, um die Batterie oder direkt den Elektromotor zu versorgen. Dieser Elektromotor stellt auch den eigentlichen Antriebsmotor dar, während zwischen der Verbrennungskraftmaschine und der Antriebsachse keine mechanische Verbindung besteht [Hofmann 2010, S. 18].

Paralleler Hybrid

Im Gegensatz zum seriellen Hybrid zeichnet sich der parallele Hybrid durch eine mechanische Verbindung beider Energiewandler zur Antriebsachse aus, siehe dazu Abbildung 2.3 mittig. Sowohl der Verbrennungsmotor, als auch der Elektromotor stellen die Antriebsmotoren dar, wobei die abgegebenen Leistungen überlagert werden können. Da der Verbrennungsmotor an den Elektromotor gekoppelt ist, kann dieser auch als Generator betrieben werden, um die Batterie zu laden [Hofmann 2010, S. 21].

Leistungsverzweigter Hybrid

Der leistungsverzweigte Hybrid stellt eine Kombination aus den zuvor besprochenen Anordnungen dar. Dazu wird die Leistung des Verbrennungsmotors, wie auch Abbildung 2.3 rechts zeigt, durch einen Variator in einen mechanischen und einen elektrischen Pfad verzweigt [Hofmann 2010, S. 23].

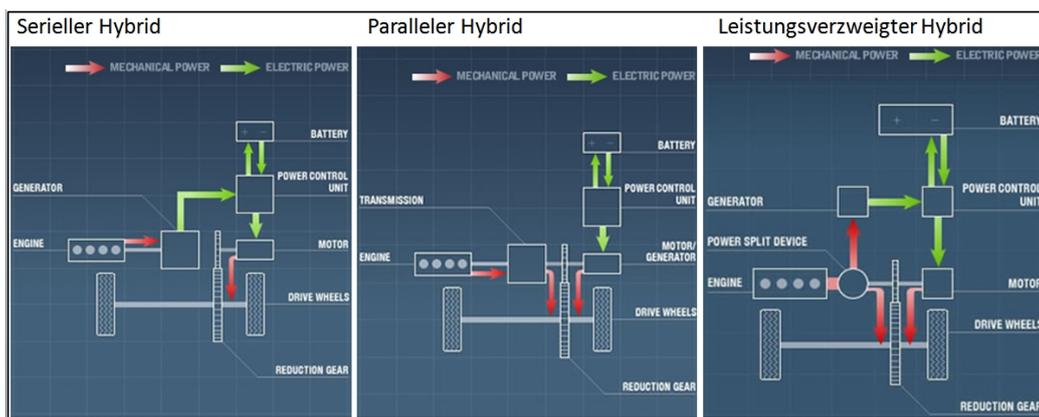


Abbildung 2.3: Unterschiedliche Formen des Antriebsstrangs von Hybridfahrzeugen [Toyota o.J.]

2.2.2 Klassifizierung nach dem Hybridisierungsgrad

Neben der Einteilung nach der Anordnung des Antriebsstrangs, können Hybridfahrzeuge auch nach ihrem Hybridisierungsgrad unterschieden werden. Der Hybridisierungsgrad wird definiert als das Verhältnis der maximalen elektrischen Leistung zur maximalen Gesamtleistung, die an den Antriebsstrang abgegeben werden kann. Nach diesem Unterscheidungsmerkmal hat sich folgende dreistufige Einteilung etabliert [Wilde 2008, S. 13]:

Micro Hybrid

Der Micro Hybrid weist einen geringen Hybridisierungsgrad auf und unterscheidet sich geringfügig von konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. Die Leistung des Elektromotors bewegt sich in der Größenordnung von 2 bis 3 kW, weshalb selten ein zweites Spannungsnetz mit 42 V, zusätzlich zum 12 V Bordnetz, eingesetzt wird. Die implementierte *Start/Stop Automatik* sorgt für eine automatische Abschaltung des Verbrennungsmotors für die Zeit des Stillstands des Fahrzeugs, beispielsweise an roten Ampeln. Des Weiteren kann mit Hilfe des Generators die Bremsenergie bereits eingeschränkt durch *Rekuperation* wieder gewonnen werden. Die Energieeinsparung des Micro Hybrids gegenüber konventionellen Fahrzeugen beläuft sich auf bis zu 10 % [Hofmann 2010, S. 42 f.].

Mild Hybrid

Der Mild Hybrid beschreibt die zweite Stufe der Hybridisierung bei mittleren Hybridisierungsgrad. Die Leistung des Elektromotors entspricht 10 bis 15 kW, was auch die Einführung eines Hochspannungsnetzes im Bereich von 42 bis 150 V, zusätzlich zum 12 V Bordnetz, nötig macht. Neben der Start/Stop Automatik und dem erweiterten Rekuperationspotenzial, zeichnet sich der Mild Hybrid durch die *Boost Funktion* aus. Durch diese kann der Elektromotor den Verbrennungsmotor, beispielsweise bei Beschleunigungsvorgängen, unterstützen. Die Energieeinsparung des Mild Hybrids kann mit 10 bis 20 % beziffert werden [Hofmann 2010, S. 44]. Aus diesen Daten ergeben sich die Anforderungen an den elektrischen Energiespeicher in der Größenordnung von 0,5 bis 1 kWh für das Energiespeichervermögen und bis 20 kW für das Leistungsverhalten [Hofmann 2010, S. 149].

Full Hybrid

Der Full Hybrid weist einen hohen Hybridisierungsgrad auf. Als Leistung des eingesetzten Elektromotors sind 15 kW als untere Grenze anzusehen, was eine Anhebung des Hochspannungsnetzes auf 200 bis 400 V erfordert. Diese Eigenschaften ermöglichen dem Full Hybrid neben der Start/Stop Funktion, der Rekuperation von Bremsenergie und der Boost Funktion auch *rein elektrisches Fahren*. Die Energieeinsparung des Full Hybrids übersteigt 20 % [Hofmann 2010, S. 45 f.]. Die Anforderungen an den elektrischen Energiespeicher bewegen sich in einer Größenordnung von 1 bis 3 kWh für das Energie-

speichervermögen und 25 bis 50 kW für das Leistungsverhalten [Hofmann 2010, S. 149].

Plug-In Hybrid

Der Plug-In Hybrid entspricht im Wesentlichen dem Full Hybrid, dessen Batterie aber auch über das externe Stromnetz geladen werden kann. Häufig wird eine größere Batterie eingesetzt und der Verbrennungsmotor nur als Range Extender zur Reichweitenverlängerung betrieben. Der Plug-In Hybrid kann so auf kurzen Strecken und in der Stadt rein elektrisch betrieben werden und kann trotzdem längere Strecken mit Hilfe des Range Extenders zurücklegen. Dies stellt einen weiteren Schritt hin zum Elektrofahrzeug dar [Hofmann 2010, S. 46 f.].

2.3 Elektrofahrzeuge

Elektrofahrzeuge, also Fahrzeuge die alleine mit elektrischer Energie angetrieben werden, werden derzeit politisch forciert [Hofmann 2010, S. 379]. Die Anforderungen an den elektrischen Energiespeicher bewegen sich in einer Größenordnung größer 20 kWh für das Energiespeichervermögen und größer 40 kW für das Leistungsverhalten [Hofmann 2010, S. 149].

Kapitel 3

Elektrische Energiespeicher

Innerhalb des vorangegangenen Kapitels wurde das Einsatzgebiet der, in der vorliegenden Arbeit behandelten, elektrischen Energiespeicher vorgestellt und dessen Anforderungen hinsichtlich Leistungs- und Energiedichte abgeleitet. Im Zuge dieses Kapitels werden diese Energiespeicher näher betrachtet. Dazu werden ihre Grundlagen behandelt und nachfolgend jene Batterien beschrieben, welche im automotiven Bereich zum Einsatz kommen.

3.1 Allgemeine Grundlagen

Dieser Abschnitt dient einer kurzen Beschreibung der historischen Entwicklung der elektrischen Energiespeicher. Anschließend wird die Funktionsweise der elektrochemischen Zelle beschrieben und das Potential zur Erfüllung der Anforderungen des automotiven Bereichs verschiedener Batterien diskutiert.

3.1.1 Historische Entwicklung

Der italienische Physiker Alessandro Volta entdeckte um 1800 den Stromfluss zwischen zwei, in Elektrolyt getauchten, metallischen Elektroden, womit die Erfindung der Batterie auf ihn zurück geht. Da Voltas Batterien nur entladen werden konnten, strebte man die Entwicklung wiederaufladbarer Batterien an, die auch kurz darauf vorgestellt wurden. 1854 wurde der Bleiakkumulator präsentiert und 1899 folgte der Nickel-Cadmium Akkumulator. Die zunehmende Nutzung mobiler elektrischer Geräte im 20. Jahrhundert motivierte zur Weiterentwicklung, woraufhin um 1990 marktreife Nickel-

Metallhydrid Akkumulatoren und 1991 Lithium-Ionen Batterien vorgestellt wurden [Jossen/Weydanz 2006, S. 1 f.].

3.1.2 Aufbau und Funktion einer elektrochemischen Zelle

Als kleinste Einheit einer Batterie ist die elektrochemische Zelle anzusehen. Unabhängig davon, ob es sich um eine wiederaufladbare Batterie handelt oder nicht, wird sie aus zwei Elektroden, Elektrolyt, Separator und dem Gehäuse aufgebaut, siehe dazu Abbildung 3.1. Die Elektrode besteht im Kern aus einem metallischen Leiter, auf dem einerseits das sogenannte Aktivmaterial aufgebracht ist und der andererseits aus dem Gehäuse geführt wird, um dort als Polanschluss zu dienen. Beide Elektroden sind in das Elektrolyt getaucht, der die Aufgabe hat Ionen, also elektrisch geladene Atome, zu leiten. Zwischen den beiden Elektroden befindet sich der Separator, der ein Berühren der Elektroden verhindert [Jossen/Weydanz 2006, S. 6 f.].

Im Fall der Entladung der Zelle, den auch Abbildung 3.1 zeigt, wird das Aktivmaterial an der negativen Elektrode oxidiert, es werden also Elektronen abgegeben, während das Aktivmaterial an der positiven Elektrode reduziert wird, also Elektronen aufgenommen werden. Die Elektronen wandern daher von der negativen Elektrode über den äußeren Stromkreis, also über den Verbraucher, zur positiven Elektrode. Zur Schließung des Stromkreises kommt es daneben zu einem Ionenstrom durch den Elektrolyt. Die an der negativen Elektrode entstehenden Kationen, das sind positiv geladene Ionen, also Ionen mit einem Elektronenüberschuss, wandern zur positiven Elektrode. Umgekehrt wandern die an der positiven Elektrode entstehenden Anionen zur negativen Elektrode. Im Fall der Ladung wird anstelle der Last eine Spannungsquelle angeschlossen und der soeben beschriebene Vorgang läuft in umgekehrter Richtung ab [Jossen/Weydanz 2006, S. 6 f.].

Ob ein Aktivmaterial oxidiert oder reduziert wird, hängt von seiner Position in der elektrochemischen Spannungsreihe ab. Die Spannungsreihe listet die Potentiale einzelner Elektroden gegenüber einer Bezugs elektrode nach der Spannung und ist in Abbildung 11.2 auf Seite 122 im Anhang auszugsweise dargestellt. Ein größeres Potential besitzt eine größere oxidierende Wirkung, während ein kleineres Potential eine größere reduzierende Wirkung besitzt. Anhand der Spannungsreihe kann man auch die Zellspannung berechnen, indem die Potentiale der verwendeten Aktivmaterialien addiert werden [Jossen/Weydanz 2006, S. 14 f.].

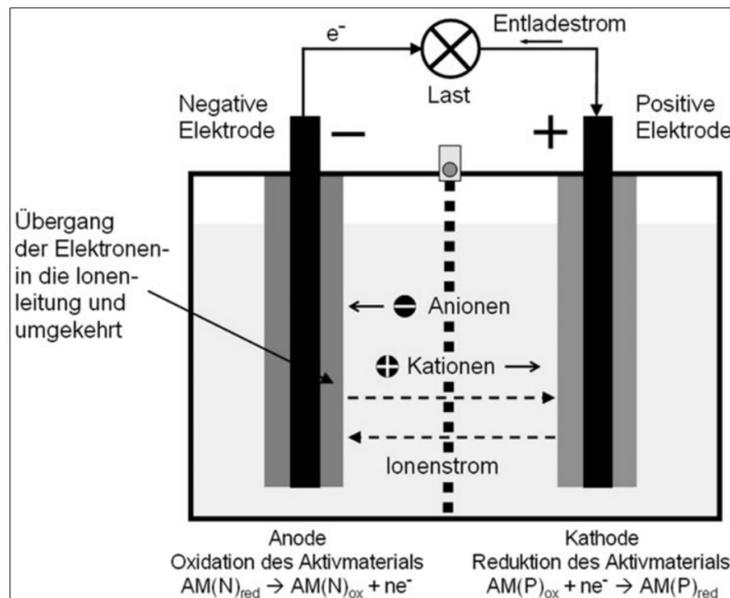


Abbildung 3.1: Grundprinzip der elektrochemischen Zelle im Fall der Entladung [Hofmann 2010, S. 152]

Der Vollständigkeit halber werden noch die Begriffe Batteriemodul und Batteriesystem eingeführt. Ein Modul besteht aus mehreren zusammenschalteten Zellen und Komponenten zur Kühlung etc., während das Batteriesystem aus mehreren zusammenschalteten Modulen aufgebaut ist [Borck/Eberleh/Raiser 2010, S. 9 f.].

3.1.3 Anforderungen an elektrische Energiespeicher

Die Anforderungen an die elektrischen Energiespeicher hinsichtlich Leistungs- und Energiedichte wurden bereits in Kapitel 2 abgeleitet. Zyklische Lebensdauer, energetischer Wirkungsgrad, Selbstentladung, Umweltverträglichkeit, Kosten und Verfügbarkeit stellen ebenso Auswahlkriterien dar. Trotzdem sind eine hohe Leistungsdichte, für dynamische Entlade- und Ladevorgänge, beispielsweise bei der Rekuperation, und eine große Energiedichte, für eine ausreichende emissionsfreie Reichweite, die Hauptanforderungen [Bady/Biermann 2000, S. 8]. In Abbildung 3.2 ist das Ragonedigramm dargestellt, dass die im automotiven Bereich eingesetzten Batterien hinsichtlich ihrer Hauptanforderungen vergleicht. Von links unten nach rechts oben nehmen die dargestellten Energiespeicher an Energie- und Leistungsdichte zu. Da diese Anforderungen mit zunehmenden Hybridisierungsgrad ebenso steigen wird klar, warum in

Lithium Ionen Batterien ein so großes Potential gesehen wird. Im Folgenden werden die im automotiven Bereich eingesetzten Batterien näher betrachtet, wobei auf die Lithium Ionen Batterien besonders detailliert eingegangen wird, da sich die vorliegende Arbeit mit dieser Technologie beschäftigt.

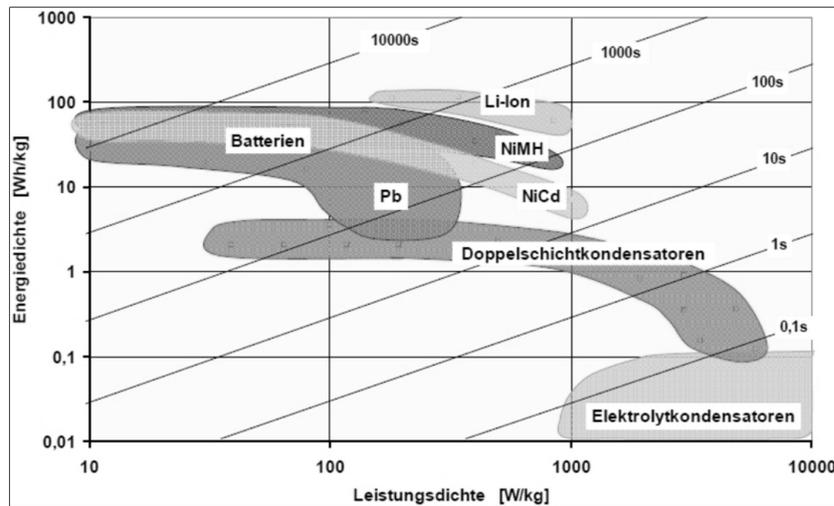


Abbildung 3.2: Vergleich von Energie- und Leistungsdichte der im automotiven Bereich eingesetzten Energiespeicher [Wilde 2008, S. 9]

3.2 Bleibatterie

Aufbau und verwendete Materialien

Für die Bleibatterie wird als Aktivmaterial für die negative Elektrode feinporiges Blei und für die positive Elektrode Bleidioxid eingesetzt. Als Elektrolyt fungiert verdünnte Schwefelsäure und als Separator dienen unterschiedliche Polymerfaservliese [Jossen/Weydanz 2006, S. 34 ff.].

Eignung für Fahrzeuganwendungen

Die Vorteile der Bleibatterie sind ein niedriger Preis, eine hohe Zellspannung von etwa 2V, eine hohe Sicherheit auch im Missbrauchsfall, eine hohe Lebensdauer im Erhaltungsbetrieb und sehr gute Möglichkeiten zum Recyceln. Als Nachteile sind die geringe Energiedichte und die geringe Lebensdauer bei zyklischer Belastung zu nennen [Jossen/Weydanz 2006, S. 33]. Die Anforderungen zum Einsatz in Hybrid- und Elektrofahrzeugen können somit

nur bedingt erfüllt werden, was den Bleiakкумуляtor nur zum Einsatz in Micro Hybriden eignet. Für Fahrzeuge mit größeren Hybridisierungsgrad kommt dieser Typ nicht zum Einsatz, aufgrund des geringen Energiedurchsatzes und der geringen Zyklenfestigkeit [Hofmann 2010, S. 159 f.].

3.3 Alkalische Batterie

Aufbau und verwendete Materialien

Zur Gruppe der alkalischen Batterien zählen sowohl die Nickel-Cadmium als auch die Nickel-Metallhydrid Batterien. Als Aktivmaterial für die negative Elektrode wird für die Nickel-Cadmium Batterie Cadmium und für die positive Elektrode Nickelhydroxid verwendet. Als Elektrolyt dient eine verdünnte Kalilauge und als Separator kommen wieder unterschiedliche Polymerfaservliese zum Einsatz. Für die Nickel-Metallhydrid Batterie wird als Aktivmaterial für die negative Elektrode Metallhydrid, eine wasserstoffspeichernde Legierung, verwendet. Die übrigen Komponenten entsprechen jenen der Nickel-Cadmium Batterie [Jossen/Weydanz 2006, S. 67 ff.].

Eignung für Fahrzeuganwendungen

Die Vorteile der alkalischen Batterien liegen in der guten spezifischen Leistung und der hohen Sicherheit, wobei sich Nickel-Metallhydrid Batterie zusätzlich durch eine hohe Lebensdauer bei kleinen Zyklientiefen auszeichnet [Jossen/Weydanz 2006, S. 65]. Diese konnte sich bereits im Einsatz in Hybridfahrzeugen beweisen. Weitere Verbesserungen hinsichtlich der Leistungsdaten werden nicht erwartet, da diese Technik als ausgereift gilt [Hofmann 2010, S. 161].

3.4 Lithium Ionen Batterie

Funktionsprinzip

Die Lithium Ionen Batterie basiert auf einem anderen Grundprinzip, als das in Unterabschnitt 3.1.2 vorgestellte. Im Fall der Entladung der Zelle, siehe dazu auch Abbildung 3.3, wandern die an der negativen Elektrode entstehenden Lithiumionen wieder durch den Elektrolyt zur positiven Elektrode. Dort werden diese ebenfalls wieder, mit dem durch den äußeren Stromkreis

gewanderten Elektron neutralisiert. Die so entstandenen Lithiumatome werden nun aber im Aktivmaterial interkaliert, also eingelagert. Die Struktur des Aktivmaterials ändert sich durch die Interkalation nicht, im Gegensatz zur Rekonstruktion, also der Bildung neuer Phasen, wie bei Bleibatterien. Die Interkalation wirkt sich aber auf das Volumen des Aktivmaterials aus, abhängig des verwendeten Materials. Beispielsweise nimmt das Volumen von Graphit durch die Einlagerung von Lithiumatomen um 9,2 % zu [Jossen/Weydanz 2006, S. 104 ff.].

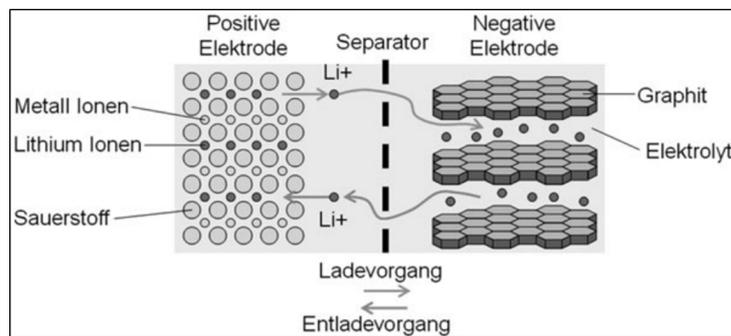


Abbildung 3.3: Grundprinzip der Lithium Ionen Batterie bei Ladung und Entladung [Hofmann 2010, S. 164]

Aufbau und verwendete Materialien

Da Lithium zwar die aktive Spezies darstellt, nicht aber das Aktivmaterial bildet, können dafür verschiedene Materialien eingesetzt werden, solange diese die Interkalation von Lithium ermöglichen. So können unterschiedliche Eigenschaften der Zelle erzielt werden [Jossen/Weydanz 2006, S. 107]. Als Aktivmaterial für die negative Elektrode kommen beispielsweise Lithiummetall (unsicher), Lithium-Titanat (sicher und stabil, aber geringe Kapazität) oder Graphit (guter Kompromiss hinsichtlich Sicherheit, Stabilität und Preis) zum Einsatz. Letzteres stellt das Standardmaterial für die negative Elektrode dar. Als Aktivmaterial für die positive Elektrode werden beispielsweise Lithium-Eisenphosphat (hohe Zyklenfestigkeit, sicher und günstig, aber ungünstige Kaltstarteigenschaften und Alterung), Mangan-Spinell (günstig und sicher, aber schlechte thermische Stabilität) oder Nickel-Kobalt-Mangan (bester Kompromiss hinsichtlich Energie, Sicherheit, Zyklenfestigkeit, Kaltstarteigenschaften, Alterung und Preis) eingesetzt [Lamm u.a. 2009, S. 494]. Als Elektrolyt dient eine Mischung aus Lösungsmitteln, Leitsalz und Zusätzen. Neben dieser flüssigen Form gibt es auch Elektrolyte, die ohne flüssige

Komponenten auskommen. Der Separator wird wieder aus einem Polymerfaservlies aufgebaut [Jossen/Weydanz 2006, S. 122 ff.]. Abbildung 3.4 zeigt den Aufbau einer prismatischen Lithium Ionen Zelle.

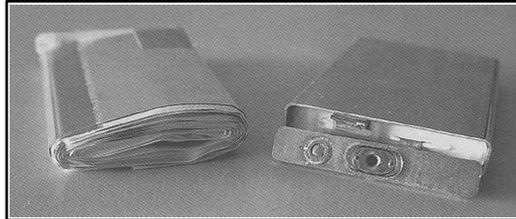


Abbildung 3.4: Prismatische Lithium Ionen Zelle [Jossen/Weydanz 2006, S. 106]

Eignung für Fahrzeuganwendungen

Als Vorteile der Lithium Ionen Batterien sind die hohe Energie- und Leistungsdichte hervorzuheben, sowie der hohe Ladewirkungsgrad und die günstigen Kaltstarteigenschaften [Lamm u.a. 2009, S. 492]. Die Anforderungen zum Einsatz in Hybridfahrzeugen können somit erfüllt werden [Hofmann 2010, S. 166].

Sicherheit

Die Sicherheit spielt bei Lithium Ionen Batterien eine große Rolle, aufgrund ihrer hohen Energiedichte und aufgrund der Notwendigkeit großer Systeme mit hohem Gesamtenergieinhalt. Die Tatsache, dass die frei werdende thermische Energie infolge eines abnormalen Betriebszustands, die elektrisch nutzbare Energie um das Sechsfache übersteigt, unterstreicht das Gefahrenpotential. Dies kann zur Zellöffnung mit Flammenbildung führen. Zur Wahrung der Sicherheit ist auf Zellebene die Wahl geeigneter Elektroden wichtig. Des Weiteren soll der Separator bei zu hoher Temperatur schmelzen, um ein weiteres Aufheizen zu vermeiden. Auch Additive die dem Elektrolyt beigegeben werden und die Beschichtung der Elektroden können die Stabilität erhöhen. Zusätzlich sorgen ein Sicherheitsventil und eine Sollbruchstelle im Gehäuse für eine kontrollierte Reaktion bei Überhitzung. Auf Modulebene werden Thermoschalter eingesetzt, die den Stromfluss bei Fehlfunktion unterbrechen. Auch sollten Elektronikplatinen zur Spannungskontrolle und zur Abschaltung verwendet werden. Ebenso soll das Ladegerät die Spannung beim Laden begrenzen [Jossen/Weydanz 2006, S. 133 f.].

Kapitel 4

Fahrzeugsicherheit

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die Grundlagen der Hybrid- und Elektrofahrzeuge und die dafür verwendeten elektrischen Energiespeicher beschrieben. Da die vorliegende Arbeit die Elektromobilität aus der Sichtweise der Fahrzeugsicherheit betrachtet, wird im Folgenden dieser Themenkreis näher betrachtet. Dazu wird in diesem Kapitel eingangs das Wesen der passiven Fahrzeugsicherheit beschrieben. Anschließend wird der aktuelle Stand der Regelungen bezüglich elektrischer Energiespeicher betrachtet, um zu sehen, wie dem Gefahrenpotential durch die Lithium Ionen Batterien im automotiven Bereich begegnet wird. Zum Abschluss werden Sicherheitstests vorgestellt, die eine Aussage über die Reaktion des elektrischen Energiespeichers infolge eines definierten Missbrauchs ermöglichen.

4.1 Passive Fahrzeugsicherheit

Die Straßenverkehrssicherheit beschäftigt sich mit der Sicherheit im Straßenverkehr und betrifft damit Menschen, Fahrzeug und Umwelt, siehe dazu Abbildung 4.1. Innerhalb der Sicherheit im Straßenverkehr kann zwischen aktiver und passiver Sicherheit unterschieden werden. Zur aktiven Sicherheit zählen sämtliche unfallvermeidende Maßnahmen, also jene die der Herabsetzung der Unfallhäufigkeit dienen. Der gegenüber steht die passive Sicherheit, die sich mit unfallfolgenmindernden Maßnahmen zur Schadensbegrenzung beschäftigt [Kramer 2006, S. 3]. Da die vorliegende Arbeit der passiven Fahrzeugsicherheit dient, wird diese im Folgenden näher betrachtet. Die Maßnahmen der passiven Fahrzeugsicherheit werden weiter in Selbst- und Kontrahenschutz gegliedert, abhängig davon wem sie nützlich sind. Der Selbstschutz

dient der Sicherheit der Insassen in Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen, der äußeren Verkehrsteilnehmer auf motorisierten Zweirädern, auf Fahrrädern, sowie Fußgängern. Zu den Maßnahmen des Selbstschutzes zählen eine geeignete Deformationsstruktur der Karosserie, Gurt, Airbag und einige weitere Insassenschutzsysteme, sowie Selbstschutzmaßnahmen für Nutzfahrzeuge und Zweiradfahrer. Der Kontrahentenschutz dagegen beschäftigt sich mit dem Schutz des Kollisionskontrahenten und umfasst diverse Maßnahmen an Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen [Kramer 2006, S. 143 ff.].

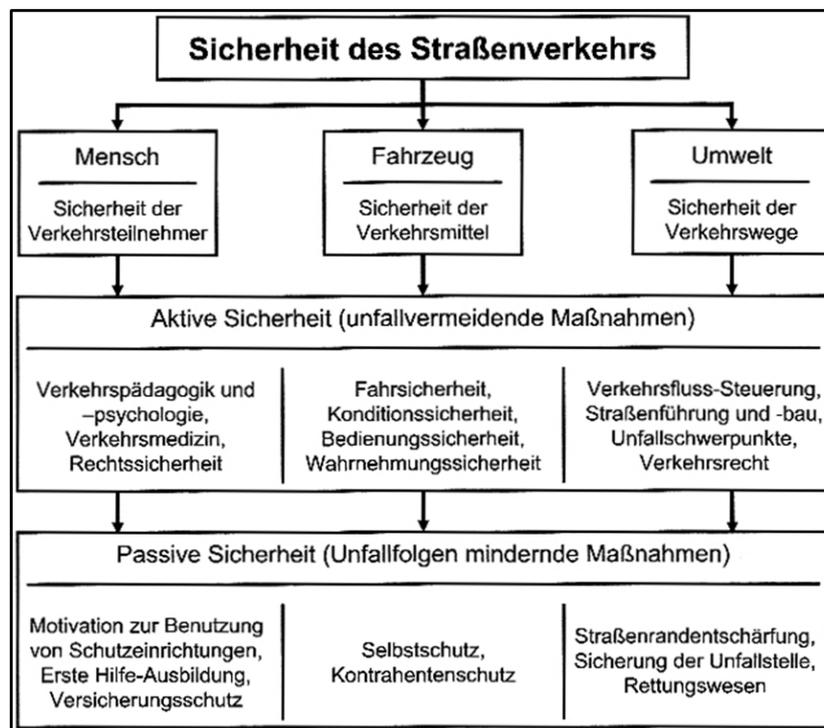


Abbildung 4.1: Überblick über die Straßenverkehrssicherheit [Kramer 2006, S. 3]

4.2 Regelungen der passiven Fahrzeugsicherheit

Im Zuge dieses Abschnitts werden die Regelungen betrachtet, welche die passive Fahrzeugsicherheit betreffen und anschließend der aktuelle Stand der Regelungen für elektrische Energiespeicher erhoben.

4.2.1 Gesetzliche Regelungen

Zur Verbesserung der Straßenverkehrssicherheit erlassen die Gesetzgebungsgremien dementsprechende Gesetze und Standards. Diese verfolgen die Entwicklung sicherer Fahrzeuge und den Erhalt der Verkehrstüchtigkeit durch Prüfintervalle. Des Weiteren sollen Handelshemmnisse abgebaut und die Harmonisierung zugunsten internationaler Bestimmungen gefördert werden. Die gesetzlichen Regelungen in Europa basieren auf drei Standbeinen. Das erste bilden die *nationalen Vorschriften*. In Österreich sind diese in der Straßenverkehrsordnung, kurz StVO, festgehalten, die aber nur wenige Vorschriften zur passiven Sicherheit beinhaltet. Daneben kommen *EU-Richtlinien* zum Einsatz. Maßgeblich sollen diese zur Harmonisierung beitragen, beispielsweise durch Schaffung einer EU-Typengenehmigung mit dem Ziel, Fahrzeuge, die bereits in einem Mitgliedsstaat genehmigt wurden, automatisch auch in den anderen Mitgliedsstaaten zuzulassen. Als drittes Standbein dienen die *Regelungen der ECE*, der Economic Commission for Europe, die eine Unterorganisation der Vereinten Nationen, kurz UN, darstellt. Diese Regelungen stimmen mit den EU-Richtlinien weitgehend überein. Die gesetzlichen Regelungen in den USA sind in den Federal Motor Vehicle Safety Standards, kurz FMVSS, festgehalten. Aufgrund des Prinzips der Selbsteinschätzung stellen diese aber keine Voraussetzung für die Zulassung eines Fahrzeugs dar und werden nur stichprobenartig auf Einhaltung überprüft [Kramer 2006, S. 290 f.]. Abbildung 4.2 gibt einen Überblick über die existierenden Crash-Gesetze zur Fahrzeugsicherheit in Europa und den USA.

4.2.2 Verbraucherschutzmaßnahmen

Neben den gesetzlichen Regelungen existieren noch weitere Prüfverfahren von staatlichen Institutionen, von Verbraucherschutzorganisationen und von Versicherungsgesellschaften, zur Überprüfung der passiven Sicherheit. Die gewonnenen Erkenntnisse werden in der Fahrzeugentwicklung auf freiwilliger Basis berücksichtigt. Diese Prüfverfahren umfassen unter anderem die Neuwagen-Bewertungs-Programme, kurz NCAP. Im Zuge dieser werden die Fahrzeuge nach sicherheitstechnischen Gesichtspunkten untersucht, wobei die gesetzlichen Regelungen nur als Mindestanforderungen betrachtet werden. Die Ergebnisse werden anschließend veröffentlicht, um als Entscheidungshilfe beim Fahrzeugkauf zu dienen. In Europa wird dieses Programm als *EuroNCAP* durch ein Konsortium von 10 Mitgliedern durchgeführt und ist dem Verbraucherschutz zuzuordnen. In den USA wird dieses Verfahren durch die staatliche Institution NHTSA unter dem Namen *US-NCAP* durchgeführt.

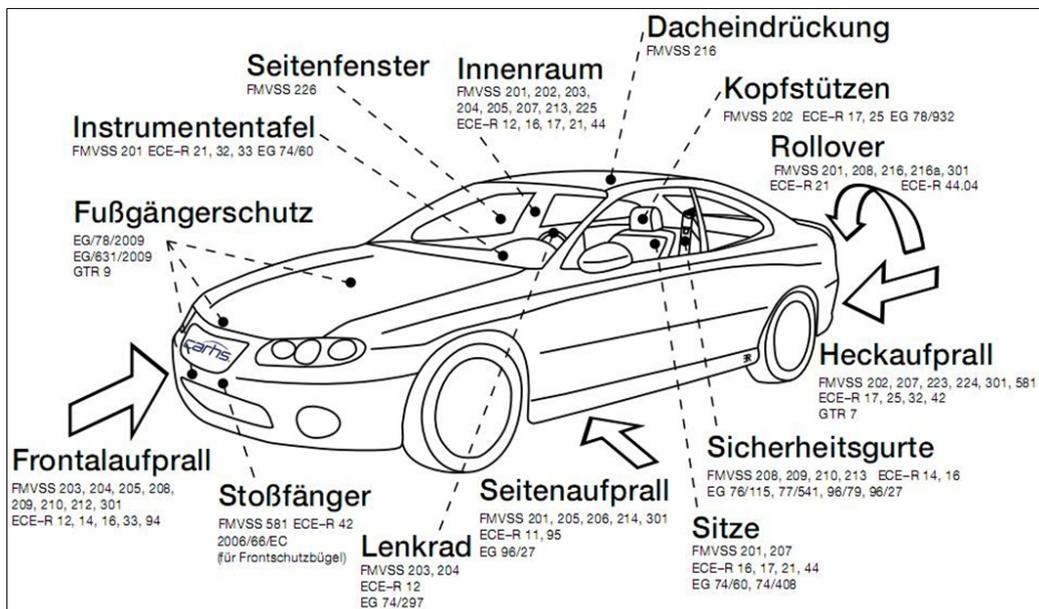


Abbildung 4.2: Überblick über die Crash Gesetze in Europa und den USA [carhs 2011, S. 16]

Zusätzlich gibt es noch Versicherungsgesellschaften, wie das Insurance Institute for Highway Safety, kurz *IIHS*, die ähnliche Versuche durchführen [Kramer 2006, S. 307 ff.]. Abbildung 11.3 auf Seite 123 im Anhang gibt dazu einen Überblick über die Prüfkonditionen von EuroNCAP, US-NCAP und IIHS.

4.2.3 Aktuelle Regelungen für elektrische Energiespeicher

An dieser Stelle wird auf die aktuellen Regelungen eingegangen, welche die Elektromobilität und insbesondere die elektrischen Energiespeicher betreffen. Diese Erhebung ist eine umfangreiche Aufgabe, weshalb die Ergebnisse des Projekts Innovation mit Normen und Standards, kurz INS, das sich mit dieser Aufgabenstellung auseinandersetzt, herangezogen werden. Zur Informationsbeschaffung wurden im Rahmen des Projekts, neben den zuvor vorgestellten Gesetzgebungsgremien und Prüforganisationen, auch nationale sowie internationale Normungsorganisationen einbezogen. Dazu gehören das Deutsche Institut für Normung, kurz DIN, die Internationale Organisation für Normung, kurz ISO, die Internationale Elektrotechnische Kommission, kurz IEC, als auch der Verband der Automobilingenieure, kurz SAE. Die

zuletzt genannte Organisation ist zwar keine internationale Normungsorganisation, besitzt dennoch überregionale Bedeutung [Bremer 2010, S. 6 ff.].

Das INS Projekt kommt zur Schlussfolgerung, dass der erste Bedarf an Regelungen bereits abgedeckt wurde, wozu aber die noch laufenden Normungsprojekte rasch abzuschließen sind [Bremer 2010, S. 13]. Hinsichtlich der elektrischen Energiespeicher sind davon unter anderem die Normen ISO 12405 und IEC 62660 betroffen, zur Festlegung der Prüfspezifikationen für Lithium Ionen Antriebsbatterien. Des Weiteren sind die Gesetze ECE-R94, ECE-R95 und ECE-R100 fertig zu überarbeiten, die sich mit der Sicherheit von Fahrzeugen nach Front- und Seitenaufprall und mit einheitlichen Bedingungen für die Genehmigung der batteriebetriebenen Elektrofahrzeuge beschäftigen. Auch die Normen ISO 26262 und ISO 6469-3, betreffend die funktionale Sicherheit und die Sicherheitsbestimmungen sind fertig anzupassen, um alle Hochvolt Sicherheitsbelange zu erfassen. Im Zuge des Projekts wurde auch eine Liste von relevanten Bereichen zusammengestellt, die bisher noch unzureichend berücksichtigt werden. Bezüglich der elektrischen Energiespeicher betrifft dies unter anderem die Festlegung der Anforderungen aus mechanischen und elektrischen Umgebungsbedingungen. Des Weiteren sind Prüfanordnungen für die verschiedenen Antriebsformen, sowie Prüfverfahren zur Bestimmung des Gefährdungspotenzials infolge eines abnormalen Betriebszustands festzulegen [Bremer 2010, S. 44 f.].

Aus den Ergebnissen des INS Projekts kann geschlossen werden, dass bereits viel zur passiven Sicherheit der Elektromobilität beigetragen wurde, trotzdem aber relevante Bereiche noch unzureichend berücksichtigt sind. Diese gilt es zu erforschen, wodurch auch der Einsatz zur Erstellung der vorliegenden Arbeit gerechtfertigt wird.

4.3 Missbrauchstests für elektrische Energiespeicher

Im Zuge dieses Abschnitts werden Missbrauchstests vorgestellt, die eine Aussage über die Reaktion des elektrischen Energiespeichers infolge eines definierten Missbrauchs ermöglichen. Im vorangegangenen Abschnitt wurde gezeigt, dass es noch keinen internationalen Standard für Prüfverfahren gibt. Im Folgenden wird daher auf die Missbrauchstests von SAE zurückgegriffen, da diese bereits an Bedeutung gewonnen haben und in vielen Untersuchungen zu diesem Thema angewendet werden. Abschließend wird auf Kritikpunkte dieser Missbrauchstests eingegangen.

4.3.1 Missbrauchstests nach SAE

Die Missbrauchstests für die in Elektrofahrzeugen verwendeten Batterien nach SAE, werden in der Vorschrift J2464 festgehalten. Sandia National Laboratories hat diese Tests verfeinert und angepasst, um auch die Batterien für Hybridfahrzeuge zu berücksichtigen. Abnahmekriterien für das Bestehen der Missbrauchstests gibt es auch hier nicht, da die Anforderungen von der Anwendung abhängig sind. Zur Erzielung vergleichbarer Ergebnisse, sind die Tests mit neuen und voll geladenen Energiespeichern, bei Raumtemperatur und bei Betriebstemperatur der Batterien durchzuführen. Die Reaktion der elektrischen Energiespeicher auf die Missbrauchstests, wird in die Gefährdungsklassen des European Council for Automotive Research and Development, kurz EUCAR eingeteilt, siehe Abbildung 4.3. Dies ermöglicht eine vergleichbare Darstellung der Ergebnisse. Die Tests werden nach ihrer Belastungsart in mechanische, thermische und elektrische Missbrauchstests gegliedert [Doughty/Crafts 2006, S. 9 ff.]. Im Folgenden werden die mechanischen Missbrauchstests genauer betrachtet, da diese zur Erstellung der vorliegenden Arbeit notwendig sind.

Hazard Level	Description	Classification Criteria & Effect
0	No effect	No effect. No loss of functionality.
1	Passive protection activated	No defect; no leakage; no venting, fire, or flame; no rupture; no explosion; no exothermic reaction or thermal runaway. Cell reversibly damaged. Repair of protection device needed.
2	Defect/Damage	No leakage; no venting, fire, or flame; no rupture; no explosion; no exothermic reaction or thermal runaway. Cell irreversibly damaged. Repair needed.
3	Leakage $\Delta\text{mass} < 50\%$	No venting, fire, or flame*; no rupture; no explosion. Weight loss $< 50\%$ of electrolyte weight (electrolyte = solvent + salt).
4	Venting $\Delta\text{mass} \geq 50\%$	No fire or flame*; no rupture; no explosion. Weight loss $\geq 50\%$ of electrolyte weight (electrolyte = solvent + salt).
5	Fire or Flame	No rupture; no explosion (<i>i.e.</i> , no flying parts).
6	Rupture	No explosion, but flying parts of the active mass.
7	Explosion	Explosion (<i>i.e.</i> , disintegration of the cell).

Abbildung 4.3: EUCAR Gefährdungsklassen zur Bewertung der Reaktion der elektrischen Energiespeicher auf die Missbrauchstests [Doughty/Crafts 2006, S. 15]

Mechanische Missbrauchstests

Die mechanischen Missbrauchstests sind in der für die Batterie kritischste Belastungsrichtung durchzuführen. Im Zuge des *quasistatischen Drucktests* wird das Batteriemodul zwischen einer flachen und einer texturierten Platte nach Abbildung 4.4 komprimiert. Zunächst wird es dazu um 15 % und nach fünf Minuten Rast auf insgesamt 50 % komprimiert, beziehungsweise bis die Belastung das Tausendfache der Modulmasse beträgt. Danach ist wieder eine Haltezeit von fünf Minuten einzuhalten. Daneben wird für das Batteriesystem ein *Falltest* aus definierter Höhe auf ein zylindrisches Objekt und ein *Tauchtest* in Salzwasser vorgesehen. Weitere Tests sehen vor, das Batteriemodul oder das Batteriesystem einer *Überrollsimulation* und *mechanischen Erschütterungen* auszusetzen. Ebenso wird der *Durchdringungstest* beschrieben, im Zuge dessen die Zelle, das Modul oder das gesamte Batteriesystem mit einem Nagel durchdrungen wird [Doughty/Crafts 2006, S. 17 ff.].

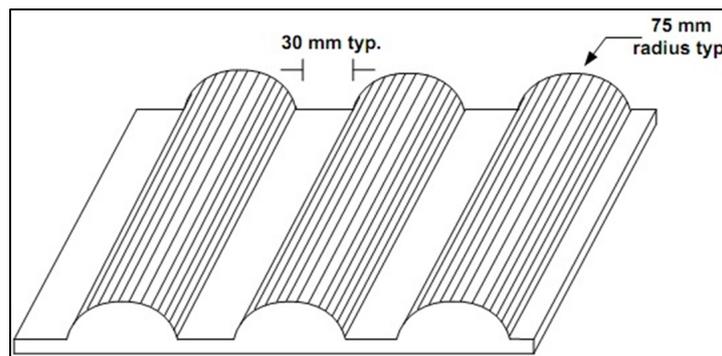


Abbildung 4.4: Texturierte Platte für den quasistatischen Drucktest [Doughty/Crafts 2006, S. 17]

4.3.2 Erweiterung der Missbrauchstests nach TÜV SÜD und Daimler

Der beschriebene quasistatische Drucktest bringt einige Kritikpunkte mit sich. Zum einen gestaltet sich bereits die Durchführung schwierig, da sowohl die Kompression auf 50 %, als auch die Belastung mit dem tausendfachen der Modulmasse ausschließlich auf besonders leistungsfähigen Versuchsanlagen möglich ist. Des Weiteren repräsentiert der aufgebrachte Lastfall nicht die Belastung in realen Unfällen. Hier erfolgt die Krafteinleitung durch die Umgebungsstruktur über mehrere, verteilte Lastpfade indirekt, wodurch Kraftspit-

zen unter anderem durch die deformierbare Umgebung gedämpft werden. Zusätzlich spielt auch die kurze Zeitdauer der Kräfteinleitung von wenigen Millisekunden eine wichtige Rolle, da Komponenten kurze, dynamische Kräfte in der Regel besser ertragen, als langandauernde, statische Belastungen. Um diesen Punkten Rechnung zu tragen führt der TÜV SÜD und Daimler dynamische Stoßtests durch, die im Folgenden vorgestellt werden [Wech u.a. 2011, S. 2 f.].

Versuchsaufbau und Durchführung

Der Versuchsaufbau entspricht der Konstellation in Abbildung 4.5. Die feststehende Batterie wird dabei mit einem Impaktor mit 40 km/h beschossen, wobei genau so viel Energie umgewandelt werden soll, wie im zuvor durchzuführenden quasistatischen Drucktest. Der Energieeintrag wird dazu über die Masse des Impaktors reguliert. Dieser ist ein Halbzylinder mit 150 mm Durchmesser für kleinere Batterien, beziehungsweise mit 300 mm Durchmesser für größere Batterien. Ist die Masse der Batterie groß genug, damit der benötigte Energieeintrag über die beschleunigte Batterie erfolgen kann, ist der Versuchsaufbau anzupassen. In diesem Fall wird der feststehende Impaktor mit der beschleunigten Batterie beschossen [Wech u.a. 2011, S. 3].

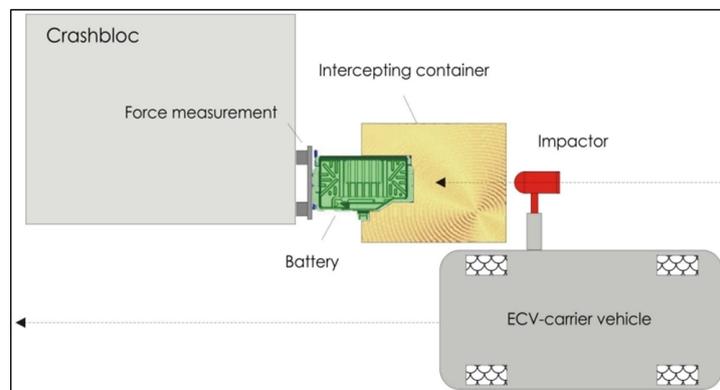


Abbildung 4.5: Versuchsaufbau für den quasistatischen Drucktest und für den dynamischen Stoßtest [Wech u.a. 2011, S. 3]

Auswertung der Ergebnisse

Im Zuge des Projekts von TÜV SÜD und Daimler wird dieser Test unter anderem an der Lithium Ionen Batterie des Mercedes ML450 Hybrid durchgeführt. Die Batterie wiegt 48 kg und wird durch ein steifes Stahlgehäuse

geschützt. Im Zuge des quasistatischen Drucktests wird eine Intrusion von 90 mm, bei einer Maximalkraft von 60 kN erreicht, wodurch die externe Arbeit von 3 kJ in interne Energie durch Deformation umgewandelt wird. Im Fall der dynamischen Versuchsdurchführung wird derselbe Energieeintrag geleistet. Das Ergebnis wird in Abbildung 4.6 dargestellt, indem die Kraft/Weg Kurven der durchgeführten Versuche überlagert werden. Bemerkenswert ist, dass der dynamische Stoßtest eine geringere Intrusion von nur 35mm, bei einer größeren Maximalkraft von 130 kN erreicht, obwohl der gleiche Energieeintrag geleistet wird. Der dynamische Test wird ein zweites Mal mit dreifachem Energieeintrag wiederholt. In keinen der Versuche werden Schäden wie Kurzschluss, Elektrolytverlust, Feuer oder Explosion festgestellt [Wech u.a. 2011, S. 6 f.].

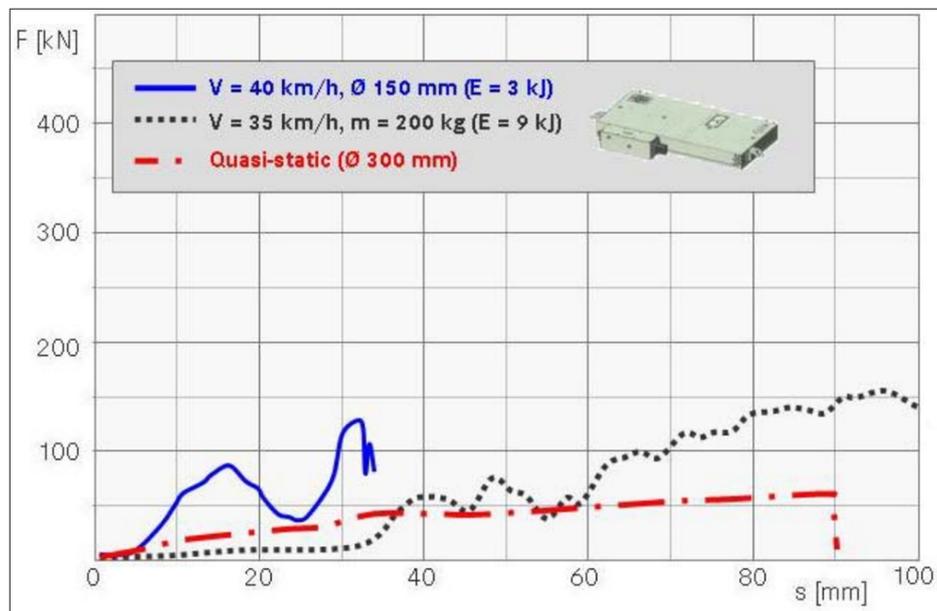


Abbildung 4.6: Vergleich des quasistatischen Drucktests mit den dynamischen Stoßtests an der Mercedes ML450 Hybrid Lithium Ionen Batterie [Wech u.a. 2011, S. 6]

Kapitel 5

Aufbau des FE-Modells der Batteriezele

Während sich die bisherigen Kapitel der Einführung und der Schaffung der theoretischen Grundlagen zur vorliegenden Arbeit widmeten, wenden sich die nun folgenden Kapitel der praktischen Umsetzung der Aufgabenstellung zu. Ziel dieses Kapitels ist es, die Modellierung der Batteriezele als FE-Modell zu behandeln. Eingangs wird die zu modellierende Zelle beschrieben und die an ihr durchgeführte Versuchsserie vorgestellt. Darauf baut die anschließend beschriebene Modellierung auf, wobei wichtige Elemente der Modellierung danach gesondert behandelt werden. Abschließend wird das erhaltene FE-Modell anhand eines Versuchs aus der Versuchsserie validiert.

5.1 Beschreibung der Batteriezele

Dieser Abschnitt dient der Beschreibung der zu modellierenden Batteriezele und ihrer Komponenten. Bei der zu modellierenden Zelle handelt es sich um eine Lithium-Ionen Batterie nach VDA Standard mit einer elektrischen Ladung von 24Ah. Abbildung 5.1 zeigt die Batteriezele mitsamt ihren gemessenen Abmessungen und der Benennung der wesentlichen Komponenten. Von außen betrachtet besteht die Zelle im Wesentlichen aus der *Hülle* und dem *Capplate*, die aus Aluminiumblechen gefertigt sind und Pluspotential besitzen. Beide dienen dem Schutz und dem Zusammenhalt des Zellinnenlebens und verhindern das Auslaufen des flüssigen Elektrolyts. Das Capplate dient zusätzlich der Aufnahme der *Polplatten* die ebenfalls aus Aluminium bestehen. Jede Polplatte führt eine der beiden Elektroden nach außen und

beherbergt ebenfalls den *Pol* aus Stahl, um die Zellspannung an ihnen abnehmen zu können. An dieser Stelle ist eine Unterscheidung zwischen dem Minuspol in der Abbildung links und dem Pluspol in der Abbildung rechts notwendig. Konstruktiv sind beide Pole und Polplatten gleich, der Unterschied besteht in der Verbindung der Polplatten mit dem Capplate. Die Polplatte wird am Pluspol über eine elektrisch leitende *Adapterplatte* mit dem Capplate verbunden, da dieses ebenfalls Pluspotential besitzt. Die Polplatte am Minuspol wird dagegen über eine elektrisch isolierende Adapterplatte mit dem Capplate verbunden, um die beiden Potentiale zu trennen. Das Capplate beherbergt auch eine mittig angebrachte Öffnung, verdeckt durch das *Vent*. Es dient als Überdruckventil, um ein kontrolliertes Entgasen der Zelle über das Vent im Fall eines abnormalen Betriebszustands zu ermöglichen. Da keine Informationen über das Innenleben der Zelle vorliegen, werden sämtliche Komponenten im Inneren der Zelle, wie Spangen, Spacer, etc. als *Innenkörper* zusammengefasst. Im Wesentlichen besteht das Innenleben aber aus dem *Zellmaterial*, das daher getrennt vom Innenkörper betrachtet wird und dessen Aufbau bereits in Abschnitt 3.4 behandelt wurde. Man kann den schichtweisen Aufbau des Zellmaterials mit dem eines Stapels Papier vergleichen, um die zu erwartenden mechanischen Eigenschaften des Zellmaterials nachvollziehen zu können. Drückt man schließlich auf den Papierstapel in Richtung der Normalen zur Blattebene, ist der Widerstand gegenüber der Verformung größer, als in eine Richtung parallel zur Blattebene, da sich hier der Papierstapel auffalten würde. Das Zellmaterial ist ebenfalls für eine Bauchung der Hülle aus der *xz*-Ebene verantwortlich. Dadurch steigt die Höhe der Hülle vom Rand in Richtung zur Mitte der Zelle hin an.

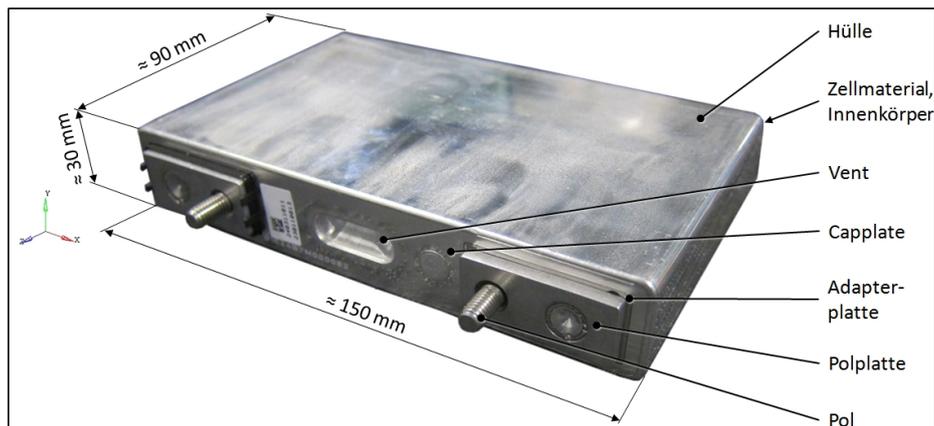


Abbildung 5.1: Lithium-Ionen Batteriezelle nach VDA Standard mit ihren Abmaßen und der Benennung der wesentlichen Komponenten

5.2 Stauchversuche zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften

Zusätzlich zur Beschreibung der Zelle, dient eine Versuchsserie auf Zellebene, weitere in erster Linie mechanische Eigenschaften der Zelle abzuleiten. Die erhaltenen Ergebnisse unterstützen einerseits die Modellierung der Zelle, indem sämtliche gewonnene Eigenschaften als Vorlage für das FE-Modell dienen, welches diese Eigenschaften ebenfalls abbilden soll. Andererseits dienen die Ergebnisse der Feststellung von Schäden an der Zelle, was in Kapitel 9 behandelt wird. Dieser Abschnitt beschreibt die Versuchsserie, den Versuchsaufbau und dessen Durchführung, gefolgt von der Auswertung der Ergebnisse für jede Versuchskonstellation.

5.2.1 Beschreibung der Stauchversuche

Im Zuge der Versuchsserie stehen neun Zellen mit 80 % SOC zur Verfügung. Um Eigenschaften der gesamten Zelle zu erhalten werden Stauchversuche durchgeführt, indem eine Flächenlast auf die gesamte Zelle aufgebracht wird. Dabei werden drei Richtungen untersucht, die als x-, y- und z-Richtung bezeichnet werden und sich mit den jeweiligen Koordinatenachsen in Abbildung 5.1 decken. Es werden drei Versuche pro Richtung durchgeführt. Das Versuchsportfolio wird in Tabelle 5.1 noch einmal zusammengefasst. Zur Ergebnisauswertung werden Stempelkraft und -weg, Zellspannung und -temperatur laufend aufgezeichnet, das Deformationsverhalten festgehalten und teilweise eine Thermografie durchgeführt.

Versuchskonfiguration	Belastungsrichtung	Anzahl	SOC
Stauchversuch	x	3	80%
	y		
	z		

Tabelle 5.1: Versuchsportfolio zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften der Zelle

5.2.2 Versuchsaufbau und Durchführung

Die Versuchsserie wird extern durchgeführt, da eine abgeschottete Messkammer, ausgestattet mit einer Kohlendioxid Löscheinrichtung und nachgeschal-

teter Gaswäsche Voraussetzung ist, um die Stauchversuche an geladenen Zellen sicher durchführen zu können. Zur Versuchsdurchführung wird eine hydraulische Presse der Firma Enerpac eingesetzt, mit einer Maximaldruckkraft von 50 t. Die Vorschubgeschwindigkeit wird für die gesamte Versuchsserie auf 1,5 mm/s festgelegt, wobei diese über den Öldruck reguliert wird. Die Kraftmessung an dieser Presse erfolgt ebenfalls indirekt über den Öldruck und auch die Wegmessung erfolgt indirekt über den Stempelweg, wodurch die Steifigkeit der Maschine mitgemessen wird. Der Versuchsdurchführung gehen einige Vorbereitungen voraus:

Die indirekte Kraft- und Wegmessung bedingt eine Kalibrierung der Prüfmaschine. Dazu wird die auch in den Versuchen verwendete Isolierplatte aus Pertinax und ein Aluminiumblock in der Größe der zu testenden Zellen eingelegt und bis zur Maximaldruckkraft der Maschine belastet. Die Steifigkeit der Presse ist nun bekannt und die erhaltenen Ergebnisse können um diese bereinigt werden. Parallel dazu wird in einem ersten Schritt eine Zelle stichprobenartig vermessen, wobei die entnommenen Abmessungen in Abbildung 5.1 ersichtlich sind. An jenen Zellen, an denen eine Thermografie durchgeführt wird, wird ein Kreidespray aufgebracht, um trotz spiegelnder Oberflächen ein Referenzbild zu erhalten. Anschließend wird je ein Thermoelement von Typ K mit temperaturbeständigem Klebeband an zwei Seiten der Zelle, beim Versuch in z-Richtung sogar ein drittes am Vent, aufgeklebt, siehe dazu Abbildung 5.2 die den Versuchsaufbau zeigt. Ebenfalls wird die Verkabelung für Temperatur- und Spannungsmessung durchgeführt, die Videokamera und die Highspeed-Videokamera, die Videos mit 150 fps aufnimmt, um das Deformationsverhalten festzuhalten, in Position gebracht. Auch ist die Kamera für die Thermografie, die neben der Temperaturmessung ebenfalls das Deformationsverhalten selbst bei starker Rauchentwicklung verfolgen kann, zu positionieren. Abschließend wird die Zelle in die Presse eingelegt, um den Versuchsaufbau abzuschließen. Die Versuche in x- und z-Richtung erfordern eine zusätzliche Einspannung der Zelle, um einen sicheren Stand derselben zu gewähren. Um einen Kurzschluss über die Prüfmaschine zu verhindern, wird zwischen Zelle und Presse eine Isolierplatte aus Pertinax eingelegt. Der Versuchsaufbau für die Versuche in z-Richtung erfordert einen weiteren Schritt der Vorbereitung. Um hier eine Flächenlast aufbringen zu können, werden die Pole abgetrennt und eine zusätzliche Adapterplatte aus Pertinax zwischen Stempel der Presse und Zelle eingelegt, um die Last gleichmäßig auf die Polplatten und das Capplate zu verteilen. Der Versuchsaufbau ist nun abgeschlossen und die Versuchsserie kann wie im Versuchsportfolio festgehalten durchgeführt werden.

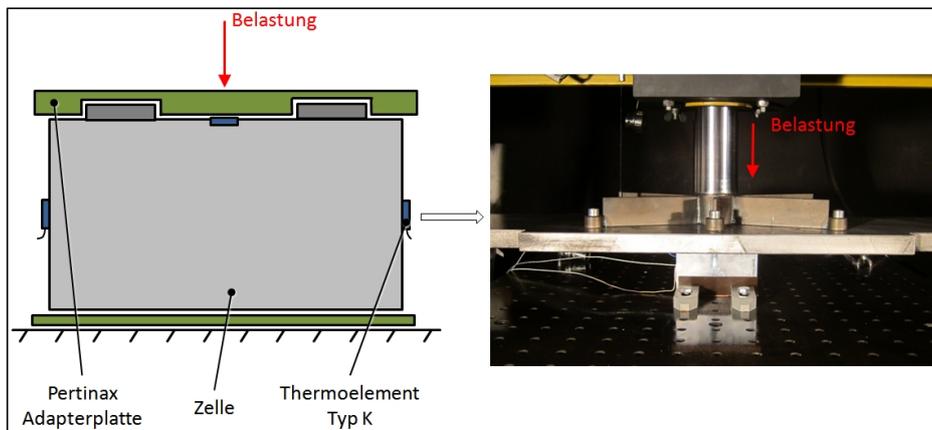


Abbildung 5.2: Versuchsaufbau der Stauchversuche in z-Richtung

5.2.3 Auswertung der Stauchversuche

Für die spätere Modellierung des mechanischen Verhaltens der Batteriezelle sind insbesondere die Kurven Stempelkraft über Stempelweg sowie das Deformationsverhalten von Bedeutung, weshalb sich die folgenden Auswertungen auf diese Parameter beschränken.

Auswertung der Stauchversuche in x-Richtung

Zur Auswertung der Stauchversuche in x-Richtung sind die Verläufe von Kraft und Spannung über den Weg in Abbildung 5.3 ersichtlich, während Abbildung 5.4 Ausschnitte aus dem Highspeedvideo an markanten Punkten zeigt.

Der erste Videoausschnitt zeigt die undeformierte Zelle zu Simulationsbeginn. Mit einsetzendem Vorschub steigt die Kraft steil und kontinuierlich an, bis sie ihren Höhepunkt erreicht. Der zweite Videoausschnitt zeigt die nahezu undeformierte Zelle zu diesem Zeitpunkt. Daraufhin kommt es zum Knicken der Hülle auf der Höhe des Vents und dem damit verbundenen Kraftabfall. Es folgt ein stetiges Ausbiegen der Hülle an dieser Stelle. Später fällt die Spannung erstmals unter die Ausgangsspannung. Für einen Kurzschluss außerhalb der Zelle sind keine Anzeichen zu finden, weshalb von einem inneren Kurzschluss ausgegangen werden muss. Dieser Zustand wird durch den dritten Videoausschnitt dokumentiert, der die stark deformierte Zelle beim einsetzenden Spannungsabfall zeigt. Ab diesem Zeitpunkt sinkt die Spannung weiter und es kommt zu einer starken Rauchentwicklung rund um das Vent, was der vierte Videoausschnitt dokumentiert.

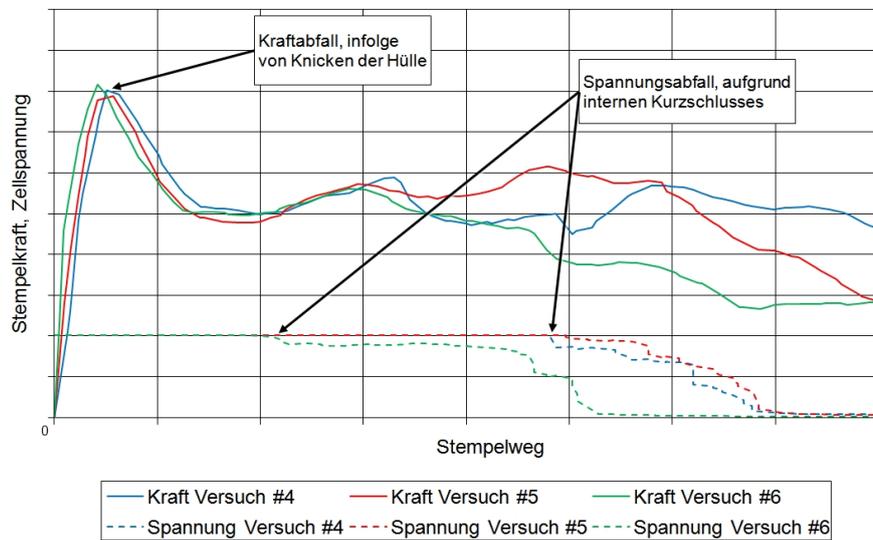


Abbildung 5.3: Verläufe der Stempelkraft und der Zellspannung über dem Stempelweg bei den Stauchversuchen in x-Richtung

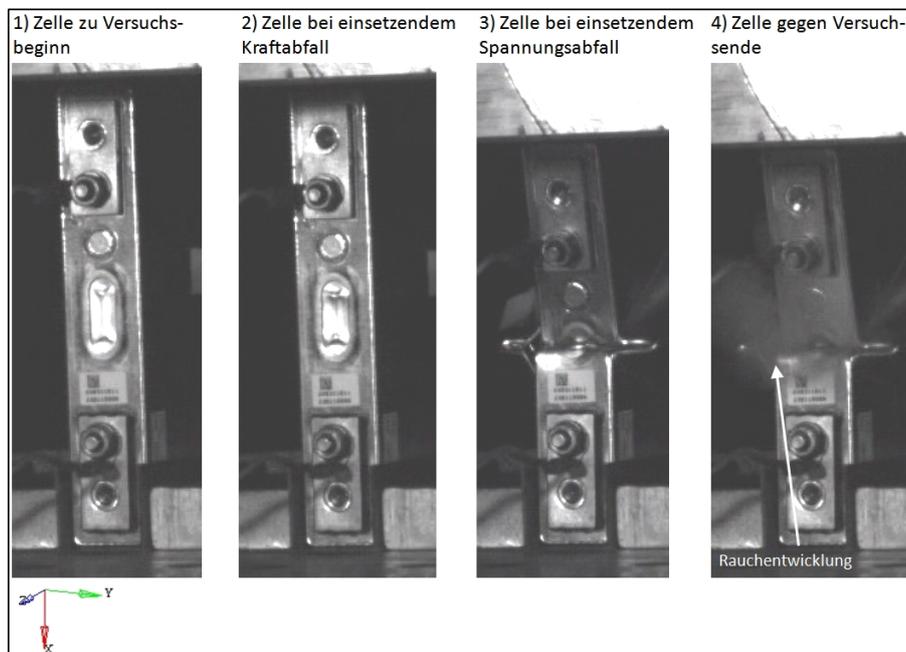


Abbildung 5.4: Deformationsverhalten der Zelle beim Stauchversuch #4 in x-Richtung

Auswertung der Stauchversuche in y-Richtung

Zur Auswertung der Stauchversuche in y-Richtung zeigt Abbildung 5.5 wieder die Verläufe von Kraft und Spannung über den Weg und Abbildung 5.6 präsentiert Ausschnitte aus dem Highspeedvideo an kritischen Punkten.

Der erste Videoausschnitt zeigt wieder die unverformte Zelle zu Simulationsbeginn. Mit einsetzendem Vorschub verharrt das Kraftniveau konstant auf geringem Niveau. Während dieser Zeit legt sich die Zelle plan am Stempel und der Isolierplatte an, was in der Ausgangslage durch die Bauchung der Zelle verhindert wurde. Danach kommt es zu einem steilen und kontinuierlichen Kraftanstieg. Der zweite Videoausschnitt zeigt die plan an Stempel und Isolierplatte anliegende Zelle bei einsetzendem Kraftanstieg. Später kommt es zur ersten Funkenbildung am Minuspol und einem damit verbundenen Spannungsabfall von der Ausgangsspannung. Als Ursache dieser Funkenbildung kann ein äußerer Kurzschluss zwischen der Polplatte am Minuspol und der Pluspotential führenden Capplate gefunden werden. Hier kommt es zu einem Versagen der Verbindung der beiden Komponenten, durch Zerstörung der isolierenden Adapterplatte. Zusätzlich kommt es ab diesem Zeitpunkt auch zu einer Abnahme des bisher kontinuierlichen Kraftanstiegs. Keine Anzeichen deuten darauf hin, dass dieses Verhalten die Folge einer mechanischen Ursache ist. Denkbar ist der Zusammenhang mit dem Spannungsabfall, da der SOC das Volumen des Zellmaterials beeinflusst. Diesen Einfluss gilt es zukünftig noch zu prüfen. Kurz vor Erreichung der Maximalkraft kommt es zum Elektrolytaustritt am Pluspol und einem weiteren internen Kurzschluss mit der Folge, dass die Spannung plötzlich abfällt. Diesen Zustand dokumentiert auch der dritte Videoausschnitt. Daraufhin entgast die Zelle explosionsartig, begleitet von einem Kraftabfall von der Maximalkraft. Dabei wird die Polplatte am Pluspol vollständig vom Capplate abgesprengt, aufgrund des Versagens der Verbindung der beiden Komponenten. Die Ursache des Kraftabfalls kann mit dem explosionsartigem Entgasen in Verbindung gebracht werden. Das Absprengen der Polplatten als alleinige Ursache für den Kraftabfall kann ausgeschlossen werden, da diese der Zelle nicht die benötigte erhöhte Steifigkeit bieten, um diesen Kraftabfall zu ermöglichen. Ebenso kann der Verlust des inneren Drucks der Zelle durch Bildung eines Lecks, als alleinige Ursache für den Kraftabfall ausgeschlossen werden. Den inneren Druck, der für einen solchen Kraftabfall benötigt wird, hätte das Vent bereits vorzeitig abgelassen. Es muss somit von einer Kombination der besprochenen Einflussfaktoren als Ursache des Kraftabfalls ausgegangen werden. Weiterhin tritt Elektrolyt aus der Zelle. Der vierte Videoausschnitt zeigt diesen Zustand.

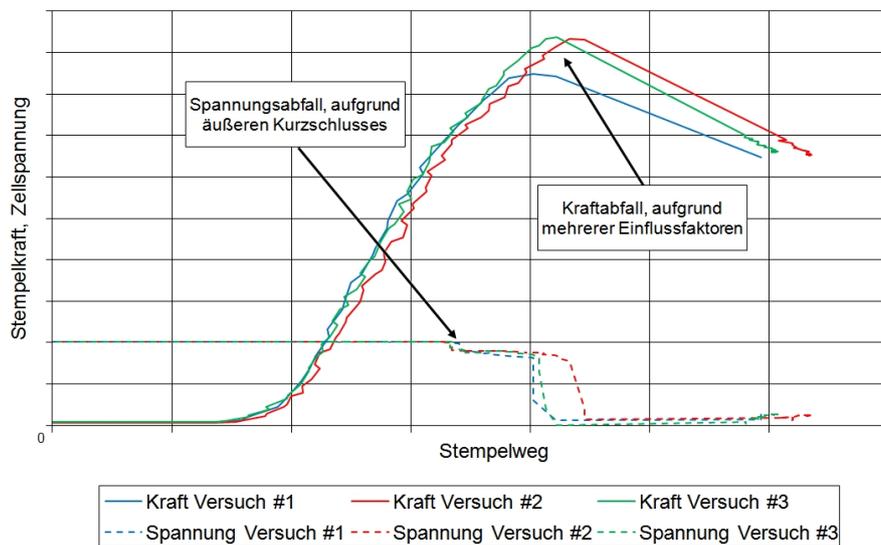


Abbildung 5.5: Verläufe der Stempelkraft und der Zellspannung über dem Stempelweg bei den Stauchversuchen in y-Richtung

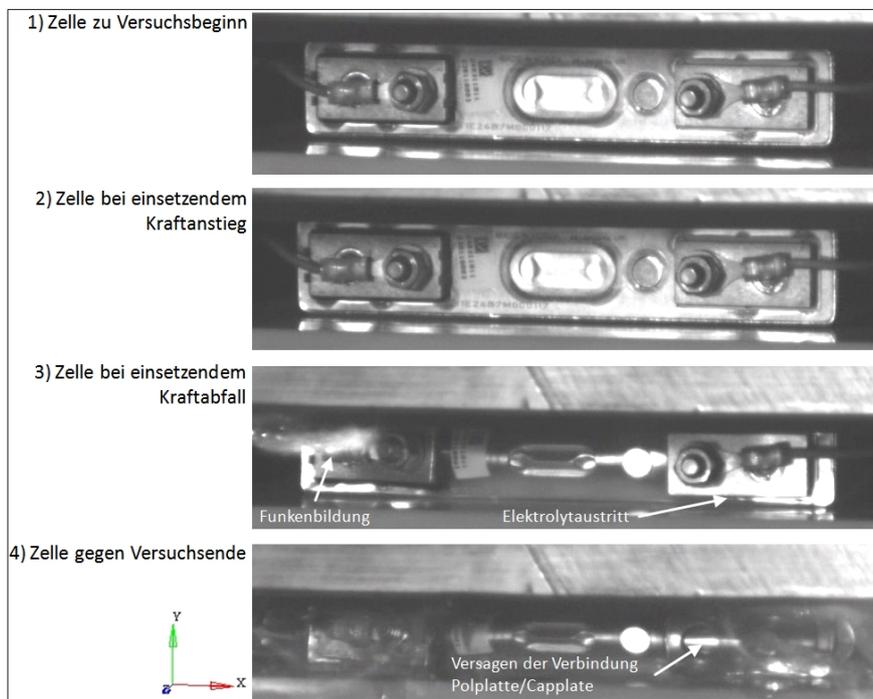


Abbildung 5.6: Deformationsverhalten der Zelle beim Stauchversuch #2 in y-Richtung

Auswertung der Stauchversuche in z-Richtung

Zur Auswertung der Stauchversuche in z-Richtung sind die Verläufe von Kraft und Spannung über den Weg in Abbildung 5.7 zu finden, während die Ausschnitte aus dem Highspeedvideo an markanten Punkten in Abbildung 5.8 ersichtlich sind. Beim Versuch #7 war das Wegmesssystem nicht aktiv, weshalb der Versuch unterbrochen werden musste, um dieses wieder zu aktivieren. Da das erhaltene Ergebnis nicht verwertbar ist, muss dieser Versuch außer Acht gelassen werden.

Der erste Videoausschnitt zeigt wieder die undeformierte Zelle zu Simulationsbeginn. Mit einsetzendem Vorschub beginnt die Kraft steil und kontinuierlich anzusteigen, bis sie ihren Höhepunkt erreicht. Der zweite Videoausschnitt dokumentiert die nahezu unverformte Zelle zu diesem Zeitpunkt. Daraufhin kommt es zum Knicken der Hülle und einem stetigen Ausbiegen derselben, bei fallendem Kraftniveau. Die Zelle in Versuch #9 weist dabei ein geringeres Kraftniveau auf, da sich diese infolge der Belastung auch zur Seite neigt. Später kommt es zum ersten Spannungsabfall unter die Ausgangsspannung, wobei keine Anzeichen für einen externen Kurzschluss zu finden sind und somit von einem internen ausgegangen werden muss, was durch den dritten Videoausschnitt dokumentiert wird. Folglich setzt eine starke Rauchentwicklung links und rechts an den beiden Seiten der Zelle und durch das Vent ein, zu sehen im vierten Videoausschnitt.

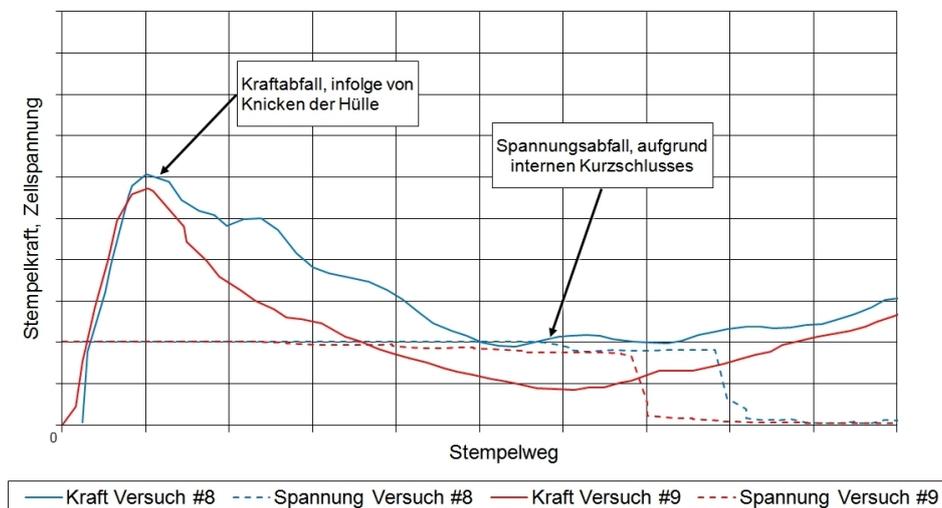


Abbildung 5.7: Verläufe der Stempelkraft und der Zellspannung über dem Stempelweg bei den Stauchversuchen in z-Richtung

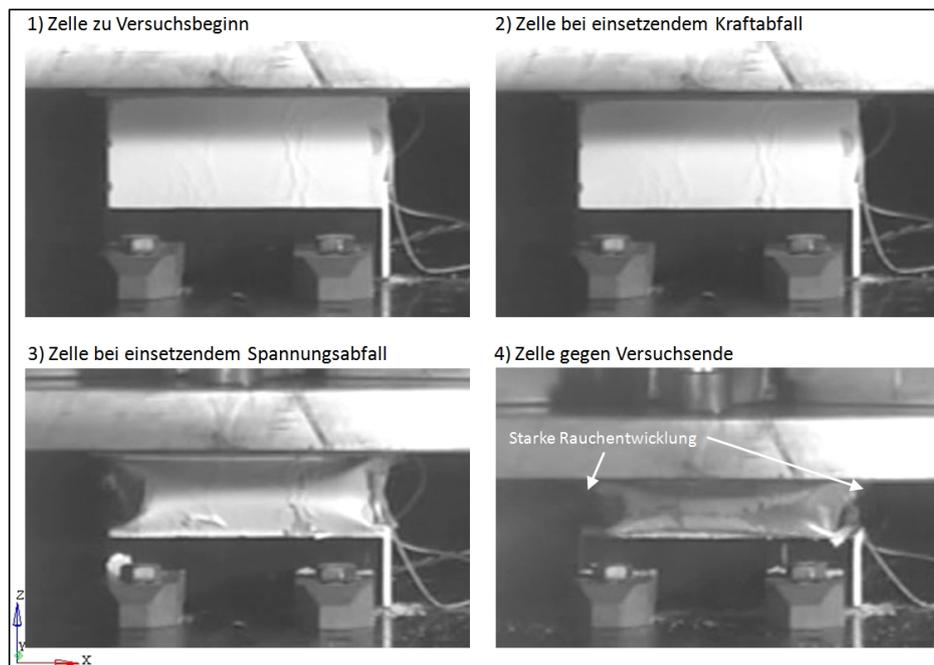


Abbildung 5.8: Deformationsverhalten der Zelle beim Stauchversuch #8 in z-Richtung

5.3 Aufbau des Zellmodells

Der Aufbau des Zellmodells gibt einen Überblick über die Vorgehensweise zur Erstellung des FE-Modells der Batteriezelle, ausgehend von den zur Verfügung gestellten Daten. Als *ersten Schritt* gilt es aus der Konstruktionsgeometrie eine geeignete Berechnungsgeometrie zu gewinnen. Diese stellt eine vereinfachte Konstruktionsgeometrie dar, die aber dennoch zur Abbildung aller wesentlichen Effekte der Zelle genügt. Abbildung 5.9 zeigt die erhaltene Berechnungsgeometrie. Dazu werden die zur Verfügung gestellten CAD Daten der Zelle, mittels des Schnittstellenprotokolls IGES, dem Preprozessor zur weiteren Verarbeitung übergeben. Die Vereinfachungen betreffen unter anderem die Adapterplatten die für die Anbindung der Polplatten an das Capplate sorgen. Der mechanische Einfluss dieser ist aufgrund ihrer geringen Größe gegenüber den Polplatten gering und werden daher unter den Polplatten subsumiert. Konstruktiv gibt es nun keinen Unterschied mehr zwischen Plus -und Minuspol, womit die Zelle um die yz-Ebene symmetrisch aufgebaut ist. Anstelle der Verbindung mittels der Adapterplatte wird ein geeigneter Verbindungstyp vorgesehen, der noch ausführlich im Unterabschnitt 5.4.4 behandelt wird. Die Vereinfachungen treffen auch den Pol selbst, dessen kreis-

förmiger Querschnitt zur einfacheren Generierung des Elementnetzes durch einen quadratischen ersetzt wird. Dies betrifft auch die Geometrie der Öffnung im Capplate. Das darin befindliche Vent, das aus einem zum Capplate verhältnismäßig dünnen Material besteht, wird, aufgrund seiner untergeordneten Rolle hinsichtlich des mechanischen Einflusses auf die Zelle, vernachlässigt. Da die CAD Daten keine Informationen über das Zellinnenleben bereitstellen, wird mit Hilfe des Preprozessors ein Quader im Inneren konstruiert, um zumindest die Geometrie des Zellmaterials berücksichtigen zu können.

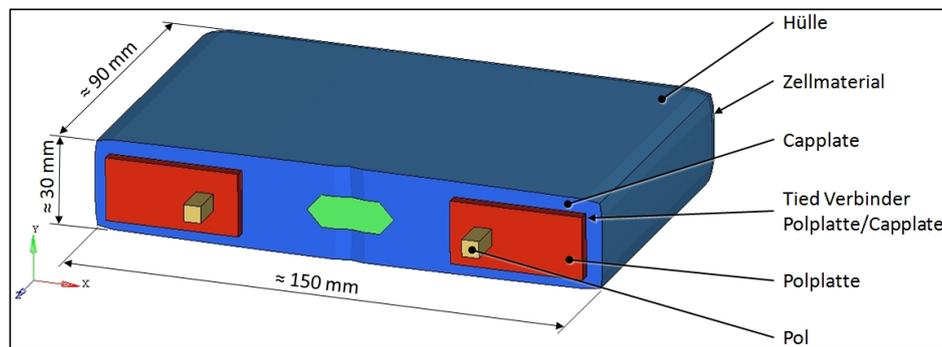


Abbildung 5.9: Berechnungsgeometrie der Batteriezelle

Der *zweite Schritt* umfasst die Generierung des Elementnetzes, wobei das Ergebnis in Abbildung 5.10 ersichtlich ist. Die Literatur gibt dazu eine einfache Regel, wonach Stahlbaustrukturen oder Wellensysteme als stabartige Elemente, dünnwandige Bauteile als Shellelemente und dickwandige Bauteile als Solidelemente aufzubauen sind. Als Anhaltspunkt für die Elementteilung ist das Netz dort engmaschig zu wählen, wo Spannungskonzentrationsstellen auftreten [Klein 2010, S. 307 ff.]. Des Weiteren wird empfohlen Dreieckselemente nur dort wo nötig zu verwenden, da Viereckelemente eine bessere Ergebnisqualität liefern [Meywerk 2007, S. 124]. Die Generierung des Elementnetzes erfolgt nach diesen Regeln, wobei hinsichtlich der Elementteilung vorerst eine gleichmäßige Verteilung verwendet wird, da über Spannungskonzentrationsstellen noch keine Aussage gemacht werden kann. Als kleinste Elementkantenlänge wird von der in der Fahrzeugcrashsimulation üblichen 5 mm ausgegangen. Das schichtweise aufgebaute Zellmaterial wird, in Anlehnung an die Literatur, als quasi Kontinuum angenähert, weshalb zur Modellierung des Zellmaterials Solidelemente verwendet werden [Sahraei u.a. 2010, S. 6]. Die Elementqualität, also die Abweichung vom quadratischen Element, wird mit Hilfe des Preprozessors überprüft.

Abschließend als *dritter Schritt* ist das Modell noch um sämtliche Werkstoffkennwerte und Randbedingungen zu erweitern, um das vollständige rechen-

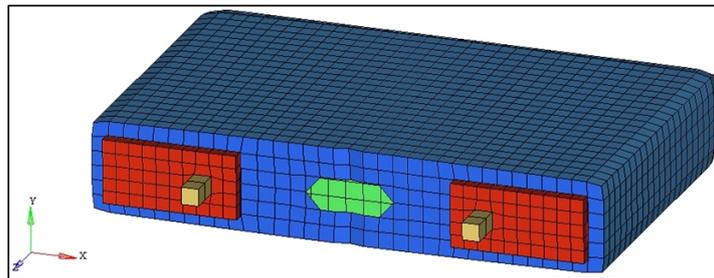


Abbildung 5.10: Elementnetz der Batteriezelle

fähige FE-Modell der Batteriezelle zu erhalten. Die Erstellung der Materialkarten werden zu einem späteren Zeitpunkt in Kapitel 7 behandelt. Zu den Kontaktdefinitionen ist zu bemerken, dass die Kontaktstärke groß genug zu wählen ist, um ein Versagen des Kontaktalgorithmus bei dynamischen Belastungen zu verhindern. Als Anhaltspunkt wird von der in der Fahrzeug-crashsimulation verwendeten Mindestkontaktstärke von 1 mm ausgegangen. Da die Kontaktalgorithmen zwischen Komponenten aus Shellelementen stabiler arbeiten, werden sämtliche Komponenten aus Solidelementen mit einer sogenannten Nullschale überzogen. Diese entspricht einer aus Shellelementen bestehenden dünnen Haut.

Tabelle 11.1 auf Seite 118 im Anhang fasst die im FE-Modell der Batteriezelle verwendeten Komponenten zusammen. Die Tabelle zeigt den Namen der Komponenten, sowie das ihnen zugewiesene Material. Insgesamt besteht das Modell aus 5.176 Shellelementen und aus 2.563 Solidelementen.

5.4 Modellierung im Detail

Das Ergebnis des vorangegangenen Abschnitts besteht in einem rechenfähigen FE-Modell, auf Basis der vorhandenen CAD und Materialdaten. Das Zellmaterial wird bisher nur als Geometrie berücksichtigt, besitzt daher noch keine mechanischen Eigenschaften und auch die Erkenntnisse aus der Versuchsserie sind noch ungenutzt. Daraus folgt, dass das Modell noch nicht sämtliche, in den Versuchen ermittelte, mechanische Eigenschaften der Zelle abbilden kann. Ziel dieses Abschnitts ist es nun, diese Eigenschaften auf das FE-Modell zu übertragen. Dazu werden als Erstes die Einflussfaktoren auf das Verhalten der Zelle ermittelt. In weiterer Folge werden jene Komponenten im Detail betrachtet, denen ein wesentlicher Einfluss nachgewiesen werden kann.

5.4.1 Simulation der Stauchversuche zur Klärung der Einflussfaktoren auf das Zellverhalten

Zur Klärung der Einflussfaktoren auf das Verhalten der Zelle, werden die Stauchversuche simuliert. Die Simulation erfolgt am FE-Modell aus Abschnitt 5.3, also ohne Zellmaterial. Die Simulationsmodelle entsprechen den Versuchsaufbauten der Realversuche. Abbildung 5.11 zeigt das Simulationsmodell des Stauchversuchs in y-Richtung, während jene für die x- und z-Richtung analog aufgebaut sind.

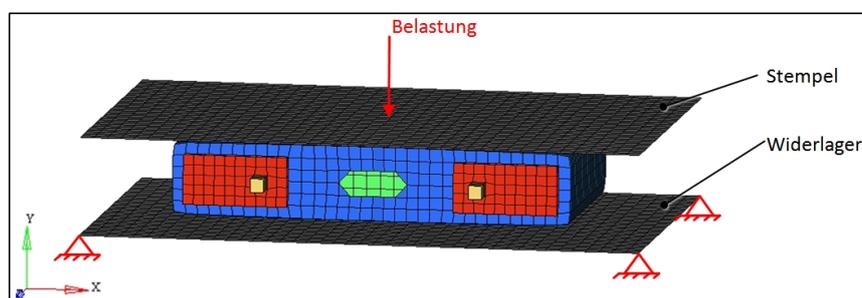


Abbildung 5.11: Simulationsmodell des Stauchversuchs in y-Richtung

Zur Klärung der Einflussfaktoren auf das Verhalten der Zelle werden die Simulationsergebnisse der Stauchversuche mit jenen Ergebnissen der Realversuche überlagert und in Abbildung 5.12 dargestellt. Der Vergleich der Ergebnisse in y-Richtung zeigt, dass der Kraftverlauf in der Simulation um Größenordnungen unter dem der Realversuche liegt. Hülle und Capplate können nicht den erforderlichen Widerstand zur Erreichung des Kraftniveaus der Realversuche leisten, woraus folgt, dass das Zellmaterial den Haupteinflussfaktor auf den Kraftverlauf in y-Richtung darstellt. Dies ist durchaus nachvollziehbar, denn im Zuge der Stauchversuche in y-Richtung wird das Zellmaterial, infolge seiner Einbausituation, in Richtung der Normalen auf seine Schichtebene belastet. In diese Richtung ist ein hoher Widerstand des Zellmaterials zu erwarten, da die einzelnen Schichten auf Block gehen und zur Kraftübertragung beitragen. Im Gegensatz dazu liegen die Kraftverläufe der Simulation in x- und z-Richtung bereits nahe an jenen der jeweiligen Realversuche. Daraus folgt, dass Hülle und Capplate die Haupteinflussfaktoren auf die Kraftverläufe in x- und z-Richtung darstellen. Diese Kraftverläufe ergeben sich aus dem Ausknickverhalten der beiden Komponenten. Die Stauchversuche in y-Richtung eignen sich somit, um anhand diesen die mechanischen Eigenschaften des Zellmaterials in y-Richtung zu modellieren, während sich die Stauchversuche in x- und z-Richtung eignen, um anhand von diesen das Ausknickverhalten von Hülle und Capplate abzustimmen.

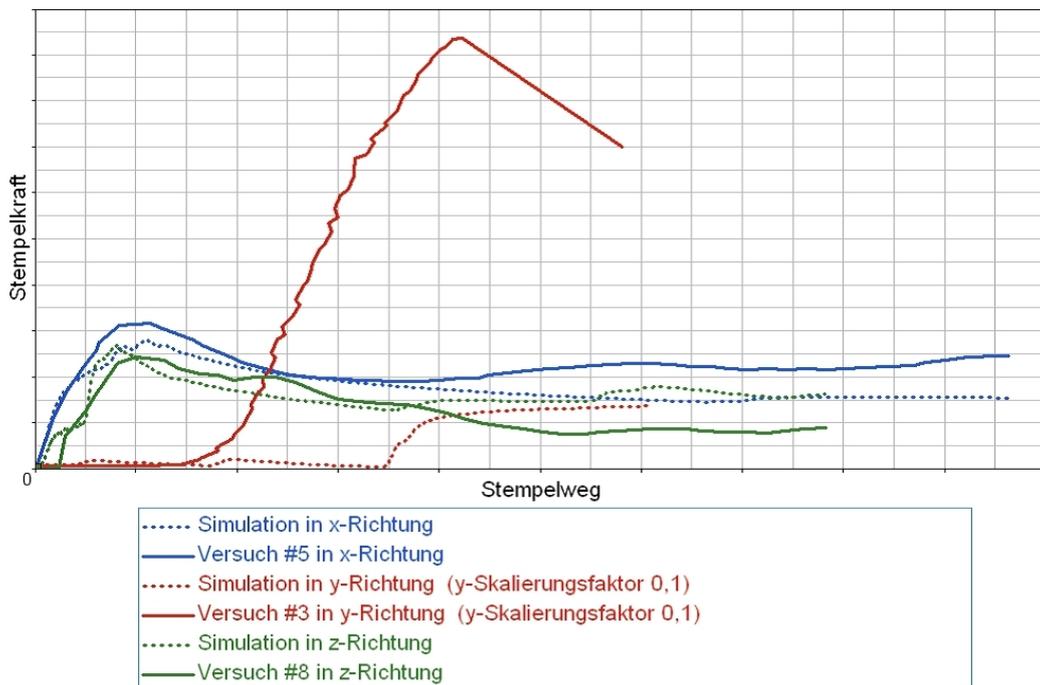


Abbildung 5.12: Simulationsergebnisse der Stauchversuche ohne Zellmaterial im Vergleich mit den jeweiligen Realversuchen

Zur Klärung des Einflusses der Polplatten wird die Simulation in y-Richtung zusätzlich ohne diese durchgeführt. Dies führt zu einem geringeren Kraftniveau im Vergleich zur Simulation mit Polplatten, allerdings nicht in jenem Umfang, dass ihr Absprengen alleiniger Grund für den Kraftabfall ist, der im Zuge der Stauchversuche in y-Richtung festgestellt wurde. Des Weiteren wird die Einspannung der Zelle in den Stauchversuchen in x- und z-Richtung, die für einen sicheren Stand derselben sorgt, in der jeweiligen Simulation vernachlässigt. Diese Annahme ist im Fall der Simulation in x-Richtung zulässig, da kein wesentlicher Einfluss der Einspannung, aufgrund ihrer geringen Höhe zur Gesamthöhe der Zelle, auftritt. Im Fall der Simulation in z-Richtung ist der Einfluss der Einspannung jedoch wesentlich, aufgrund ihrer größeren Höhe im Verhältnis zur Zellhöhe.

5.4.2 Das Zellmaterial

Im Zuge des vorangegangenen Unterabschnitts 5.4.1 wurde gezeigt, dass das Zellmaterial den Haupteinflussfaktor auf das Kraftniveau in den Stauchversuchen in y-Richtung darstellt, während sein Einfluss auf das Kraftniveau in

den übrigen Richtungen gering ist. Ziel ist es somit, ein Materialmodell zur Modellierung des Zellmaterials zu finden, das die Abbildung dieses Verhaltens ermöglicht. Des Weiteren ist das gefundene Materialmodell anhand der Versuche in y-Richtung zu parametrisieren.

Das Materialmodell #41

Das *Materialmodell #41* (siehe auch PAM-Crash Hinweis-Handbuch S. 223) ist ein Materialmodell für Solidelemente und ist in erster Linie zur Beschreibung von Seitenaufprallschutz Barrieren entwickelt worden. Es besitzt drei orthotrope Richtungen, womit sein Verhalten mit der Bienenwabenstruktur in Abbildung 5.13 verglichen werden kann. In jede der drei Richtungen kann das einachsige Zug/Druck Verhalten anhand der Parameter in Abbildung 5.13 beschrieben werden, während die drei Schubkomponenten ähnlich zu parametrisieren sind. Zusätzlich ermöglicht das Materialmodell die Berücksichtigung von Schäden und Dehnrateneffekte [ESI-Group 2009, S. 223]. Das Materialmodell #41 erlaubt somit die Abbildung eines anisotropen Verhaltens für Solidelemente und besitzt ein gutes Verhältnis zwischen Aufwand zur Parametrisierung, aufgrund der wenigen Parameter, und Ertrag. Es bietet daher eine gute Grundlage zur Modellierung des Zellmaterials.

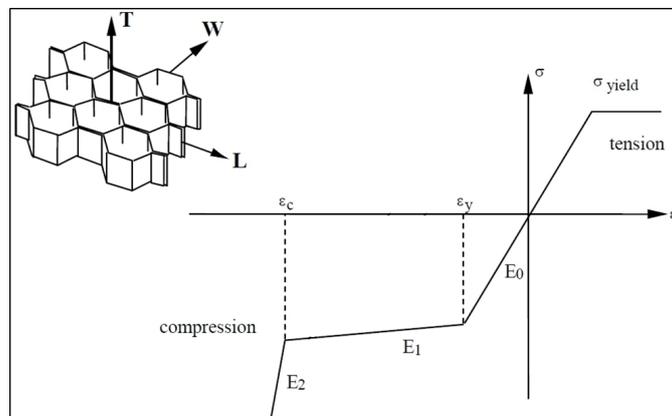


Abbildung 5.13: Parameter des Materialmodells #41 zur Beschreibung des einachsigen Zug/Druck Verhaltens [ESI-Group 2009, S. 223]

Parametrisierung des Materialmodells

Es sei bemerkt, dass sich die T-Richtung des Materialmodells mit der y-Richtung in der Versuchsanordnung decken soll, womit die T-Richtung des

Materialmodells anhand der Stauchversuche in y-Richtung parametrisiert wird. Der Widerstand in den übrigen Richtungen soll gering sein. Die Parametrisierung dieser Richtungen kann nach der Kalibrierungsstrategie im PAM-Crash Hinweis-Handbuch S. 226 erfolgen. Die Parametrisierung der T-Richtung erfolgt durch Überlagerung der Kurve, Stempelkraft über Stempelweg, aus der Simulation des Stauchversuchs in y-Richtung, mit jenen Kurven aus den Realversuchen. Die Parameter des Materialmodells werden nun so lange variiert, bis die Kurven übereinstimmen. Insgesamt gibt es zwei Möglichkeiten zur Wahl der Parameter:

1. Parametrisierung über die Parameter des Materialmodells #41: Von besonderer Bedeutung sind hier der Parameter ε_c , der den Beginn des Kraftanstiegs steuert, und der Parameter E_2 , der dessen Steigung bestimmt. Die Parameter E_0 und E_1 sind lediglich so zu wählen, dass der Einfluss des Zellmaterials in ihrem Bereich gering ist. ε_y bestimmt den Übergang vom elastischen in den plastischen Bereich. Problematisch ist die Instabilität welche das Materialmodell im Bereich von E_2 aufweist und sich in Form einer plötzlichen Deformation des Zellmaterials äußert. Diese ist von der Parameterkombination abhängig. Verwendung der Integrationsregel 1, in PAM-Crash *NINT*, und Aktivierung der Sanduhreffekt Prävention 1, in PAM-Crash *ISHG*, verbessern das Ergebnis, verhindern die Instabilität aber nicht und erhöhen die Rechenzeit. Schlussendlich konnte eine Parameterkombination gefunden werden, damit die beschriebene Instabilität im Interessensbereich der Simulation nicht auftritt.
2. Parametrisierung über die Parameter des Materialmodells #41 und über das Kontaktmodell #10: Mit Hilfe des zusätzlichen Kontakts kann der Bereich von E_2 und somit die Instabilität umgangen werden. Das *Kontaktmodell #10* (siehe auch PAM-Crash Hinweis-Handbuch S. 559) ist ein interner Kontakt für Solidelemente der numerische Probleme verhindert, die durch stark komprimierte Elemente entstehen. Dazu blockiert er die weitere Komprimierung der betroffenen Elemente und verhindert so den Abfall des Zeitschritts [ESI-Group 2009, S. 559]. Diese Blockierung erfolgt indem der Verformung eine Kraft entgegengesetzt wird, was ebenfalls für einen Kraftanstieg sorgt. Bemerkbar wird dies bei der Kontrolle der Energiebilanz, indem die externe Arbeit nicht mehr in interne Energie, sondern in eine Kontaktarbeit umgewandelt wird. Somit kann der Kraftanstieg, anstelle über die Materialkarte, auch über den Kontakt geregelt werden. Nachteilig ist allerdings die Tatsache, dass sich die Kontaktsteifigkeit und in weiterer Folge die Steigung

des Kraftanstiegs unter anderem aus dem initialen Zeitschritt berechnet. Dieser ist abhängig von der kleinsten Elementkantenlänge im Modell und der Skalierung der Steifigkeiten, weshalb diese Parameter Einfluss auf die Steigung des Kraftanstiegs haben.

Der Einfluss der kleinsten Elementkantenlänge des Modells und der Einfluss der Skalierung der Steifigkeiten auf den Kraftanstieg sind nicht wünschenswert, weshalb die Parametrisierung des Zellmaterials alleine über die Parameter des Materialmodells gelöst wird. Das Ergebnis wird anhand der Überlagerung der Kraft/Weg Kurven in Abbildung 5.14 dargestellt. Für die Auslegung des FE-Modells gilt das Ziel, das Verhalten bis zum Auftreten des ersten Schadens, in diesem Fall der Spannungsabfall, gut abzubilden. Dies ist ausreichend, da das FE-Modell zur Untersuchung dienen soll, ob das Batteriemodul eine Belastung schadlos übersteht. Insbesondere ist hier der Bereich des Kraftanstiegs wichtig, da in diesem die Energieaufnahme der Zelle, in Form von innerer Energie durch Deformation, am größten ist. Die Abbildbarkeit dieses Bereichs über das Zellmaterial ist gegeben. Im Realversuch kommt es später zur Abnahme des kontinuierlichen Kraftanstiegs, der in der Simulation ausbleibt. Da der Grund hierfür nicht ausschließlich mechanischer Natur ist und noch zu überprüfen ist, wird dieses Verhalten in der Simulation noch nicht berücksichtigt. Da die Zelle dieses Verhalten aber ohnehin erst nach Auftreten des ersten Schadens zeigt, ist die Abbildung dieses Effekts von geringerem Interesse.

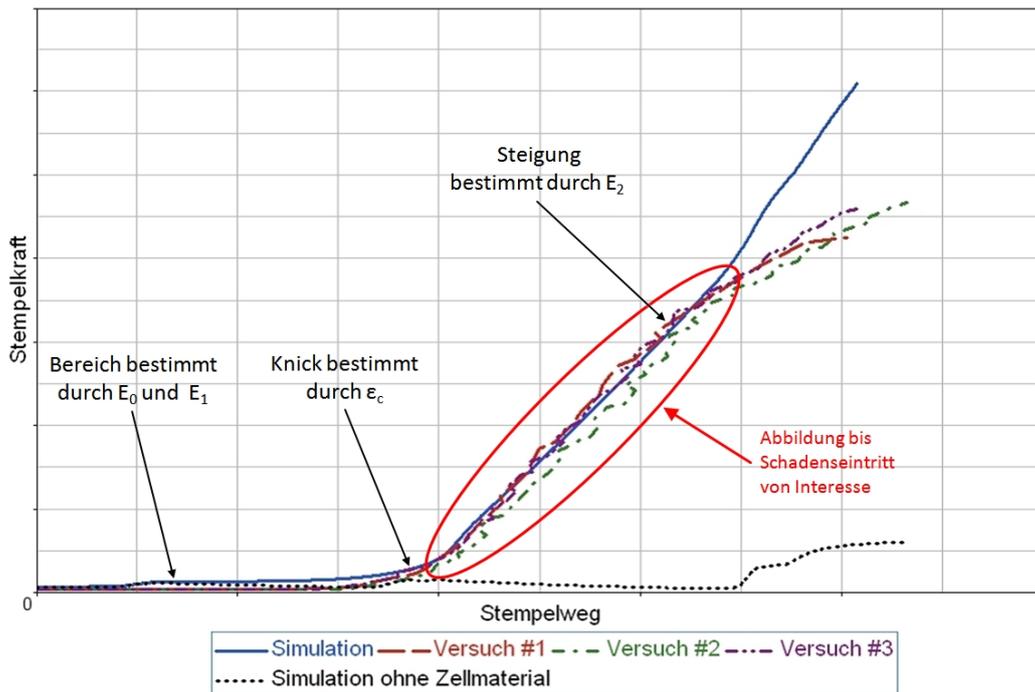


Abbildung 5.14: Simulationsergebnis des Stauchversuchs in y-Richtung im Vergleich mit den jeweiligen Realversuchen nach erfolgter Parametrisierung des Zellmaterials

5.4.3 Hülle und Capplate

Im Zuge des Unterabschnitts 5.4.1 wurde gezeigt, dass sich die Stauchversuche in x- und z-Richtung eignen, um anhand diesen das Ausknickverhalten von Hülle und Capplate abzustimmen. Ziel ist es somit, das in der Simulation der Stauchversuche simulierte Ausknickverhalten, auf Übereinstimmung mit dem Ausknickverhalten der Realversuche zu überprüfen und gegebenenfalls darauf abzustimmen. An dieser Stelle sei erwähnt, dass die Daten aus den Stauchversuchen in z-Richtung hier keinen Eingang finden, da diese Versuche erst zu einem Zeitpunkt stattfanden, an dem am Modell der Zelle keine Änderungen mehr vorgenommen werden konnten. Die Stauchversuche in z-Richtung dienen aber der Validierung des FE-Modells der Batteriezelle.

Der Vergleich der Simulation der Stauchversuche mit den Realversuchen zeigt, dass das simulierte Ausknickverhalten nicht jenem symmetrischen Ausknickverhalten der Realversuche entspricht, was die Abstimmung von Hülle und Capplate notwendig macht. Dazu folgt eine Untersuchung weiterer Einflussfaktoren auf das Ausknickverhalten mit dem Ergebnis, dass die folgenden

Parameter von Hülle und Capplate einen wesentlichen Einfluss besitzen und zu berücksichtigen sind:

- Bauchung der Hülle: Das Zellmaterial führt zu einer Bauchung der Hülle aus der xz-Ebene. Da diese in den CAD Daten auf der das FE-Modell aufbaut unberücksichtigt ist, wird das Elementnetz der Hülle nachträglich um diese Bauchung erweitert.
- Geometrie der Öffnung im Capplate: Die Geometrie der Öffnung im Capplate für das Vent hat seine ursprüngliche Beschaffenheit durch die Generierung des Elementnetzes verloren. Da auch diese das Ausknickverhalten beeinflusst, sind die betreffenden Knoten der Öffnung so zu wählen, um das Ausbiegen an dieser Stelle zu begünstigen.

Das Ergebnis der Abstimmung von Hülle und Capplate wird in Abbildung 5.16 dargestellt, in Form einer Gegenüberstellung des in der Simulation der Stauchversuche simulierten Ausknickverhaltens, mit jenen der jeweiligen Realversuche. In beiden Fällen zeigt die Simulation ein Ausknickverhalten analog zu den Realversuchen. Zusätzlich ist auch der Kraftverlauf der Simulation des Stauchversuchs in x-Richtung auf Übereinstimmung mit den jeweiligen Realversuchen zu überprüfen, da dieser durch das Ausknickverhalten bedingt ist. Der Vergleich zeigt, dass der Kraftverlauf in der Simulation noch immer unter dem der Realversuche liegt, was den Schluss zulässt, dass dies aus dem fehlenden Beitrag des Innenkörpers der Zelle resultiert. Da über den Innenkörper keine CAD Daten vorliegen, wird dessen Beitrag über die Hülle, durch Erhöhung der Hüllendicke um 10 %, abgebildet, bis Informationen zum Innenkörper vorliegen. Des Weiteren ist das Auftreten der Maximalkraft im Kraftverlauf der Simulation des Stauchversuchs in x-Richtung bedingt abhängig von der Kantenverrundung an der Hülle. Da ihre ursprüngliche Beschaffenheit durch die Generierung des Elementnetzes verloren ist, werden die betreffenden Knoten der Kantenverrundung so abgestimmt, dass das Auftreten der Maximalkraft in der Simulation mit dem der Realversuche übereinstimmt. Abbildung 5.15 zeigt das Ergebnis, in Form einer Gegenüberstellung des Kraftverlaufs der Simulation des Stauchversuchs in x-Richtung mit jenen der Realversuche. Bezüglich der Auslegung des FE-Modells gilt wieder das Ziel, das Verhalten bis zum Auftreten des ersten Schadens, in diesem Fall das Knicken der Hülle, abzubilden. Dies gelingt über Hülle und Capplate bis über den ersten Schadenseintritt hinaus. Das Plateau im Kraftanstieg in der Simulation ist durch die unterschiedlichen Steifigkeiten von Hülle und Capplate bedingt. Während im ersten Teil des Kraftanstiegs das Capplate den Haupteinflussfaktor darstellt, ist es im zweiten Teil die Hülle.

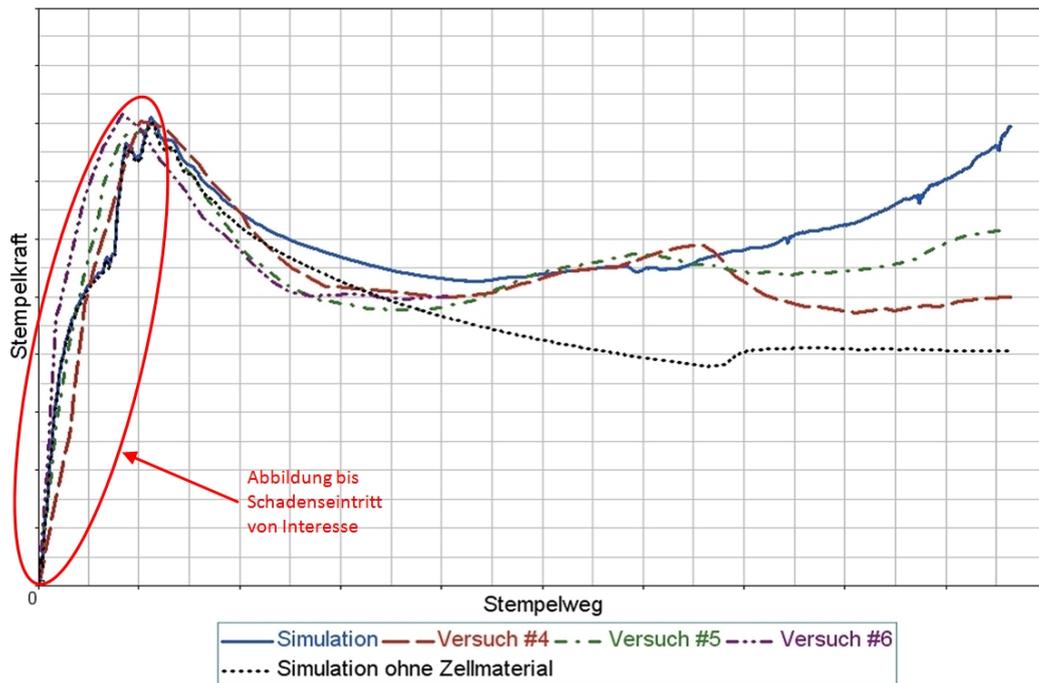


Abbildung 5.15: Simulationsergebnis des Stauchversuchs in x-Richtung im Vergleich mit den jeweiligen Realversuchen nach erfolgter Abstimmung von Hülle und Capplate

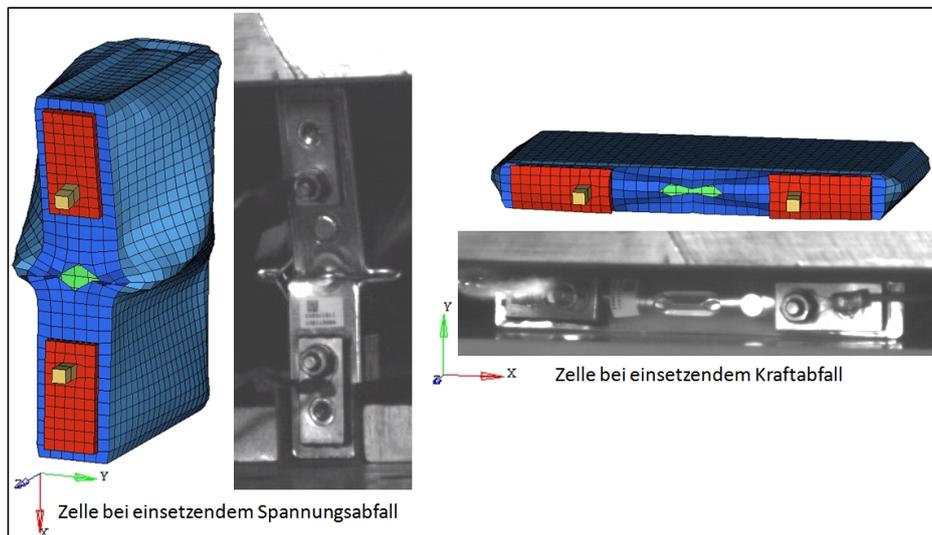


Abbildung 5.16: Ausknickverhalten der Simulation der Stauchversuche in x- und y-Richtung im Vergleich mit den jeweiligen Realversuchen nach erfolgter Abstimmung von Hülle und Capplate

5.4.4 Die Verbindung Polplatte/Capplate

Im Zuge der Stauchversuche in y-Richtung versagt die Verbindung zwischen Polplatte und Capplate. Um diesen Schaden anhand des FE-Modells feststellen zu können, muss die Clinchverbindung Polplatte/Capplate geeignet modelliert werden. Gesucht ist somit eine Verbindung, die das Auslesen der Verbindungskräfte ermöglicht und vorzugsweise allgemein anwendbar ist.

Auswahl geeigneter Verbindungen

Nach Auswahl der in PAM-Crash zur Verfügung gestellten Verbindungen anhand der zuvor genannten Kriterien, stehen zwei Typen von Verbindungen zur Verfügung:

1. Verbindung mittels *Tied* (siehe auch PAM-Crash Hinweis-Handbuch S. 539): Diese Kontaktart bildet eine Box um ein definiertes Segment und verbindet alle Knoten innerhalb der Box mit dem definierten Element [ESI-Group 2009, S. 539].
2. Verbindung mittels *PLink* (siehe auch PAM-Crash Hinweis-Handbuch S. 530): Dieser Kontakttyp stellt eine vom Elementnetz unabhängige Punktverbindung, ähnlich einem Schweißpunkt, dar [ESI-Group 2009, S. 530].

Der Tied Verbinder ist einfach zu parametrisieren und stellt eine Verbindung für allgemeine Zwecke dar. Des Weiteren wird das Auslesen der Verbindungskräfte ermöglicht und wird daher zur Modellierung der Verbindung zwischen Polplatte und Capplate eingesetzt.

5.5 Validierung des Zellmodells

Die Stauchversuche in z-Richtung wurden erst zu einem späteren Zeitpunkt als die übrigen Versuche durchgeführt, womit dessen Ergebnisse nicht mehr in die Erstellung des FE-Modells der Batteriezelle einfließen konnten. Daher bietet sich die Möglichkeit an, das FE-Modell anhand der Stauchversuche in z-Richtung zu validieren. Dazu wird der Versuch am aktuellen Stand des FE-Modells simuliert. Das Simulationsmodell entspricht dem Versuchsaufbau des Realversuchs, welches analog dem Simulationsmodell für die y-Richtung in Abbildung 5.11 aufgebaut ist.

Das Ergebnis der Validierung wird einerseits in Abbildung 5.18 dargestellt, in Form einer Gegenüberstellung des in der Simulation des Stauchversuchs in z-Richtung simulierten Ausknickverhaltens, mit jenem der jeweiligen Realversuche. Der Vergleich zeigt ein analoges Ausknickverhalten zwischen dem Realversuch und der Simulation. Andererseits zeigt Abbildung 5.17 die Gegenüberstellung des Kraftverlaufs der Simulation des Stauchversuchs in z-Richtung mit jenen der Realversuche. Hinsichtlich der Auslegung des FE-Modells gilt wieder die Vorgabe, dass das Verhalten bis zum Auftreten des ersten Schadens, in diesem Fall das Knicken der Hülle, abzubilden ist. Der erste Kraftanstieg kann bereits abgebildet werden, allerdings ist die erhöhte Maximalkraft in der Simulation gegenüber den Versuchen problematisch. Eine Abstimmung des Kraftverlaufs wieder über Hülle und Capplate stößt hier an seine Grenzen, da das Kraftniveau in x-Richtung zu heben war, hier aber zu senken ist. Dies unterstreicht die Dringlichkeit, die CAD Daten des Innenkörpers der Zelle zu beschaffen, um die Erreichung der entgegengesetzten Ziele zusätzlich über diesen zu bewirken. Insgesamt zeigt die Validierung ein ausreichendes Ergebnis, um mit dem aktuellen Modell weiter arbeiten zu können. Sie zeigt aber auch, dass zukünftig der Stauchversuch in z-Richtung ebenfalls zur Modellierung heranzuziehen ist.

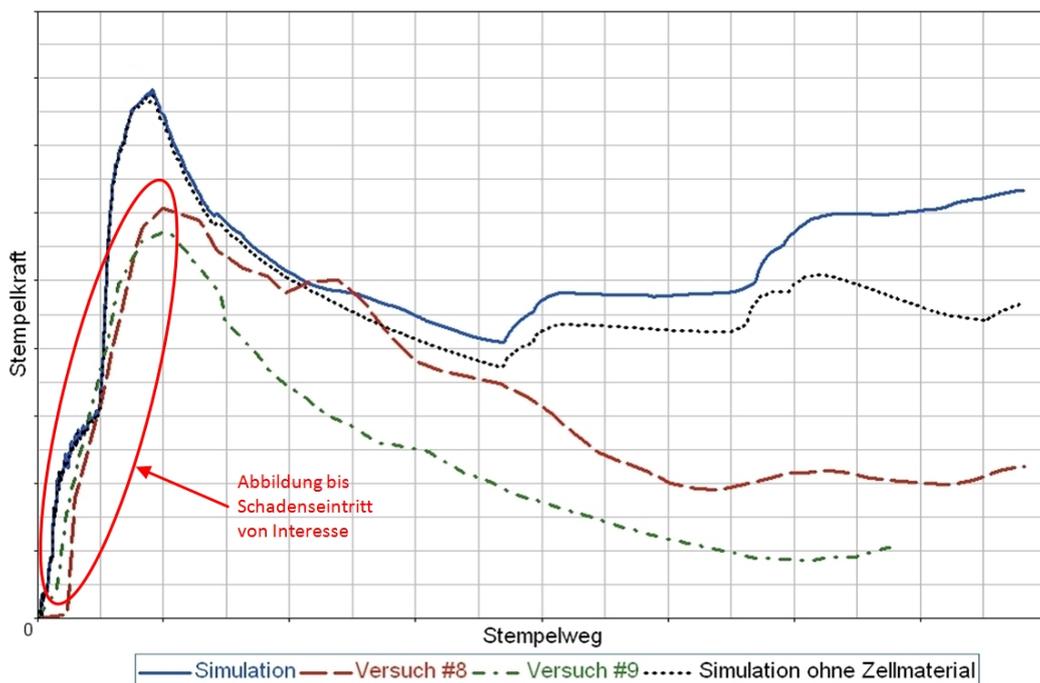


Abbildung 5.17: Simulationsergebnis des Stauchversuchs in z-Richtung im Vergleich mit den jeweiligen Realversuchen zur Validierung

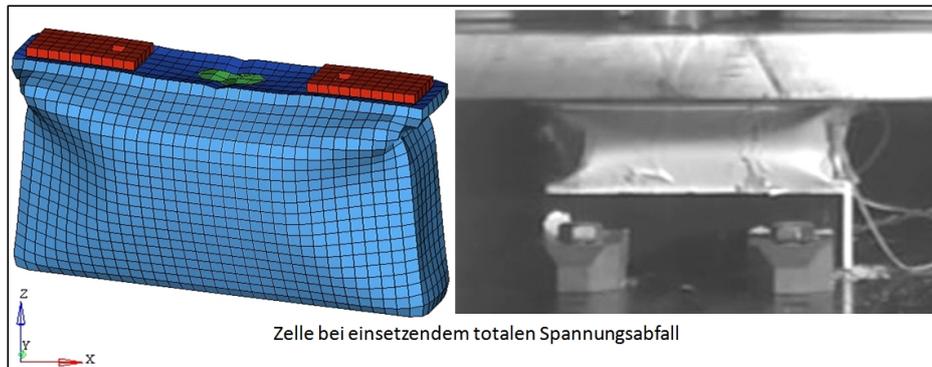


Abbildung 5.18: Ausknickverhalten der Simulation des Stauchversuchs in z-Richtung im Vergleich mit dem jeweiligen Realversuch zur Validierung

Kapitel 6

Aufbau des FE-Modells eines generischen Batteriemoduls

Im vorangegangenen Kapitel wurde die Erstellung der Batteriezelle als FE-Modell behandelt, worauf das folgende Kapitel aufbaut. Ziel ist es, die Modellierung des Batteriemoduls als FE-Modell zu beschreiben. Dazu wird das zu modellierende Modul beschrieben und darauf aufbauend die Modellierung behandelt. Wichtige Schritte der Modellierung werden wieder in einem eigenen Abschnitt detailliert beschrieben. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass es sich hierbei um ein generisches Modell des Batteriemoduls handelt. Es orientiert sich am physikalischen Modul, basiert aber nicht auf dessen CAD Daten, da sich dieses noch in Entwicklung befindet und noch nicht freigegeben ist. Das generische FE-Modell dient dem Zweck, eine Methode zur Modellierung eines Batteriemoduls aufzuzeigen.

6.1 Beschreibung des Batteriemoduls

Innerhalb dieses Abschnitts wird das Batteriemodul vorgestellt und seine Komponenten und deren Funktionen beschrieben. Es baut auf dreizehn Zellen aus Kapitel 5 auf, dessen Berechnungsgeometrie mitsamt ihren Abmessungen und der Benennung der wesentlichen Komponenten in Abbildung 6.1 abgebildet ist. Der Zellstapel, bestehend aus den dreizehn Zellen und den Spannplatten, ist in y-Richtung vorgespannt. Für den nötigen Zusammenhalt und zur Aufrechterhaltung der Vorspannkraft sorgen die *Spannplatten* aus Stahl und die an ihnen befestigten *Spannbänder* aus Stahlblechen. Benachbarte Zellen sind durch *Zellverbinder* aus Kupferblechen in Serie ge-

schaltet. Hülle und Capplate der Zellen sind mit einem Isolierlack überzogen, um sie gegeneinander elektrisch zu isolieren und um einen Kurzschluss durch die Serienschaltung zu verhindern. Ein zweiteiliger *Gaskollektor* aus zwei Stahlblechen, mit Öffnungen an der Zelle zugewandten Seite, verläuft über sämtliche Vents. Falls die Zelle über das Vent im Fall eines abnormalen Betriebszustands entgast, wird das ausströmende Gas kontrolliert über den Gaskollektor weitergeleitet. Um die Dichtheit zwischen Gaskollektor und der Zelle zu gewährleisten, sind an dieser Stelle *Dichtungen* aus Kunststoff verbaut. Diese bedürfen ebenfalls einer Vorspannung, weshalb der Gaskollektor in z-Richtung vorgespannt ist und an den Spannplatten befestigt wird. Der Gaskollektor ist indirekt auch an der Aufrechterhaltung der Vorspannkraft des Zellstapels beteiligt. Da das Capplate steifer als die übrige Hülle ist und sich somit stärker der Vorspannung widersetzt, ist der Zellstapel bestrebt sich um die x-Achse zu biegen. Der Gaskollektor wirkt diesem Bestreben entgegen. Des Weiteren besteht das Modul aus einer *Kühlplatte* aus Aluminium, welche die Aufgabe hat die Zellen zu kühlen. Daneben unterstützt auch sie indirekt die Aufrechterhaltung der Vorspannkraft des Gaskollektors, indem sie die Position der Zellen, zusätzlich zur Reibung zwischen den Zellen und den Spannbandern, sichert und eine Relativbewegung der Zellen zueinander verhindert.

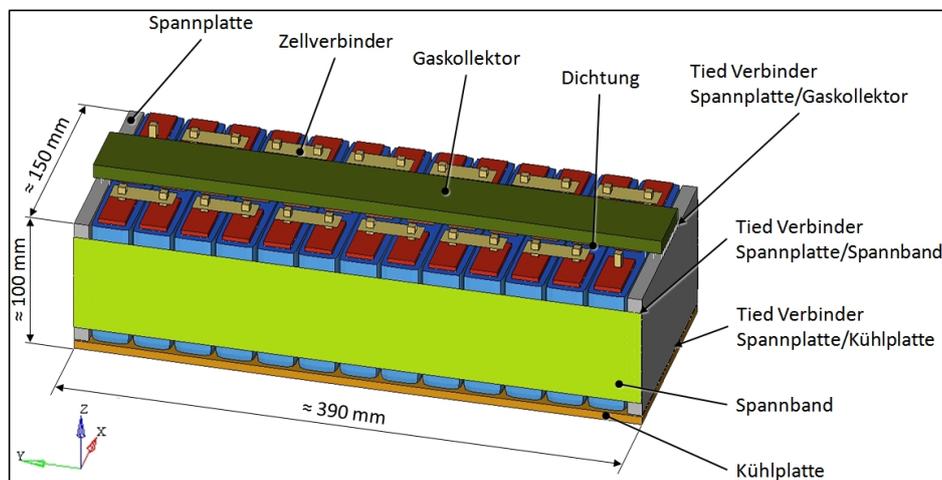


Abbildung 6.1: Berechnungsgeometrie des Batteriemoduls

6.2 Aufbau des Modulmodells

Der Aufbau des Modulmodells beschreibt den Weg, ausgehend von den zur Verfügung gestellten Daten, bis zum fertigen FE-Modell des Batteriemoduls in Kürze. Der *erste Schritt* umfasst wieder die Erstellung der Berechnungsgeometrie. Da keine Konstruktionsgeometrie zur Verfügung steht, weil sich das Modul noch in Entwicklung befindet und nicht freigegeben ist, wird die Konstruktionsgeometrie direkt im Preprozessor erstellt. Das in Kapitel 5 erstellte FE-Modell der Zelle kann direkt übernommen werden, während sich die spezifischen Komponenten des Moduls an Beschreibungen des originalen Moduls orientieren. Das Ergebnis wird in Abbildung 6.1 dargestellt.

Der *zweite Schritt* umfasst die Generierung des Elementnetzes, dessen Ergebnis in Abbildung 6.2 gezeigt wird. Die Generierung des Elementnetzes erfolgt wieder nach den in Abschnitt 5.3 vorgestellten Regeln und orientiert sich auch an den im Zellmodell gewählten Einstellungen, hinsichtlich gleichmäßiger Elementteilung und einer kleinsten Elementkantenlänge von 5 mm. Die Elementqualität wird ebenfalls wieder mit dem Preprozessor überprüft.

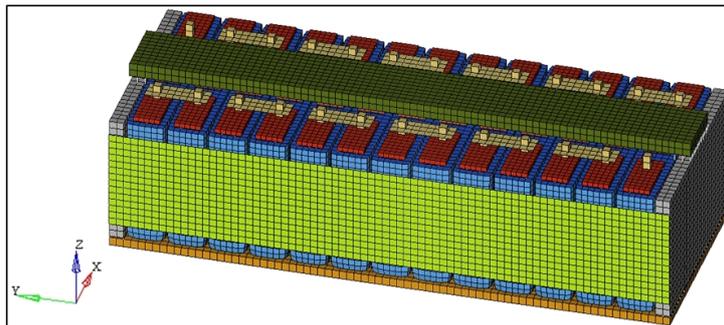


Abbildung 6.2: Elementnetz des Batteriemoduls

Im *dritten Schritt* ist das Modell wieder um sämtliche Werkstoffkennwerte und Randbedingungen zu erweitern. Die Erstellung der Materialkarten wird ausführlich in Kapitel 7 behandelt. Bezüglich der Kontaktdefinition wird wieder, wie auch schon auf Zellebene, von einer Mindestkontaktstärke von 1 mm ausgegangen. Ebenso werden wieder sämtliche Komponenten aus Solidelementen, zur Verbesserung der Kontakteigenschaften, mit einer Nullschale überzogen. Abschließend ist die Verspannung des Moduls zu realisieren, die in Abschnitt 6.3 ausführlich behandelt wird.

Die im FE-Modell des Batteriemoduls verwendeten Komponenten werden in Tabelle 11.1 auf Seite 118 im Anhang zusammengefasst, die wieder den Namen der Komponenten, sowie das ihnen zugewiesene Material listet. Das

Modell besteht insgesamt aus 67.526 Shellelementen und aus 38.157 Solid-elementen.

6.3 Verspannung des Moduls

Als effiziente Methode hat sich die Umsetzung der Verspannung in drei Schritten etabliert. Der erste Schritt umfasst die Vorspannung des Zellstapels, gefolgt von der Vorspannung des Gaskollektors als zweiten Schritt. Abschließend erfolgt die Entspannung des Moduls in einem dritten Schritt. Jeder dieser Schritte wird mittels eigenen Simulationsmodell durchgeführt und innerhalb dieses Abschnitts ausführlich beschrieben. Die Unterteilung in Schritte ist zweckmäßig, da nach jedem Schritt die Qualität der Verspannung und die Auswirkung auf das Moduldesign überprüft werden kann. Ab einer gewissen Prozessreife können die Schritte zusammengefasst werden, beispielsweise indem die Vorspannung von Zellstapel und Gaskollektor gemeinsam durchgeführt wird. Mit PAM-Crash Multi-Stage können sogar mehrere Schritte innerhalb einer Simulation ausgeführt werden, was eine weitere Effizienzsteigerung ermöglicht. Zwischen den einzelnen Schritten, muss das Ergebnis der Vorsimulation der aktuellen Simulation übergeben werden. Dafür sorgt die Funktion *Pick* (siehe dazu PAM-Crash Hinweis-Handbuch S. 96). *Pick* kann Informationen aus einer Vorsimulation, wie Shelldicke, Spannungen und Dehnungen, der aktuellen Simulation zur Verfügung stellen, wenn eine Wiederaufnahmedatei, im PAM-Crash *Restart File*, zur Verfügung gestellt wird. Änderungen an den physikalischen Materialeigenschaften oder an der Anzahl der Integrationspunkte der übergebenen Daten sind nicht erlaubt [ESI-Group 2009, S. 96 f.]. Die Geometrie ist aus dem Postprozessor zu exportieren und dann wieder, zur weiteren Bearbeitung, in den Preprozessor zu importieren.

6.3.1 Vorspannung des Zellstapels

Der erste Schritt umfasst nun die Vorspannung des Zellstapels. Dazu wird dieser zwischen zwei starren Platten eingespannt und einer Belastung unterzogen, bis die vorgegebene Vorspannung erreicht wird. Das Simulationsmodell entspricht Abbildung 6.3. Ziel ist die Belastung in einer Form aufzubringen, damit dieser sonst quasistatische Prozess, in der Simulation innerhalb von Millisekunden ablaufen kann, aber mit dem gleichen Ergebnis. Dies betrifft insbesondere keine Schwingungen ins Modell einzubringen.

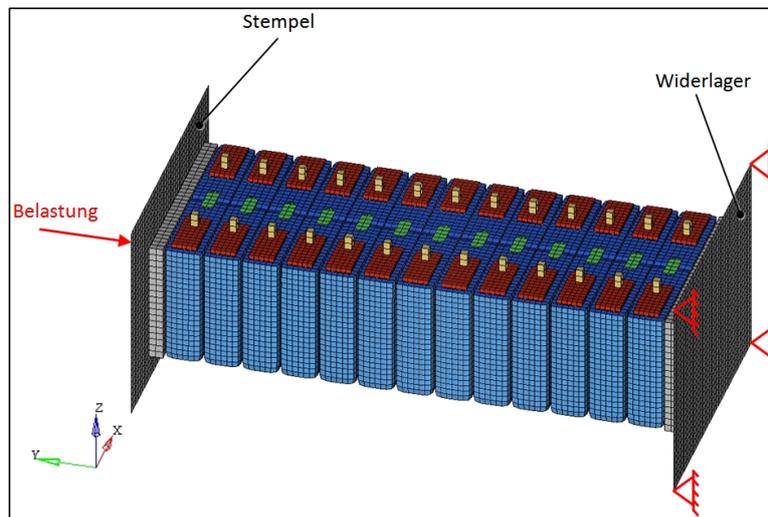


Abbildung 6.3: Simulationsmodell zur Vorspannung des Zellstapels

Nach Auswahl aus der von PAM-Crash zur Verfügung gestellten Alternativen zur Lastaufbringung, erscheinen die folgenden drei Möglichkeiten die erfolgversprechendsten zu sein:

1. Vorgabe der Belastung direkt als Kraft in Form einer Rampenfunktion, in PAM-Crash mittels *Conlo* (siehe dazu PAM-Crash Hinweis-Handbuch S. 660): Diese Möglichkeit ist einfach umzusetzen, da die benötigte Vorspannkraft direkt angegeben werden kann.
2. Vorgabe der Belastung indirekt als Weg in Form einer Rampenfunktion, in PAM-Crash mittels *Dis3D* (siehe dazu PAM-Crash Hinweis-Handbuch S. 659): Dieser Form der Lastaufbringung muss eine Vorsimulation vorausgehen, beispielsweise in Form der ersten Alternative, um den benötigten Weg zur Realisierung der gewünschten Vorspannkraft zu ermitteln. Daran führt auch kein Sensor vorbei, um den Vorschub bei erreichter Vorspannkraft zu stoppen, da PAM-Crash keinen Sensor anbietet, der Kräfte ungleich 0 N detektiert. Der Vorteil dieser Möglichkeit besteht aber darin, dass der Stempel konstant zugestellt wird und so Schwingungen vermeidet. Im Gegensatz dazu wird mit *Conlo* dem Stempel keine Zwangsbewegung in y-Richtung vorgegeben, der Stempel kann mit dem Zellstapel mitschwingen und trägt somit nicht zur Schwingungsdämpfung bei.
3. Vorgabe der Belastung indirekt als Weg in Form einer Sinusfunktion, in PAM-Crash mittels *Dis3D*: Entspricht weitgehend der zweiten Altern-

tive, sorgt aber für glatte Übergänge bei der Kraftein- und Auskopplung und soll die Einbringung von Schwingungen reduzieren.

In Abbildung 6.4 sind die Kraft/Zeit Kurven überlagert, um die unterschiedlichen Möglichkeiten der Vorspannung des Zellstapels zu vergleichen. Alle Alternativen erreichen die gewünschte Vorspannkraft und bringen nur geringe Schwingungen bis Simulationsende ein, die von Alternative eins bis drei immer weiter abnehmen. Da dieser Vorgang nur einmal auszuführen ist, wird mit der dritten Möglichkeit weiter gearbeitet.

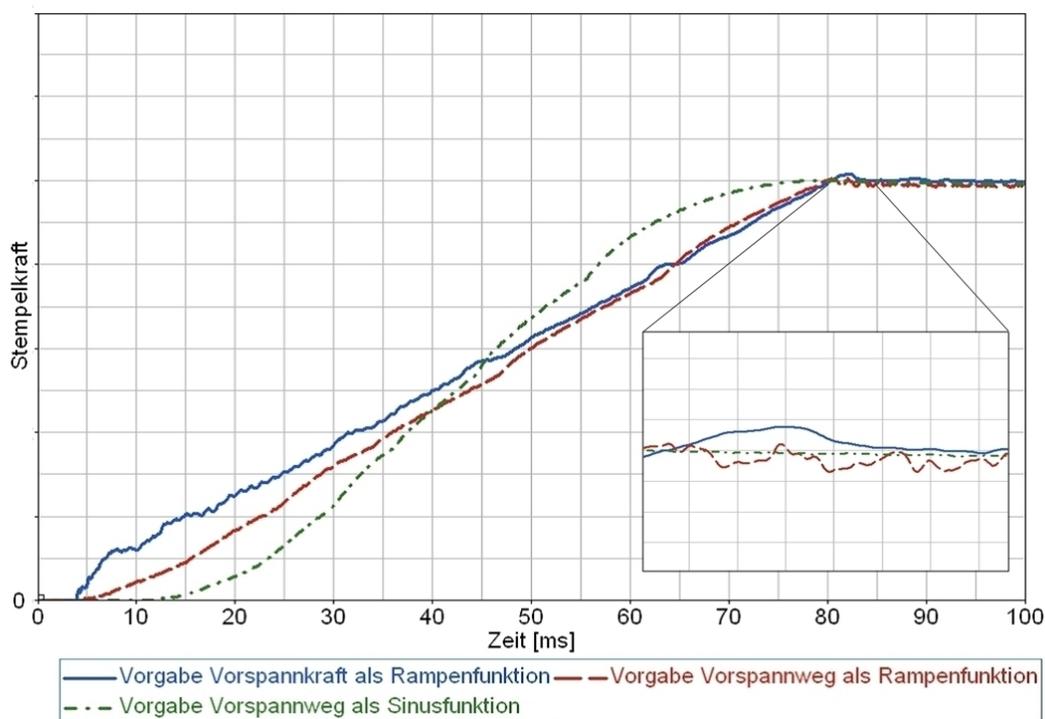


Abbildung 6.4: Vergleich der Möglichkeiten zur Vorspannung des Zellstapels

Weitere Einflussfaktoren auf das Simulationsergebnis

An dieser Stelle gilt es zu klären, ob die Aufbringung der Vorspannkraft, nach der dritten Alternative, innerhalb von 100 ms einer quasistatischen Aufbringung gleich kommt. Um diesen Sachverhalt zu überprüfen, wird dieselbe Simulation noch einmal über 500 ms durchgeführt und ein weiteres Mal innerhalb von 10 ms, um zu prüfen, ob eine Aufbringung in kürzerer Zeit auch zulässig ist. Die erhaltenen Kraft/Zeit Kurven werden in Abbildung 6.5 überlagert. Das Ergebnis zeigt, dass sich die Simulation über 100 ms nicht von

jener über 500 ms unterscheidet, womit davon auszugehen ist, dass sich die Simulation über 100 ms nicht von einer quasistatischen Aufbringung unterscheidet. Die Aufbringung der Vorspannkraft innerhalb von 100 ms ist somit zulässig. Gleichzeitig kann gezeigt werden, dass die Aufbringung innerhalb von 10 ms nicht mehr zulässig ist, da das Ergebnis von den längeren Simulationen abweicht. Diese Variante bringt, aufgrund der stoßartigen Einkopplung der Last, Schwingungen ins System ein, die bis Simulationsende nicht mehr abklingen. Es ist daher empfehlenswert, die Einbringung von Schwingungen von Beginn an zu vermeiden, da diese, aufgrund der geringen Dämpfung, nur sehr langsam wieder abklingen.

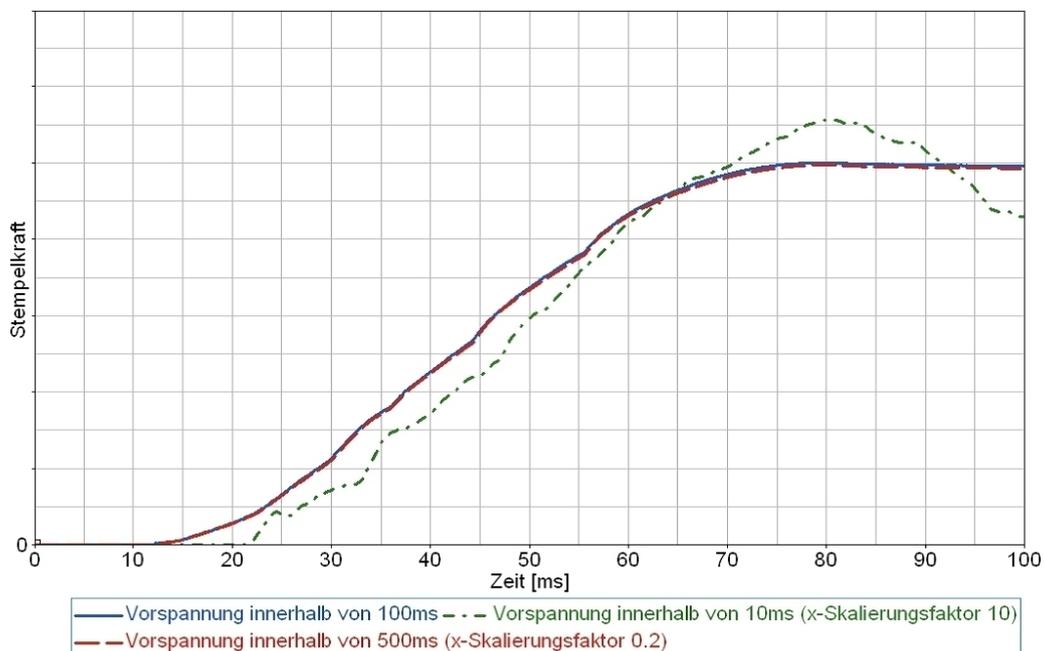


Abbildung 6.5: Auswirkung der Simulationsdauer auf die Vorspannung des Zellstapels

Zusätzlich wurde der Einfluss der Zeitschritt optimierenden Optionen, Skalierung der Steifigkeiten und die initiale und dynamische Skalierung der Massen, in PAM-Crash *Stiffness Scaling*, *Initial Mass Scaling*, *Dynamic Mass Scaling* (siehe dazu PAM-Crash Hinweis-Handbuch S. 49), untersucht. Alle Optionen tragen zur Vergrößerung des Zeitschritts bei, allerdings sind deren Auswirkungen abhängig vom Lastfall, weshalb kaum allgemein gültige Aussagen machbar sind. Im Zuge der vorliegenden Arbeit wird von den angesprochenen Optionen nicht Gebrauch gemacht, um den Umfang an Einflussfaktoren auf das Ergebnis möglichst gering zu halten.

6.3.2 Vorspannung des Gaskollektors

Der zweite Schritt umfasst die Vorspannung des Gaskollektors, dem noch die Implementierung der übrigen Komponenten, bis auf die Zellverbinder, vorausgeht. Zur Vorspannung des Gaskollektors wird das Modul wieder zwischen zwei starren Platten eingespannt und einer Belastung unterzogen, bis die vorgegebene Vorspannung erreicht ist. Das Simulationsmodell ist analog zum Simulationsmodell zur Vorspannung des Zellstapels, bis auf die beiden zusätzlichen Widerlager, welche die Vorspannung des Zellstapels aufrecht erhalten. Abbildung 6.6 zeigt das Simulationsmodell. Das Ziel, hinsichtlich der Aufbringung der Belastung in einer Form die keine Schwingungen ins Modell einbringt, ist analog zur Vorspannung des Zellstapels.

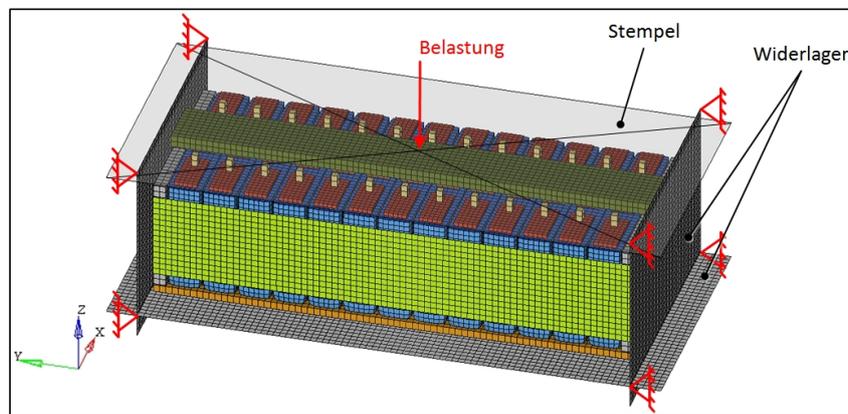


Abbildung 6.6: Simulationsmodell zur Vorspannung des Gaskollektors

Die unterschiedlichen Alternativen zur Lastaufbringung wurden bereits in Unterabschnitt 6.3.1 untersucht. Daher soll jene Lösung, die sich als die günstigste erwiesen hat, nämlich die Vorgabe der Belastung indirekt als Weg in Form einer Sinusfunktion mittels Dis3D, zur Anwendung kommen. Abbildung 6.7 zeigt das Ergebnis der Vorspannung des Gaskollektors und die Verteilung der Vorspannkraft auf ausgewählte Dichtungen, mit einem Skalierungsfaktor von 3 auf der y-Achse für die Anpresskräfte der Dichtungen. Dichtung #1 bezeichnet dabei die Dichtung am nächsten der Spannplatte, Dichtung #7 ist die Dichtung in der Mitte des Zellstapels und Dichtung #4 befindet sich mittig zwischen Dichtung #1 und #7. Die Vorspannkraft wird erreicht und verteilt sich gleichmäßig und frei von Schwingungen auf alle Dichtungen.

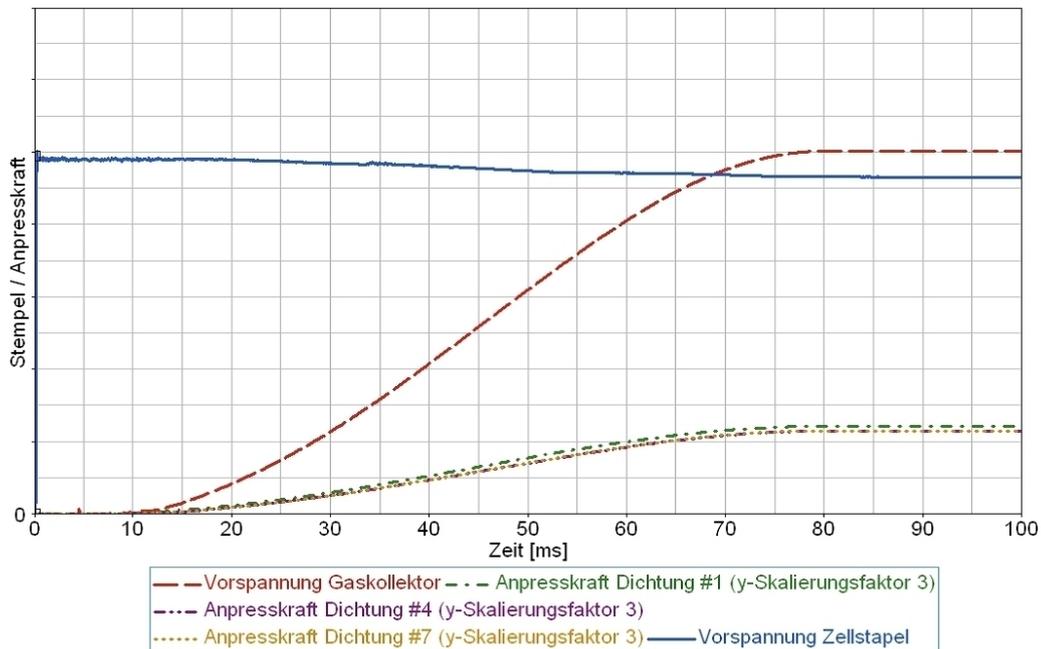


Abbildung 6.7: Ergebnis der Vorspannung des Gaskollektors und Verteilung der Vorspannkraft auf ausgewählte Dichtungen

6.3.3 Entlastung des Moduls

Zellstapel und Gaskollektor sind nun vorgespannt, jedoch wird ihre Vorspannkraft durch die, zur Vorspannung verwendeten, Stempel und Widerlager aufrecht erhalten. Im dritten Schritt wird das Modul entlastet, also von seinen äußeren Zwängen befreit. Dazu werden Spannbänder, Gaskollektor und Kühlplatte, wie schon auf Zellebene, mittels Tied Verbinder, aufgrund seiner einfachen und breitbandigen Anwendbarkeit, mit den Spannplatten verbunden. Anschließend werden die Stempel vom Modul abgehoben, bis die äußeren Zwänge das Modul nicht mehr beeinflussen und es sich im Gleichgewicht befindet. Dieser quasistatische Vorgang muss wieder in einer Simulation über wenige Millisekunden ablaufen, ohne dabei Schwingungen ins Modell einzubringen. Das Simulationsmodell zeigt Abbildung 6.8. Während der Entlastung würde sich das Modul, aufgrund der Trägheit der Massen, in Entlastungsrichtung fortbewegen. Um dies zu verhindern muss bei der Entlastung eine Randbedingung bezüglich der Verschiebung, in PAM-Crash mittels *Bounc* (siehe dazu PAM-Crash Hinweis-Handbuch S. 658), definiert werden. Dazu wird die Verschiebung einiger Knoten des Moduls, nahe der Mitte der Widerlager, in die jeweilige Entlastungsrichtung gesperrt. Die Deh-

nungsbehinderung aufgrund der Randbedingung ist gering zu halten, da das Modul nach diesem Schritt schließlich frei von äußeren Zwängen sein soll.

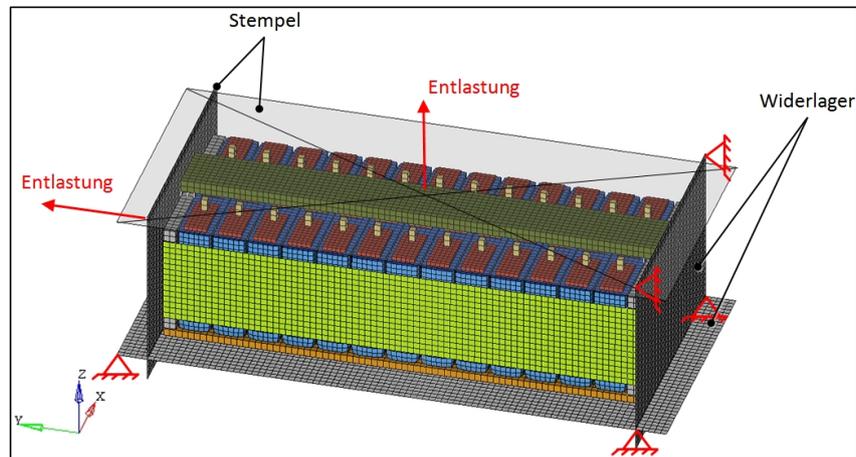


Abbildung 6.8: Simulationsmodell zur Entlastung des Moduls

Die Aufgabenstellung der Entlastung, ist der der Belastung ähnlich, womit die in Unterabschnitt 6.3.1 behandelten Alternativen zur Lastaufbringung, mit umgekehrter Wirkungsrichtung, auch zur Entlastung geeignet sind. Somit wird wieder der Weg, diesmal aber in Form einer Rampenfunktion mittels Dis3D vorgegeben, da der benötigte Weg gering ist. Das Ergebnis, in Form der Kraft/Zeit Kurven der Vorspannkraft von Zellstapel und Gaskollektor, wird in Abbildung 6.9 gezeigt. Im Laufe der Simulation nimmt die Vorspannung des Zellstapels ab, denn dieser ist bestrebt seine ursprüngliche Gestalt vor der Vorspannung einzunehmen. Die Spannbänder müssen diese Bewegung mitmachen, möchten aber auch in ihrer ursprünglichen Gestalt verharren. Dies geschieht solange bis sich das unterschiedliche Bestreben im Gleichgewicht befindet. Ein ähnlicher Effekt tritt auch bei der Entlastung des Gaskollektors auf. Wichtig dabei ist, dass keine der Dichtungen an Kontakt verliert, weshalb Abbildung 6.9 wieder die Verteilung der Vorspannkraft auf ausgewählte Dichtungen, mit einem Skalierungsfaktor von 3 auf der y-Achse, zeigt. Das Modul befindet sich jetzt von außen betrachtet im Gleichgewicht. Mit der Implementierung der Zellverbinder ist das FE-Modell des Batteriemoduls fertig gestellt.

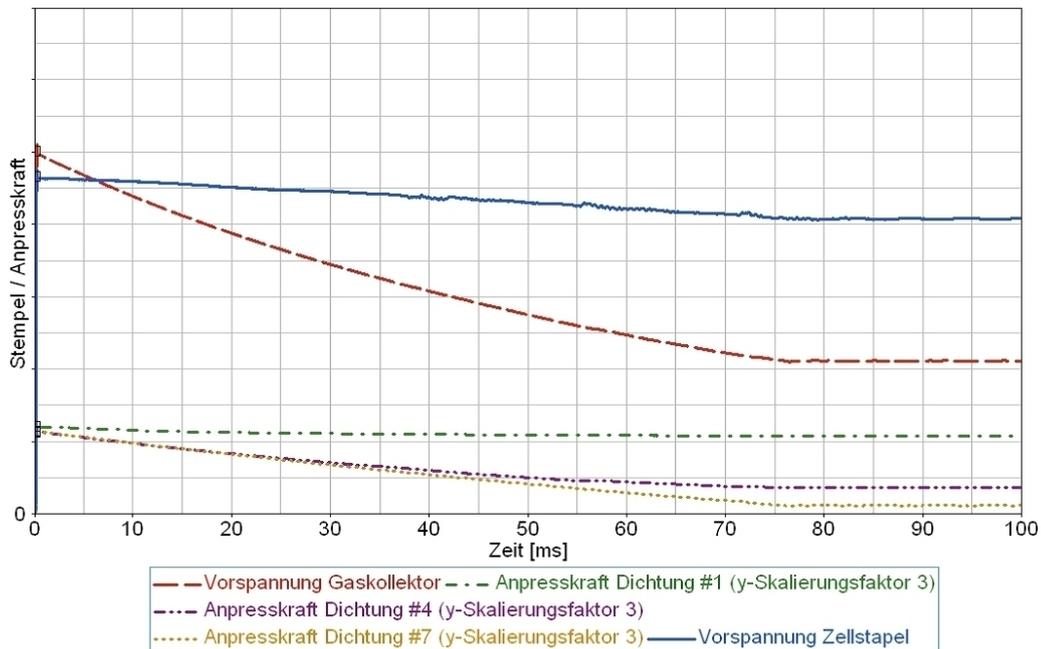


Abbildung 6.9: Ergebnis der Entlastung des Moduls und Verteilung der Vorspannkraft auf ausgewählte Dichtungen

Weitere Einflussfaktoren auf das Simulationsergebnis

Aufgrund der aufeinander aufbauenden Simulationen, zur Bewerkstelligung der Vorspannungen, sind Durchdringungen benachbarter Komponenten zu Simulationsbeginn ein Thema und soll an dieser Stelle behandelt werden. Im Fall einer einstufigen Simulationen werden die Komponenten so zueinander positioniert, dass es zu keinen Durchdringungen zu Simulationsbeginn kommt. Im Fall einer mehrstufigen Simulation können Durchdringungen in der Vorsimulation entstehen, wie dies auch bei der Vorspannung des Zellstapels der Fall ist, wo benachbarte Zellen aufgrund der Vorspannung leicht ineinander Eindringen damit der Kontaktalgorithmus anspricht. In der Folgesimulation, wie bei der Entlastung des Moduls, sind diese Durchdringungen von Beginn an vorhanden. PAM-Crash versucht die von der Durchdringung betroffenen Knoten durch Kraftaufbringung wegzudrücken, was bei hohen Kraftausschlägen wieder zu Schwingungen führt. PAM-Crash bietet verschiedene Optionen, einstellbar in den Kontaktkarten, diesem Problem zu begegnen (siehe dazu PAM-Crash Hinweis-Handbuch S. 571):

1. Keine Aktion setzen, in PAM-Crash mittels *IREMOV* 0: Keine Entfernung der Durchdringungen.

2. Anpassung der Geometrie, in PAM-Crash mittels IREMOV 1: Passt die Geometrie des Elementnetzes an.
3. Anpassung der Kontaktdicke, in PAM-Crash mittels IREMOV 2: Passt die lokale Kontaktstärke, also jenen Abstand der aussagt wann es sich um eine Durchdringung handelt, an.
4. Manuelle Anpassung der Kontaktdicke: Entfernung der Durchdringungen durch manuelle Anpassung der Kontaktdicke.

Zur Bewertung der verschiedenen Möglichkeiten zeigt Abbildung 6.10 die Kraft/Zeit Kurven der Vorspannkraft des Zellstapels der jeweiligen Alternativen, bei Entlastung des Moduls. Die Auswirkung der anfänglichen Durchdringungen zeigt die erste Alternative in Form eines Kraftauschlags zu Simulationsbeginn. Der Ausschlag ist hier gering und bringt keine Schwingungen ins System ein, womit in diesem Fall diese Alternative die günstigste darstellt. Bemerkenswert ist, dass die anderen Alternativen eine herabgesetzte Vorspannung des Zellstapels verursachen. Dies liegt daran, dass sowohl die Anpassung der Geometrie, als auch die Verringerung der Kontaktstärke eine Vergrößerung des Abstands zwischen den Zellen bewirkt. Die Zellen können sich nun ausdehnen, was in einem Absinken der Vorspannkraft resultiert.

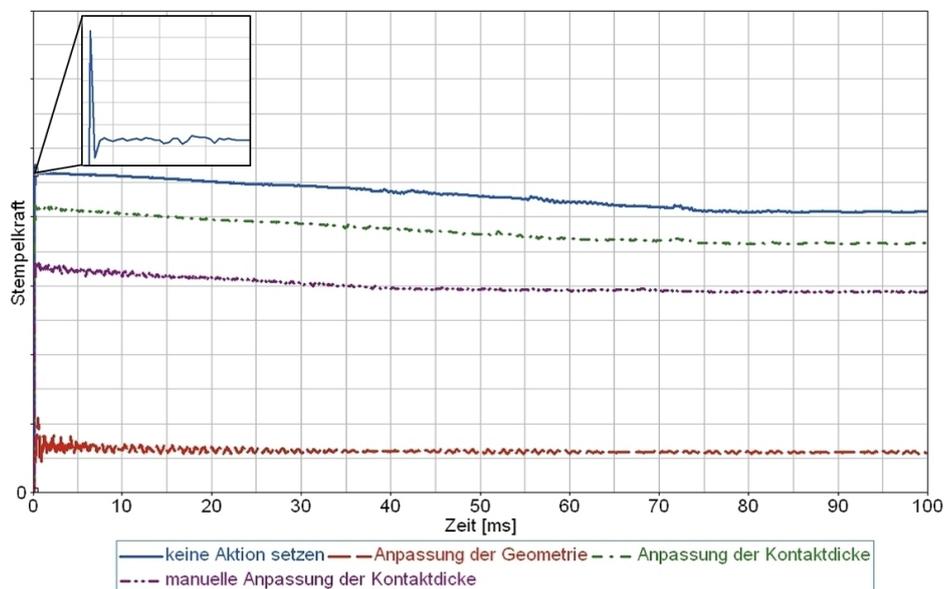


Abbildung 6.10: Auswirkung der unterschiedlichen Reduktionsmöglichkeiten anfänglicher Durchdringungen auf die Vorspannung des Zellstapels bei Entlastung des Moduls

Kapitel 7

Erstellung von Materialkarten zur Zell- und Modulmodellierung

Im Laufe der Modellierung von Zelle und Modul wurde festgehalten, dass die FE-Modelle noch um sämtliche Werkstoffkennwerte in Form von Materialkarten zu erweitern sind, um diese zu vervollständigen. Dieser Schritt ist notwendig, um das Materialverhalten von Strukturelementen korrekt abzubilden. Ziel dieses Kapitels ist es daher, die Erstellung von Materialkarten für das Modell der Batteriezelle und des darauf aufbauenden Modells des Batteriemoduls zu beschreiben. Dazu werden zu Beginn geeignete Materialmodelle, anhand der Anforderungen bezüglich des abzubildenden Verhaltens, ausgewählt. Anschließend wird die Parametrisierung der Materialmodelle, zur Erstellung der gewünschten Materialkarten, anhand eines Beispiels beschrieben. Abschließend wird der Einfluss der Materialkarten auf das Verhalten des FE-Modells verifiziert.

7.1 Auswahl der Materialmodelle

Im Grunde sollen die Materialmodelle im Stande sein, das wesentliche und für die Simulation relevante Verhalten der verwendeten Materialien zu beschreiben. Daher ist das Verformungsverhalten, hinsichtlich des elastischen und plastischen Verhaltens, die Dehnratenabhängigkeit der Fließkurve und die Anisotropie näher zu betrachten. Temperatur- und Feuchtigkeitsabhängigkeit können ebenfalls wesentlich sein, jedoch ist dieses für die Simulation nicht relevant. Dies liegt daran, dass die in Abschnitt 4.3 vorgestellten Missbrauchstests bei konstanten Bedingungen, hinsichtlich der Temperatur,

durchzuführen sind [Doughty/Crafts 2006, S. 14]. Im Zuge dieses Abschnitts wird festgelegt, welches Verhalten der jeweiligen Materialien wesentlich und für die Simulation relevant ist. Erfüllt ein Verhalten diese beiden Kriterien, ist die Abbildbarkeit dessen eine Voraussetzung an das Materialmodell. In weiterer Folge werden darauf aufbauend geeignete Materialmodelle vorgestellt. Die Ergebnisse dieses Abschnitts werden in Tabelle 11.1 auf Seite 118 im Anhang zusammengefasst.

7.1.1 Feststellung des abzubildenden Verhaltens

Als Erstes wird der Aluminiumwerkstoff *AW-1050A* betrachtet. Ein wesentliches Verhalten, hinsichtlich des Verformungsverhaltens, ist sein elastisch-plastisches Verhalten, welches auch für die Simulation relevant ist, aufgrund der großen Deformation im Zuge der Missbrauchstests. Die beiden Kriterien sind somit erfüllt, weshalb die Abbildbarkeit des elastisch-plastischen Verhaltens eine Voraussetzung an das Materialmodell, zur Beschreibung des Aluminiumwerkstoffs, darstellt. Diese Voraussetzung gilt auch für alle anderen verwendeten Materialien. Die Dehnratenabhängigkeit der Fließkurve wird mit Hilfe eines Fließkurvenatlanten beurteilt. Nach diesem stellt die Dehnratenabhängigkeit bei Raumtemperatur kein wesentliches Verhalten dar und wird daher vernachlässigt [Doege/Meyer/Saeed 1986, S. 182]. Eine relevante Anisotropie ist bei diesem Werkstoff in der Regel nicht zu erwarten, weshalb dessen Abbildbarkeit ebenfalls keine Voraussetzung an das Materialmodell, zur Beschreibung des Aluminiumwerkstoffs, darstellt. Dies gilt auch für alle im Folgenden beschriebenen Materialien. Im Fall der Hülle ist diese Annahme zukünftig zu überprüfen, da es sich hier um eine tiefgezogene Komponente handelt, weshalb eine wesentliche Anisotropie durch die Umformung möglich ist.

Als Nächstes wird der Stahlwerkstoff *X5CrNi18-10* untersucht. Während die Voraussetzungen bezüglich der Abbildbarkeit des Verformungsverhaltens und der Anisotropie analog zum Aluminiumwerkstoff sind, gilt es die Dehnratenabhängigkeit wieder anhand des Fließkurvenatlanten zu bewerten. Nach diesem ist von einem wesentlichen Einfluss der Dehnratenabhängigkeit bei Raumtemperatur auszugehen [Doege/Meyer/Saeed 1986, S. 182]. Die Abbildbarkeit der Dehnratenabhängigkeit stellt somit eine Voraussetzung an das Materialmodell, zur Beschreibung dieses Stahlwerkstoffs, dar.

Für den Stahlwerkstoff *DC04* ergeben die Untersuchungen analoge Voraussetzungen, wie für das Material *X5CrNi18-10*.

Abschließend sind noch die *Nullmaterialien* der Nullschalen zu behandeln.

Da diese ausschließlich der Modellierung von Kontaktflächen dienen, wird vorausgesetzt, dass ihr Verhalten keinen mechanischen Einfluss auf das übrige FE-Modell hat.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass das Zellmaterial hier nicht behandelt wird, da es keinen Werkstoff im engeren Sinn darstellt und bereits in Unterabschnitt 5.4.2 beschrieben wurde.

7.1.2 Auswahl geeigneter Materialmodelle

In weiterer Folge gilt es geeignete Materialmodelle auszuwählen, die die zuvor beschriebenen Voraussetzungen erfüllen. Standardmäßig wird in der Fahrzeugcrashsimulation das Materialmodell nach von Mises verwendet, um das elastisch-plastische Verhalten von metallischen Werkstoffen und von Kunststoffen abzubilden. Es verwendet die Fließbedingung nach von Mises und geht von isotroper Verfestigung und Volumenkonstanz aus. Da auch die Dehnratenabhängigkeit berücksichtigt werden kann, erfüllt dieses Materialmodell sämtliche Voraussetzungen zur Abbildung des Verhaltens der verwendeten Materialien, exklusive der Nullmaterialien. In PAM-Crash ist dieses Materialmodell für Solidelemente in *Materialmodell #1* (siehe auch PAM-Crash Hinweis-Handbuch S. 141) und für Shellelemente in *Materialmodell #103* (siehe auch PAM-Crash Hinweis-Handbuch S. 264) implementiert. Zur Parametrisierung sind Dichte, E-Modul, Poissonzahl und die quasistatische Fließkurve in der Form wahre Spannung über wahre plastische Dehnung notwendig. Zur Beschreibung der Dehnratenabhängigkeit sind darüber hinaus die Fließkurven bei unterschiedlichen Dehnraten, oder die Dehnratenparameter D und p , zur Bestückung des analytischen Cowper&Symonds Modells, notwendig. Dieses skaliert die quasistatische Fließkurve abhängig von der Dehnratenach nachstehender Formel [Winklhofer/Trattnig 2008, S. 7 f.].

$$\sigma_y(\bar{\varepsilon}_p, \dot{\varepsilon}_{eff}) = \sigma_y^s(\bar{\varepsilon}_p) \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{eff}}{D} \right)^{\frac{1}{p}} \right]$$

Des Weiteren ist ein Materialmodell zur Modellierung der Nullmaterialien notwendig. PAM-Crash bietet das *Materialmodell #100* (siehe auch PAM-Crash Hinweis-Handbuch S. 263). Es ist ein gebräuchliches und wirtschaftliches Modell zur Modellierung von Kontaktflächen, wenn interne Kräfte und Deformationen nicht von Relevanz sind [ESI-Group 2009, S.263]. Dieses Materialmodell erfüllt somit die Voraussetzungen zur Abbildung des Verhaltens der Nullmaterialien. Zur Parametrisierung sind wieder die Dichte, E-Modul und Poissonzahl notwendig.

7.2 Parametrisierung der Materialmodelle

Innerhalb dieses Abschnitts wird die Parametrisierung der zuvor ausgewählten Materialmodelle behandelt. Dazu wird dieser Prozess anhand der Parametrisierung des Materialmodells #103, zur Erstellung der Materialkarte für das Material X5CrNi18-10, beschrieben. Während diese Materialkarte im Zuge der vorliegenden Arbeit erstellt wurde, erfolgt die Erstellung der übrigen Materialkarten analog. An dieser Stelle sei aber erwähnt, dass das FE-Modell auf Materialkarten beruht, die vom Projektpartner zur Verfügung gestellt wurden. Der Grund hierfür liegt in der Tatsache, dass die zur Ermittlung der Parameter benötigten Materialproben, erst zu einem Zeitpunkt zur Verfügung standen, zu dem am FE-Modell keine Änderungen mehr vorgenommen werden konnten. Die zur Verfügung gestellten Materialkarten erfüllen die Voraussetzungen hinsichtlich des abzubildenden Verhaltens ebenso. Die im Zuge dieses Abschnitts erstellte Materialkarte dient dafür der Klärung des Einflusses von Materialkarten auf das FE-Modell, was in Abschnitt 7.3 behandelt wird.

7.2.1 Ermittlung von Parametern zur Beschreibung des Verformungsverhaltens

Steht das Material X5CrNi18-10 zur Verfügung, werden in einem ersten Schritt die vom Materialmodell #103 benötigten Parameter zur Beschreibung des Verformungsverhaltens ermittelt. Werte für Dichte, E-Modul und Poissonzahl werden der Literatur entnommen. Die Fließkurve, in Form wahre Spannung über wahre plastische Dehnung, wird im Zuge des quasistatischen Zugversuchs abgeleitet [Winklhofer/Trattnig 2008, S. 18 f.]. Dem Zugversuch geht als Vorbereitung die Fertigung geeigneter Proben aus dem zur Verfügung gestellten Material voraus und wird in Abbildung 7.1 dargestellt. Dazu werden aus dem Material drei Proben in x-Richtung und drei Proben in y-Richtung des lokalen Koordinatensystems der Abbildung gefertigt. Dies ermöglicht die Überprüfung der Wiederholgenauigkeit, anhand der Versuche in die gleiche Richtung, und es ermöglicht die Überprüfung der Annahme, dass keine relevante Anisotropie vorliegt, anhand der Versuche in unterschiedliche Richtungen. Die Probengeometrie sowie die Durchführung des Versuchs sind in der ÖNORM EN 10002-1 standardisiert und werden dieser entnommen.

Die insgesamt sechs quasistatischen Zugversuche werden extern durchgeführt. Zur Auswertung der Versuche werden die aufgezeichneten Spannungs-Dehnungsdiagramme überlagert in Abbildung 7.2 dargestellt. Die Kurven der

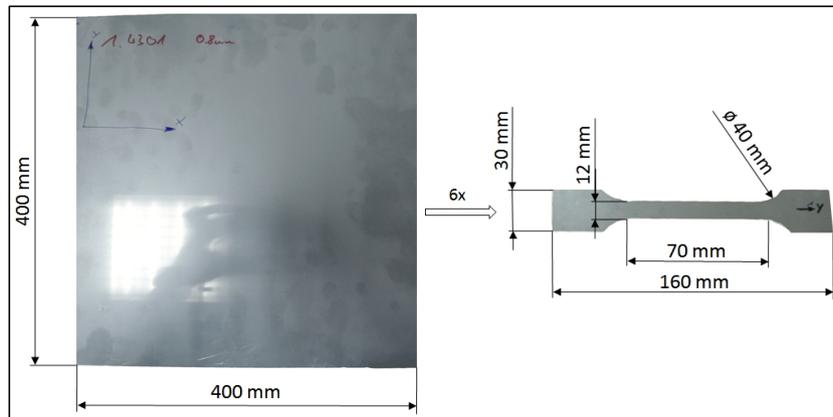


Abbildung 7.1: Zugprobe aus dem Material X5CrNi18-10

Versuche in dieselbe Richtung decken sich, womit dem Versuch eine sehr gute Wiederholgenauigkeit zugesprochen werden kann. Die Abweichung zwischen den Kurven der Versuche in unterschiedliche Richtungen, befindet sich in einer Größenordnung, welche die Annahme, dass das Material keine relevante Anisotropie aufweist, bestätigt.

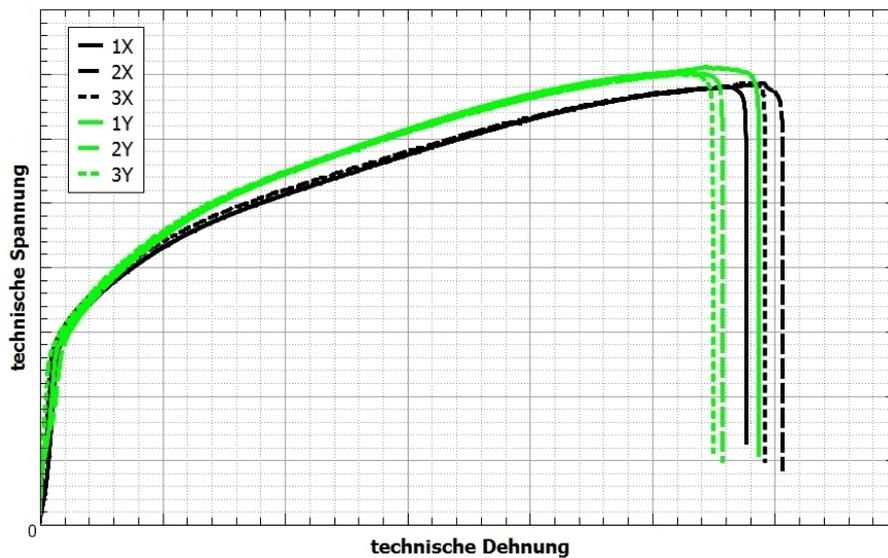


Abbildung 7.2: Ergebnis der Zugversuche für das Material X5CrNi18-10

Zur Mittelung der erhaltenen technischen Spannungs-Dehnungsdiagramme und zur darauf aufbauenden Ableitung der benötigten Fließkurve im Bereich der Gleichmaßdehnung, steht eine geeignete Matlab-Routine zur Verfügung. Unter der Annahme der Volumenkonstanz bei plastischer Verformung, siehe

nachstehende Formel, kann die wahre Spannung für die benötigte Fließkurve berechnet werden. Ebenso steht zur Extrapolation der Fließkurve über die Gleichmaßdehnung hinaus, eine Matlab-Routine zur Verfügung, die sich geeigneter Extrapolationsmodelle bedient. Jenes Extrapolationsmodell ist zu wählen, welches die beste Übereinstimmung mit der Fließkurve im Bereich der Gleichmaßdehnung zeigt [Winklhofer/Trattning 2008, S. 18 f.]. In diesem Fall stellt sich das Fließgesetz nach Hockett-Sherby als günstigste Alternative heraus. Sämtliche Parameter zur Beschreibung des Verformungsverhaltens des Materials X5CrNi18-10 stehen nun zur Verfügung.

$$V = A_0 \times l_0 = A \times l = konst$$

7.2.2 Ermittlung von Parametern zur Beschreibung der Dehnratenabhängigkeit

Die Dehnratenabhängigkeit wird über das analytische Cowper&Symonds Modell beschrieben. Der zweite Schritt umfasst die Ermittlung der beiden Cowper&Symonds Parameter, wofür ein dynamischer Biegeversuch mit der Pendelversuchsanlage durchzuführen ist. Da kein weiteres Material von X5CrNi18-10 für Proben zur Verfügung steht, ist eine Versuchsdurchführung aktuell nicht möglich. Damit stehen auch keine Parameter zur Beschreibung der Dehnratenabhängigkeit des Materials X5CrNi18-10 zur Verfügung. Die Vorgehensweise der inversen Ermittlung der Cowper&Symonds Parameter wird an dieser Stelle trotzdem kurz skizziert. Im Zuge des dynamischen Biegeversuchs mit der Pendelversuchsanlage ist die Beschleunigung/Zeit Kurve des Pendelarms aufzuzeichnen. Dieser Versuch ist anschließend zu simulieren. Die Abweichung der Beschleunigung/Zeit Kurve der Simulation, von jener Kurve des Versuchs, gilt es nun zu minimieren, durch Optimierung der Cowper&Symonds Parameter. Die Lösung der Optimierungsaufgabe sind die Cowper&Symonds Parameter zur Beschreibung der Dehnratenabhängigkeit [Winklhofer/Trattning 2008, S. 23 ff.].

7.2.3 PAM-Crash-spezifische Parameter

Neben den bisher ermittelten materialspezifischen Parametern, verlangen sämtliche Materialmodelle PAM-Crash-spezifische Parameter zur Vervollständigung der Materialkarten. Zwei wesentliche sind die Wahl der Integrationsregel, in PAM-Crash NINT, und die Wahl der Sanduhreffekt Prävention, in PAM-Crash ISHG. Die Wahl dieser Parameter zur Vervollständigung der

Materialkarte für das Material X5CrNi18-10 orientiert sich an vergleichbaren Materialkarten. Damit ist die Materialkarte für das Material X5CrNi18-10 vollständig und ist in der Lage das gewünschte Verhalten, mit Ausnahme der Dehnratenabhängigkeit mangels Parameter, abzubilden.

7.3 Einfluss von Materialkarten auf das Simulationsergebnis

Die FE-Modelle der Zelle und des darauf aufbauenden Moduls beruhen auf Materialkarten, die vom Projektpartner zur Verfügung gestellt wurden und so auch die Materialkarte für das Material X5CrNi18-10. Während die im vorangegangenen Abschnitt erstellte Materialkarte für dasselbe Material, auf Materialversuchen am Rohmaterial des Moduls beruht, ist die Basis der zur Verfügung gestellten Materialkarten unbekannt. Es gilt nun zu klären, ob der Aufwand zur Erstellung eigener Materialkarten lohnt. Dazu wird die eigene Materialkarte für das Material X5CrNi18-10, mit jener des Projektpartners verglichen und anschließend der Einfluss, anhand der Simulation des in Kapitel 8 vorgestellten Missbrauchstests, verifiziert.

7.3.1 Vergleich von Materialkarten

Als Erstes werden die Parameter zur Beschreibung des Verformungsverhaltens miteinander verglichen. Dichte und Poissonzahl beider Materialkarten stimmen überein, während sich die Materialkarten hinsichtlich des E-Moduls geringfügig unterscheiden. Abbildung 7.3 zeigt die beiden quasistatischen Fließkurven zum Vergleich überlagert. Hier fällt auf, dass die Dehngrenze der Materialkarte des Projektpartners über der, der eigenen Materialkarte liegt, wobei dessen Fließkurve aber steiler ansteigt. Ein Vergleich der Parameter zur Beschreibung der Dehnratenabhängigkeit entfällt, da die nötigen Parameter zuvor nicht ermittelt werden konnten. Die PAM-Crash-spezifischen Parameter beider Materialkarten stimmen auch überein.

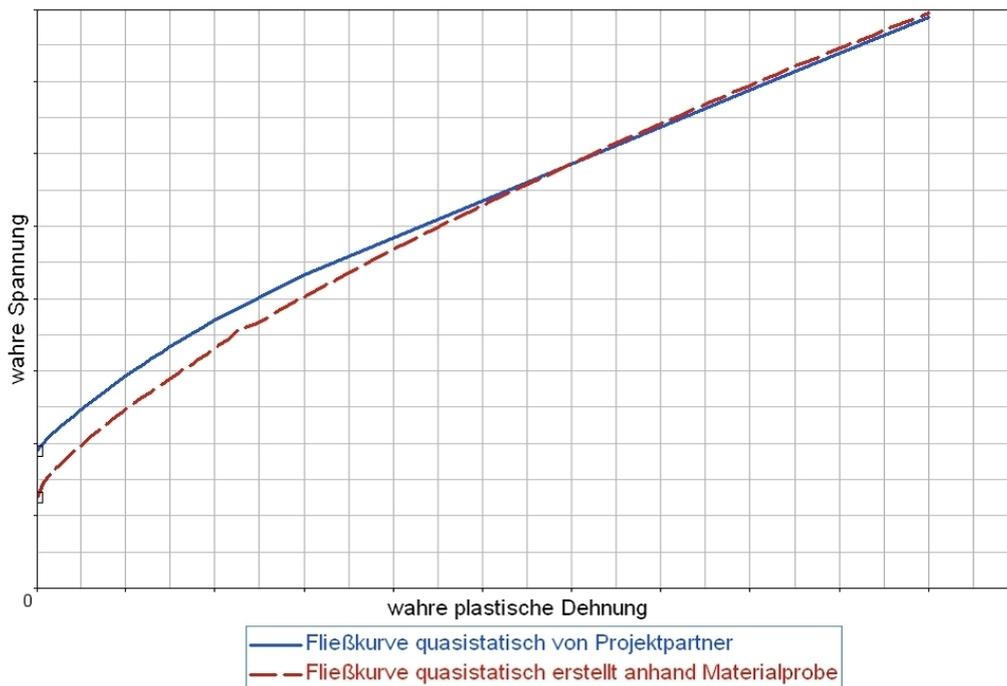


Abbildung 7.3: Vergleich der quasistatischen Fließkurve basierend auf Materialversuchen am Rohmaterial des Batteriemoduls, mit jener Fließkurve des Projektpartners für das Material X5CrNi18-10

7.3.2 Verifizierung des Einflusses anhand des quasistatischen Drucktests

Zur Verifizierung des Einflusses wird am Modul der quasistatische Drucktest in x-Richtung simuliert, der in Kapitel 8 noch ausführlich behandelt wird. Dieser Test eignet sich gut, da der Großteil der Komponenten aus X5CrNi18-10 von der Deformation betroffen ist und der Einfluss der Dehnratenabhängigkeit vermieden wird. Zu den Komponenten aus X5CrNi18-10 gehören die Pole, die Spannbänder und Spannplatten sowie jener Teil des Gaskollektors, der den Zellen zugewandt ist. Das Ergebnis aus der Simulation mit der eigenen Materialkarte wird mit dem Ergebnis aus der Simulation mit der vom Projektpartner zur Verfügung gestellten Materialkarte verglichen.

Abbildung 7.4 zeigt die Überlagerung der erhaltenen Kurven, Impaktorkraft über Impaktorstreckweg, zur Auswertung des Ergebnisses. Am Anfang der Simulation decken sich die Verläufe beider Kurven. Später fällt aber das Kraftniveau der Simulation mit der eigenen Materialkarte, unter das Niveau der Simulation mit der vom Projektpartner zur Verfügung gestellten Materialkarte

und entfernt sich in weiterer Folge immer weiter, was sich auf die erreichbare Maximalkraft auswirkt.

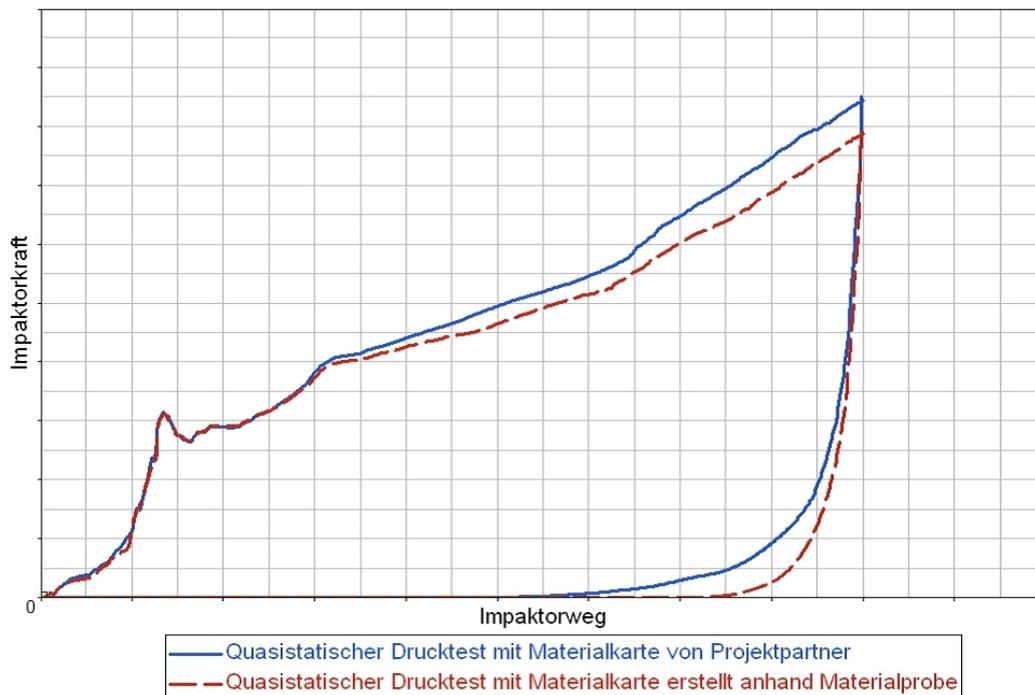


Abbildung 7.4: Vergleich des Simulationsergebnisses des quasistatischen Drucktests in x-Richtung mit der Materialkarte basierend auf Materialversuchen am Rohmaterial des Batteriemoduls, mit jenem Ergebnis mit der Materialkarte des Projektpartners für das Material X5CrNi18-10

7.3.3 Diskussion des Einflusses von Materialkarten

An dieser Stelle seien kurz die gewonnenen Erkenntnisse aus der Verifizierung des Einflusses von Materialkarten diskutiert. Das Ergebnis aus dem vorangegangenen Unterabschnitt scheint plausibel, in Anbetracht des Vergleichs der quasistatischen Fließkurven in Abbildung 7.3. Da die Fließspannung der eigenen Materialkarte unter der Fließspannung der Materialkarte des Projektpartners liegt, sinkt auch die Widerstandsfähigkeit die das Modul dem eindringenden Impaktor, im Zuge des Drucktests, entgegen bringen kann. Dies äußert sich durch ein geringeres Kraftniveau und in weiterer Folge in einem geringeren Energieaufnahmevermögen des Moduls in Form von innerer Energie bei gleicher Intrusion. Allein durch die Verwendung der einen Materialkarte des Projektpartners, die nicht auf Materialversuchen am Rohmaterial

des Moduls beruht, wurde das Energieaufnahmevermögen des Moduls um 6,12 % zu hoch beurteilt. Die größte Abweichung betrifft die maximale Belastung der Verbindung von Gaskollektor mit der Spannplatte, dessen Wert um 163,73 % zu hoch beurteilt wurde. Dieser Vergleich soll das Bewusstsein für den Einfluss von Materialkarten schaffen, die durchaus eine Fehlerquelle darstellen können, da sie auf streuenden Materialdaten beruhen. Der Aufwand zur Erstellung eigener Materialkarten, die auf Materialversuchen am Rohmaterial des Moduls beruhen, ist somit für die weitere Entwicklung des FE-Modells gerechtfertigt.

Kapitel 8

Simulation von Missbrauchstests zur Moduluntersuchung

Mit dem vorangegangenen Kapitel wurde die Erstellung des FE-Modells des Batteriemoduls abgeschlossen. Innerhalb dieses Kapitels wird die Simulation von Missbrauchstests am zuvor erstellten Modell beschrieben. Dabei wird das Ziel verfolgt, einerseits das FE-Modell auf Tauglichkeit zur Simulation von Missbrauchstests zu untersuchen und andererseits benötigte Rechenergebnisse für die Schadenslokalisierung am Modul zu erstellen. Dazu wird der Versuchsaufbau und die Durchführung, gefolgt von der Auswertung der Simulation der Missbrauchstests beschrieben und die Ergebnisse abschließend diskutiert.

8.1 Versuchsaufbau und Durchführung

Als Missbrauchstest wird der dynamische Stoßtest nach TÜV SÜD und Daimler herangezogen, dessen Hintergründe bereits in Unterabschnitt 4.3.2 behandelt wurden. Dieser Versuch soll unter anderem dem Kritikpunkt am quasistatischen Drucktest, hinsichtlich der Tatsache, dass der aufgebrachte Lastfall nicht die Belastung in realen Unfällen repräsentiert, Rechnung tragen [Wech u.a. 2011, S. 2]. Um einen Vergleich zu ermöglichen, wird sowohl der quasistatische Drucktest als auch der dynamische Stoßtest simuliert. Der Versuchsaufbau und dessen Durchführung wurden ebenfalls in Unterabschnitt 4.3.2 behandelt, weshalb innerhalb dieses Abschnitts nur noch auf Details des Simulationsmodells in Abbildung 8.1 eingegangen wird.

Der quasistatische als auch der dynamische Lastfall verwenden das gleiche

Simulationsmodell, unterscheiden sich aber in ihrer Durchführung. Das Simulationsmodell besteht aus einem zylinderförmigen Impaktor mit 150 mm Durchmesser, der das stillstehende Batteriemodul belastet. Im Fall des quasistatischen Drucktests entspricht die Belastung einer externen Arbeit in Form einer kontinuierlichen Vorschubbewegung des Impaktors bis 15 % Intrusion, bezogen auf die Hauptabmessung des Moduls in der jeweiligen Belastungsrichtung. Im Zuge des dynamischen Stoßtests wird das Modul mit dem Impaktor, mit der initialen Geschwindigkeit von 40 km/h analog zum Versuch des TÜV SÜD und Daimler, beschossen. Für einen Vergleich der beiden Versuchssimulationen, soll die Belastung in Form von kinetischer Energie, dem Wert der Belastung des quasistatischen Drucktests entsprechen. Da die Geschwindigkeit des Impaktors vorgeschrieben ist, wird die Größe der kinetischen Energie, nach nachstehender Formel, über die Masse des Impaktors eingestellt. Die Tests werden in x- und z-Richtung simuliert, da diese beiden Richtungen, im Vergleich zur Belastung in y-Richtung in der das Modul durch die massive Spannplatte geschützt wird, die kritischeren Lastfälle darstellen. In x-Richtung wird die Höhe des Impaktors so gewählt, dass dieser über der Kühlplatte auf das Modul trifft, da dies der kritischeren Belastung entspricht.

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \times m \times v^2$$

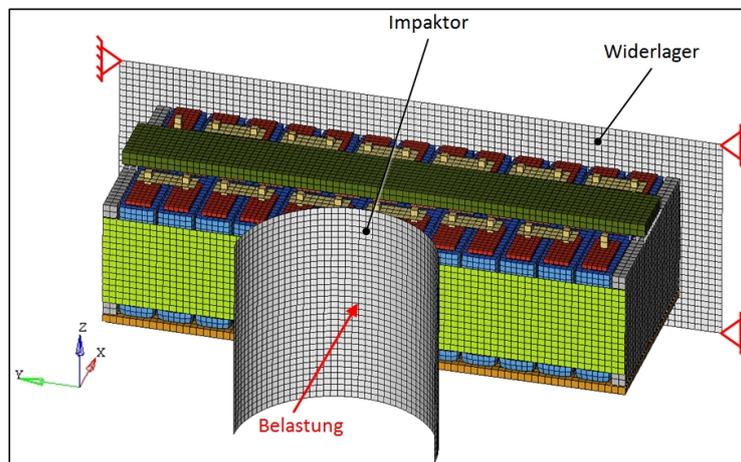


Abbildung 8.1: Simulationsmodell des quasistatischen Drucktests und des dynamischen Stoßtests in x-Richtung

8.2 Auswertung der Simulation

Im Zuge dieses Abschnitts wird die Simulation der Tests für jede Belastungsrichtung ausgewertet und der quasistatische mit dem dynamischen Lastfall verglichen.

Auswertung der Simulation in x-Richtung

Zum Vergleich der Simulation des quasistatischen Drucktests mit dem dynamischen Stoßtest in x-Richtung anhand der erhaltenen Kurven, Impaktorkraft über Impaktorstreckung, ist deren Überlagerung in Abbildung 8.2 dargestellt. Im Fall des quasistatischen Drucktests gilt es die Intrusion von 15 % zu erreichen. Ab Simulationsbeginn steigt die Kraft steil an, bis sie ein lokales Maximum erreicht. Hier kommt es zum Knicken der höchst beanspruchten, mittleren Hülle und dem damit verbundenen Kraftabfall. Daraufhin steigt die Kraft/Weg Kurve kontinuierlich weiter bis auf die Maximalkraft, die bei maximaler Intrusion erreicht wird. Im Fall des dynamischen Stoßtests gilt es denselben Energieeintrag zu leisten, wie schon im Drucktest. Dazu wird die Masse des Impaktors passend gewählt. Die Kraft/Weg Kurve des dynamischen Lastfalls steigt auch hier ab Simulationsbeginn steil an und übersteigt dabei das Kraftniveau des quasistatischen Lastfalls. Nach Erreichung des lokalen Maximums, steigt die Kraft kontinuierlich weiter, jedoch mit geringerer Steigung als im Drucktest. Bei maximaler Intrusion wird daher eine geringere Maximalkraft als im quasistatischen Lastfall gemessen. Bemerkenswert ist, dass die maximale Intrusionstiefe bereits früher als zuvor erreicht wird.

Bezüglich des Deformationsverhaltens des quasistatischen Drucktests und des dynamischen Stoßtests kann festgehalten werden, dass in der Simulation zwischen den unterschiedlichen Lastfällen, bei gleicher Intrusionstiefe, keine Unterschiede auftreten. Abbildung 8.3 beschränkt sich daher auf die Darstellung des Deformationsbilds des quasistatischen Lastfalls, bei maximaler Intrusion. Hauptsächlich sind die drei mittleren Zellen, das Spannband an der Impaktor zugewandten Seite und die Zellverbinder von der Deformation betroffen.

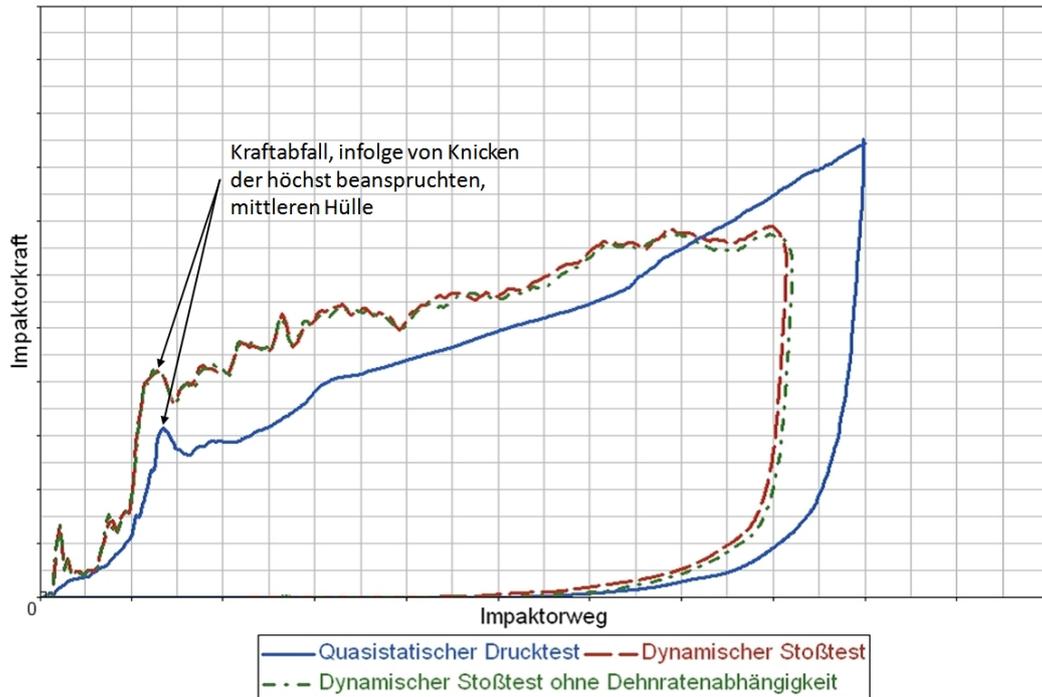


Abbildung 8.2: Vergleich des Simulationsergebnisses des quasistatischen Drucktests in x-Richtung, mit jenem Ergebnis des jeweiligen dynamischen Stoßtests

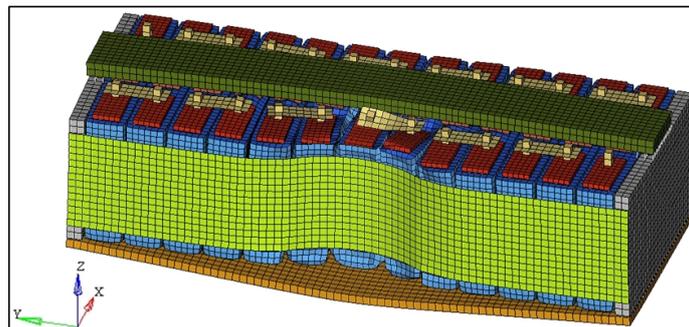


Abbildung 8.3: Simuliertes Deformationsverhalten bei quasistatischer Versuchsdurchführung in x-Richtung, bei maximaler Intrusion

Auswertung der Simulation in z-Richtung

Der Vergleich der Simulation des quasistatischen Drucktests mit dem dynamischen Stoßtest in z-Richtung erfolgt wieder anhand der Überlagerung der erhaltenen Kurven, Impaktorkraft über Impaktorweg, abgebildet in Abbildung 8.4. Im Zuge des quasistatischen Drucktests gilt es wieder das Batteriemodul um 15 % zu deformieren. Mit Simulationsbeginn steigt die Kraft an, wobei zu Beginn maßgeblich der Gaskollektor, die mittleren Dichtungen und die jeweiligen Capplates von der Deformation betroffen sind. Danach steigt die Kraft steiler an als bisher, da nun auch die mittlere Zelle deformiert wird und erreicht später ein lokales Maximum. An dieser Stelle kommt es zum Knicken der Hülle der mittleren Zelle. In weiterer Folge steigt die Kraft kontinuierlich weiter an, bis die maximale Intrusion erreicht wird. Im Fall des dynamischen Stoßtests gilt es wieder denselben Energieeintrag zu leisten wie schon im Drucktest. Die Masse des Impaktors wird dazu passend gewählt. Die Kraft/Weg Kurve des dynamischen Lastfalls übersteigt gleich zu Simulationsbeginn das Kraftniveau des Drucktests. Daraufhin folgt ein Bereich, in dem sich der Kraftverlauf des Stoßtests mit dem des Drucktests weitgehend deckt. Mit einsetzendem Knicken der mittleren Zelle übersteigt die Kraft wiederum das Kraftniveau des Drucktests. Innerhalb dieses Bereichs wird auch die Maximalkraft gemessen. In weiterer Folge beginnt die Kraft zu fallen, bis die maximale Intrusion erreicht wird. Wieder wird die maximale Intrusionstiefe früher erreicht als zuvor beim quasistatischen Drucktest.

Hinsichtlich des Deformationsverhaltens des quasistatischen Drucktests und des dynamischen Stoßtests kann wieder festgehalten werden, dass es zu keinen Unterschieden in der Simulation zwischen den beiden Lastfällen, bei gleicher Intrusionstiefe, kommt. Abbildung 8.5 beschränkt sich somit wieder auf die Darstellung des Deformationsbilds des Drucktests, bei maximaler Intrusion. Maßgeblich sind die drei mittleren Zellen und der Gaskollektor von der Intrusion des Impaktors betroffen.

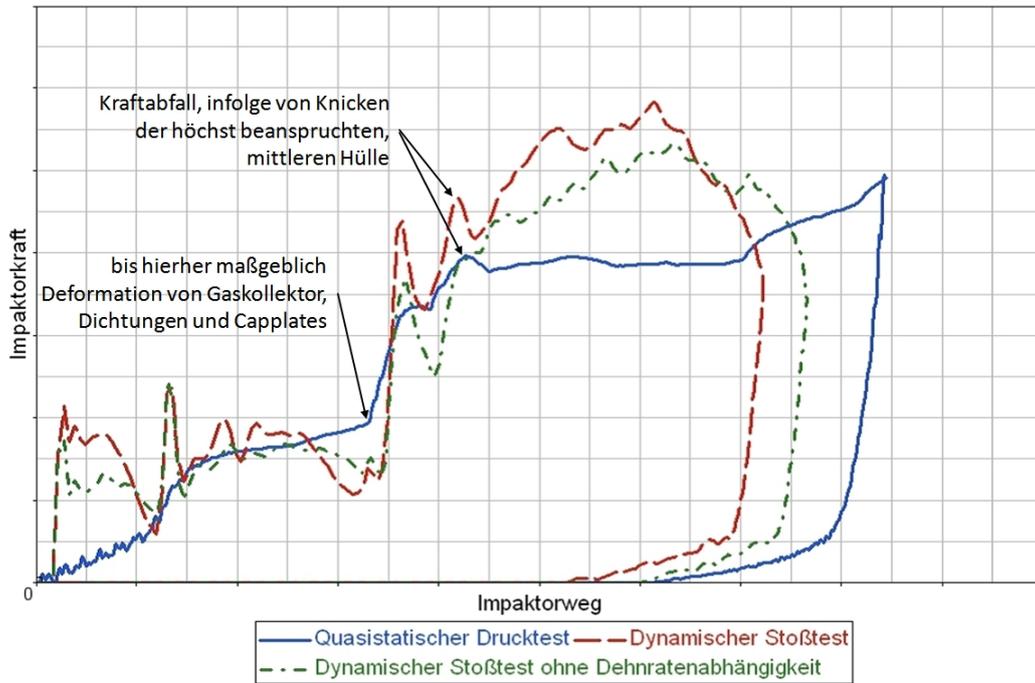


Abbildung 8.4: Vergleich des Simulationsergebnisses des quasistatischen Drucktests in z-Richtung, mit jenem Ergebnis des jeweiligen dynamischen Stoßtests

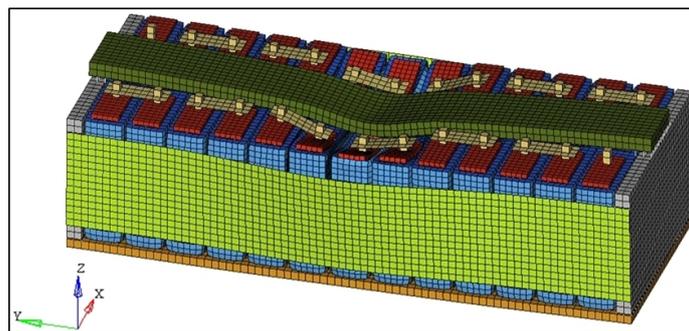


Abbildung 8.5: Simuliertes Deformationsverhalten bei quasistatischer Versuchsdurchführung in z-Richtung, bei maximaler Intrusion

8.3 Diskussion der Ergebnisse

An dieser Stelle soll geklärt werden, wie es in den dynamischen Stoßtests zu einer geringeren Intrusion als in den quasistatischen Drucktests kommt, obwohl derselbe Energieeintrag geleistet wird. Der Grund liegt im Kraftniveau, welches nahezu über die gesamte Simulationsdauer über dem des Drucktests liegt. In diesem Bereich wird mehr Energie umgewandelt und so wird der vorgegebene Energieeintrag bereits früher erreicht. Für dieses Verhalten liegen im Wesentlichen zwei Ursachen vor. Eine Ursache liegt in der Abhängigkeit der Fließspannung der Werkstoffe von der Dehnrage, denn mit zunehmender Dehnrage steigt die Fließspannung [Rösler/Harders/Bäker 2006, S. 195]. Um diesen Einfluss zu verifizieren, zeigen die Abbildungen 8.2 und 8.4 die Kraft/Weg Kurve des dynamischen Stoßtests mit und ohne berücksichtigter Dehnrageabhängigkeit. Die Kurve mit vernachlässigter Dehnrageabhängigkeit verschiebt sich in Richtung der Kurve des quasistatischen Lastfalls, was zeigt, dass ein Einfluss der Dehnrageabhängigkeit vorhanden ist. Bemerkenswert ist, dass sich der Einfluss der Dehnrageabhängigkeit im Missbrauchstest in z-Richtung deutlicher auswirkt. Die zweite Ursache ist die Trägheit der Masse. Um die Komponenten auf die höhere Geschwindigkeit im Stoßtest zu beschleunigen, ist auch ein größerer Energiebedarf notwendig. Auch in der Versuchsserie des TÜV SÜD und Daimler, beschrieben in Unterabschnitt 4.3.2, führt der dynamische Lastfall im Vergleich zum quasistatischen Lastfall zu einer geringeren Intrusion, obwohl derselbe Energieeintrag geleistet wird. Das Kraftniveau des Stoßtests liegt dabei über dem des Drucktests, was die Beobachtungen in der Simulation bestätigt und somit das Verhalten des FE-Modells plausibel ist.

Kapitel 9

Schadenslokalisierung an Zelle und Modul

Im Zuge des vorangegangenen Kapitels wurden Missbrauchstests am FE-Modell des Batteriemoduls simuliert. Ein weiteres Ziel der vorliegenden Arbeit besteht darin, anhand solcher Simulationsergebnisse, eine Prognose von Schäden an Zelle und Modul infolge einer mechanischen Belastung zu ermöglichen. Diese Schadenslokalisierung soll im Postprozessor erfolgen, da jene Aussage im Vordergrund steht, ob Zelle und Modul die simulierte Belastung schadlos überstehen. Dazu werden innerhalb dieses Kapitels Schädigungsparameter abgeleitet, die eindeutig im Zusammenhang mit dem Schaden stehen und im Postprozessor auslesbar sind. Diese beiden Kriterien sind von allen Schädigungsparametern zu erfüllen. Folglich ermöglicht die Überprüfung dieser, Schäden an Zelle und Modul infolge einer mechanischen Belastung zu prognostizieren.

9.1 Ableitung von Schädigungsparametern zur Schadenslokalisierung an der Zelle

Innerhalb dieses Abschnitts wird die Ableitung von Schädigungsparametern zur Schadensfeststellung an der Zelle beschrieben. Dazu werden die in Abschnitt 5.2 beschriebenen Stauchversuche erneut hinsichtlich der aufgetretenen Schäden ausgewertet, um ein Bild der zu prognostizierenden Schäden und seiner Ursachen zu erstellen. Darauf aufbauend erfolgt die Festlegung des Schädigungsparameters für jeden der eingetretenen Schäden. Eine zusammenfassende Aufstellung dieser, sowie der festgelegten Parameter sind in

Tabelle 11.2 auf Seite 119 im Anhang zu finden.

9.1.1 Schäden infolge eines mechanischen Versagens

In diesem Unterabschnitt werden die Schäden infolge eines mechanischen Versagens behandelt.

Knicken der Hülle

Im Zuge der Auswertung der Stauchversuche in x- und z-Richtung in Unterabschnitt 5.2.3, wurde bereits das Knicken der Hülle und der damit verbundene Kraftabfall der Stempelkraft beschrieben. Mit dem Kraftabfall fällt auch das Energieaufnahmevermögen der Zelle in Form von innerer Energie, die durch äußere Kräfte eingebracht wird. Ab diesem Zeitpunkt folgt daher aus äußeren Kräften eine größere Deformation der Zelle, als es noch vor dem Kraftabfall der Fall war. Des Weiteren stellt das Knicken der Hülle an sich bereits einen irreversiblen Schaden der Zelle dar und ist nach den EU-CAR Gefährdungsklassen in Abbildung 4.3 als Gefährdung der Stufe 2 zu bewerten. Ziel ist es nun einen Schädigungsparameter festzulegen, der eine Prognose des Knickens der Hülle ermöglicht. Die Stauchversuche in x- und z-Richtung zeigen, dass mit dem Knicken der Hülle ein charakteristischer Verlauf der auf die Zelle wirkende Belastung verbunden ist. Dieser weist ein lokales Maximum zu jenem Zeitpunkt auf, an dem das Knicken der Hülle eintritt. Die auf die Zelle wirkende Belastung kann im Postprozessor ausgelesen werden. Durch Überprüfung dieser Belastung auf das Auftreten des lokalen Kraftmaximums, kann somit das Knicken der Hülle festgestellt werden. Die *Belastung der Zelle* wird daher als Schädigungsparameter zur Prognose dieses Schadens festgesetzt. Mit dem charakteristischen Verlauf der auf die Zelle wirkende Belastung ist auch eine charakteristische Verteilung der Druckspannungen in der Hülle verbunden. Abbildung 9.1 zeigt die Auswertung der Druckspannungen kurz vor Eintritt des Knickens der Hülle infolge der Stauchversuche in x- und z-Richtung. In beiden Beispielen treten Druckspannungskonzentrationen an jener Stelle auf, an der das Knicken der Hülle folgt. Auch die Druckspannungen in der Hülle können im Postprozessor ausgelesen werden. Durch Überprüfung dieser Spannungen auf das Auftreten von Druckspannungskonzentrationen kann somit das Knicken der Hülle prognostiziert werden. Die Druckspannungen in der Hülle werden daher als Schädigungsparameter zur Feststellung dieses Schadens festgesetzt.

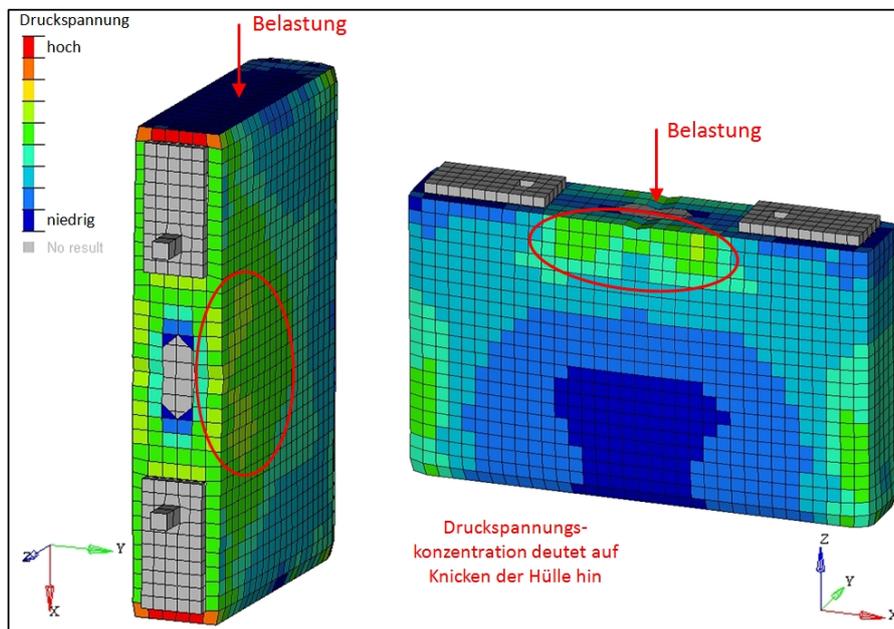


Abbildung 9.1: Druckspannungen in der Hülle bei einsetzendem Knicken dieser im Zuge der Stauchversuche in x- und z-Richtung

Bruch von Hülle und Capplate

Eine weitere Folge der Stauchversuche in x- und z-Richtung ist der Bruch von Hülle und Capplate, dargestellt in Abbildung 9.2. Der Schaden tritt jeweils an den Verbindungsstellen zwischen Hülle und Capplate infolge der mechanischen Belastung an diesen Stellen ein. Dies führt zu einem irreversiblen Schaden der Zelle, der nach den EUCAR Gefährdungsklassen in Abbildung 4.3 als Gefährdung der Stufe 2 zu bewerten ist. Ziel ist es nun einen Schädigungsparameter festzulegen, der eine Prognose des Bruchs von Hülle und Capplate ermöglicht. In der Umformtechnik werden zur Vorhersage des Umformlimits verschiedene Bruchkriterien eingesetzt. Sämtliche Alternativen haben gemeinsam, dass der Bruch dann eintreten sollte, wenn der kumulative Parameter C des jeweiligen Kriteriums seinen kritischen Wert erreicht. Das Bruchkriterium nach Freudenthal-Clift zählt zur Gruppe der Energiekriterien. Diese basieren auf der Integration der Spannung über die Vergleichsdehnung. Erreicht die durch die Integration erhaltene plastische Deformationsenergie einen kritischen Wert, sollte der Bruch eintreten. Für das Freudenthal-Clift Kriterium lässt sich dieser Grenzwert nach nachstehender Gleichung berechnen [Clift u.a. 1990, S. 1 ff.].

$$C = \int_0^{\bar{\epsilon}^f} \bar{\sigma} d\bar{\epsilon}$$

Zur Anwendung dieses Kriteriums ist lediglich die Vergleichsdehnung bei Bruch vorab zu bestimmen. Diese kann, anhand der im Zuge der Materialkartenerstellung durchgeführten Zugversuche, durch Vermessung der Bruchfläche nach nachstehender Gleichung ermittelt werden [Winklhofer/Trattnig 2008, S. 32]. Ein tendenziell ähnliches Kriterium soll daher zur Prognose des Bruchs von Hülle und Capplate herangezogen werden.

$$\bar{\varepsilon}_f = \ln \left(\frac{A_0}{A_f} \right)$$

Umgesetzt wird dieses über die errechnete plastische Vergleichsdehnung, die mit der wahren Bruchdehnung ins Verhältnis gesetzt wird. Aufgrund der Normierung mit der wahren Bruchdehnung ergibt sich als Grenzwert der Wert 1, bei dem der Schaden eintreten sollte. Das Verhältnis kann im Postprozessor durch eine benutzerdefinierte Variable, in PAM-Crash GRUC, ausgewertet werden. Durch Überprüfung des Verhältnisses auf Überschreitung des Grenzwerts von 1, kann somit der Bruch von Hülle und Capplate prognostiziert werden. Die *errechnete plastische Vergleichsdehnung über der wahren Bruchdehnung* wird daher als Schädigungsparameter zur Prognose dieses Schadens festgelegt. Abbildung 9.2 zeigt die Auswertung dieses Parameters für die Stauchversuche in x- und z-Richtung. In beiden Beispielen werden neben jenen Gebieten, die tatsächlich vom Schaden betroffen sind, auch weitere Gebiete markiert. Der Grund hierfür liegt in der Tatsache, dass die Spannungsmehrachsigkeit, siehe dazu Abbildung 11.1 auf Seite 121 im Anhang, bei den Energiekriterien nicht berücksichtigt wird. Das bedeutet, dass Elemente die von einer Stauchung betroffen sind, gleich behandelt werden, wie Elemente die von einer Streckung betroffen sind [Clift u.a. 1990, S. 1 ff.]. Der Bruch tritt bei duktilen Materialien vorrangig infolge von Zugbelastungen ein, da diese das Porenwachstum begünstigen, welches schlussendlich zum Bruch führt [Anderson 1991, S. 307]. Die hier beschriebene Schadenslokalisierung stellt somit eine konservative Möglichkeit dar, die unter Anbetracht der vorhandenen Versuchsdaten aber zweckmäßig ist. Zur Einschränkung der markierten Gebiete, sind die Elementdicken im Postprozessor auszuwerten. Nimmt die Dicke eines Elements ab, deutet dies auf eine Dehnung hin und in weiterer Folge auf den Bruch. Da, wie beim Bruch von Hülle und Capplate an der Verbindungsstelle, die Gebiete in denen es zu einer Dehnung kommt klein sind, gegenüber der gewählten Elementkantenlänge, empfiehlt es sich das Elementnetz an den kritischen Stellen zukünftig zu verfeinern. Als Anhaltspunkt kann die Elementkantenlänge aus der Literatur von 2,5 mm, zur Abbildung eines Risses in einer Batteriehülle, herangezogen werden [Sahraei u.a. 2010, S. 8].

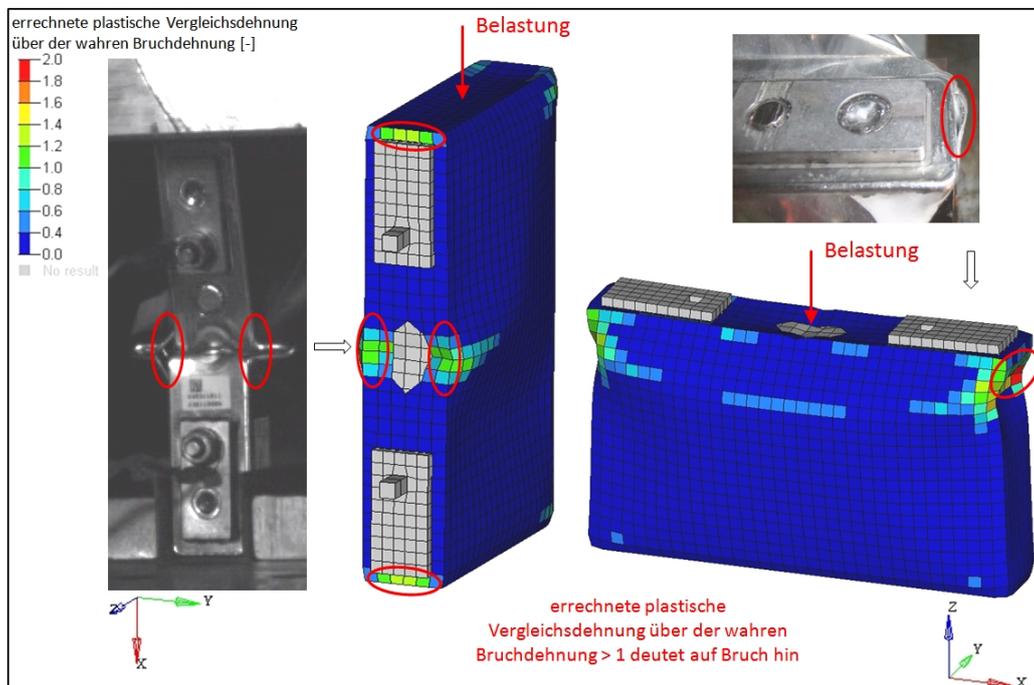


Abbildung 9.2: Errechnete plastische Vergleichsdehnung über der wahren Bruchdehnung bei einsetzendem Bruch von Hülle und Capplate im Zuge der Stauchversuche in x- und z-Richtung

Versagen der Verbindung Polplatte/Capplate

Im Zuge der Auswertung der Stauchversuche in y-Richtung in Unterabschnitt 5.2.3, wurde bereits auf das Versagen der Verbindung zwischen Polplatte und Capplate auf der Seite des Pluspols eingegangen, siehe dazu Abbildung 9.3. Der Schaden tritt infolge der mechanischen Belastung der Verbindung ein und führt zu einem irreversiblen Schaden der Zelle, der nach den EUCAR Gefährdungsklassen in Abbildung 4.3 als Gefährdung der Stufe 2 zu bewerten ist. Ziel ist es nun einen Schädigungsparameter festzulegen, der eine Prognose des Versagens der Verbindung zwischen Polplatte und Capplate ermöglicht. Bei dieser Verbindung handelt es sich um eine Clinchverbindung. Sie ist bevorzugt auf Scherzug zu belasten, wobei auch eine Belastung auf Kopfzug möglich ist, allerdings weist die Verbindung hierbei eine geringere Verbindungsfestigkeit auf. Beide Lastfälle können bis zu einer bestimmten Haltekraft ertragen werden, die von der Fügung abhängig ist [Matthes/Riedel 2003, S. 262]. Da diese Verbindung mittels Tied Kontakts modelliert ist, kann die Belastung des Tied Verbinders Polplatte/Capplate im Postprozessor ausgewertet werden. Durch Überprüfung dieser Belastung

auf Überschreitung der zulässigen Haltekraft, kann somit das Versagen der Verbindung zwischen Polplatte und Capplate prognostiziert werden. Die *Belastung des Tied Verbinders Polplatte/Capplate* wird daher als Schädigungsparameter zur Prognose dieses Schadens festgelegt. Die zulässige Haltekraft ist abhängig von der Fügung mittels Versuchen zu bestimmen.



Abbildung 9.3: Versagen der Verbindung zwischen Polplatte und Capplate im Zuge der Stauchversuche in y-Richtung

9.1.2 Schäden infolge eines elektrischen Versagens

Im Zuge dieses Unterabschnitts werden die Schäden infolge eines elektrischen Versagens behandelt.

Innerer Kurzschluss

Innerhalb der Auswertung der Stauchversuche in Abschnitt 5.2, wurde in jede Belastungsrichtung ein innerer Kurzschluss und der damit verbundene Spannungsabfall festgestellt. Im Zuge der Stauchversuche in x- und z-Richtung folgte dem Kurzschluss das Entgasen der Zelle unter Rauchentwicklung, was nach den EUCAR Gefährdungsklassen in Abbildung 4.3 mit einer Gefährdung der Stufe 4 zu bewerten ist. In den Stauchversuchen in y-Richtung folgte dem Kurzschluss ein explosionsartiges Entgasen der Zelle mit Flammenbildung. Mit diesem Effekt konnte auch der Kraftabfall der Stempelkraft in Verbindung gebracht werden, der zur selben Zeit auftrat. Die Folgen des Kraftabfalls und warum dieser als Schaden zu deklarieren ist, wurde bereits in Unterabschnitt 9.2.1 diskutiert, im Zuge der Prognose des Knickens der Hülle. Das explosionsartige Entgasen mit Flammenbildung ist nach den EUCAR Gefährdungsklassen mit einer Gefährdung der Stufe 5 zu bewerten. Ziel ist es nun einen Schädigungsparameter festzulegen, der eine Prognose des inneren Kurzschlusses ermöglicht. Die Stauchversuche zeigen, dass der Schaden

bei Überschreitung einer bestimmten Stauchung der Zelle eintritt. Des Weiteren lässt sich die Stauchung der Zelle auch im Postprozessor auslesen. Da die Stauchung bei Schadenseintritt streut, ist ein geeigneter Grenzwert für die zulässige Stauchung zu finden. Dazu soll die geringste Stauchung bei Schadenseintritt für die jeweilige Belastungsrichtung gewählt werden, um einen möglichst konservativen Grenzwert zu erhalten. Durch Überprüfung der Stauchung auf Überschreitung der zulässigen Stauchung, kann somit dieser Schaden prognostiziert werden. Die *Stauchung der Zelle* wird daher als Schädigungsparameter zur Prognose dieses Schadens festgelegt. Die Wahrscheinlichkeit, dass der innere Kurzschluss dann auch wirklich eintritt, ist von der Belastungsrichtung abhängig. Der Varianzkoeffizient als Maß für die Streuung der Stauchung bei Schadenseintritt beträgt in x-Richtung 34,2 %, in y-Richtung 2,1 %, und in z-Richtung 42,9 %.

Äußerer Kurzschluss

Im Zuge der Auswertung der Stauchversuche in y-Richtung in Unterabschnitt 5.2.3, wurde bereits auf den äußeren Kurzschluss und dem damit verbundenen Spannungsabfall eingegangen. Zu einem äußeren Kurzschluss führt der Kontakt zwischen zwei stromleitenden Komponenten der Zelle, die eine Potentialdifferenz aufweisen. In diesem Fall tritt der Schaden infolge des Kontakts zwischen Polplatte am Minuspol und der Pluspotential führenden Capplate ein, da die Verbindung zwischen diesen beiden Komponenten versagt, siehe Abbildung 9.4. Dieses Versagen tritt infolge der mechanischen Belastung der Verbindung ein. Da dies zu einem irreversiblen Schaden an der Zelle führt, ist dieser nach den EUCAR Gefährdungsklassen mit einer Gefährdung der Stufe 2 zu bewerten. Ziel ist es nun einen Schädigungsparameter festzulegen, der eine Prognose des Versagens der Verbindung zwischen Polplatte und Capplate ermöglicht, um in weiterer Folge auch auf den äußeren Kurzschluss schließen zu können. Die Problemstellung entspricht somit jener aus Unterabschnitt 9.2.1, die bereits im Zuge der Prognose des Versagens der Verbindung zwischen Polplatte und Capplate am Pluspol behandelt wurde. Da auch diese Verbindung mittels Tied Kontakts modelliert ist, ist das Vorgehen zur Schadenslokalisierung analog. Durch Überprüfung der Belastung des Tied Verbinders Polplatte/Capplate auf Überschreitung der zulässigen Belastung, kann somit das Versagen der Verbindung prognostiziert werden. Die *Belastung des Tied Verbinders Polplatte/Capplate* wird daher als Schädigungsparameter zur Prognose dieses Schadens und in weiterer Folge zur Feststellung des äußeren Kurzschlusses festgelegt. Die zulässige Belastung ist im Zuge von Versuchen zu ermitteln.



Abbildung 9.4: Äußerer Kurzschluss an der Verbindung von Polplatte und Capplate infolge des Versagens der Verbindung zwischen diesen Komponenten im Zuge der Stauchversuche in y-Richtung

9.2 Ableitung von Schädigungsparametern zur Schadenslokalisierung am Modul

Innerhalb dieses Abschnitts wird die Ableitung von Schädigungsparametern zur Schadensfeststellung am Modul beschrieben. Die Parameter zur Schadenslokalisierung an der Zelle können zur Prognose von Schäden an den im Modul verbauten Zellen direkt angewendet werden. Ausständig sind somit nur noch die Schädigungsparameter zur Prognose von Schäden an spezifischen Komponenten des Moduls. Dazu werden die in Kapitel 8 simulierten Missbrauchstests erneut hinsichtlich potentieller Schäden ausgewertet, um wieder ein Bild der zu prognostizierenden Schäden und seiner Ursachen zu erstellen. Die Festlegung der Schädigungsparameter für jeden der potentiellen Schäden erfolgt darauf aufbauend. Tabelle 11.3 auf Seite 120 im Anhang fasst diese und die festgelegten Schädigungsparameter zusammen.

9.2.1 Schäden infolge eines mechanischen Versagens

Als Erstes werden wieder die Schäden infolge eines mechanischen Versagens behandelt.

Bruch von Spannband, Gaskollektor und Zellverbinder

Im Zuge der Simulation der Missbrauchstests in Abschnitt 8.2 waren insbesondere das Spannband an der Impaktor zugewandten Seite, der Gaskollektor sowie die Zellverbinder von der Deformation betroffen. Ein Bruch dieser Komponenten infolge der mechanischen Belastung ist daher in Betracht zu

ziehen. Ziel ist es nun einen Schädigungsparameter festzulegen, der eine Prognose des Bruchs von Spannband, Gaskollektor und Zellverbinder ermöglicht. Die Problemstellung entspricht somit jener zur Feststellung des Bruchs von Hülle und Capplate aus Unterabschnitt 9.2.1, womit auch das Vorgehen zur Schadenslokalisierung analog ist. Durch Überprüfung der *errechneten plastischen Vergleichsdehnung über der wahren Bruchdehnung* auf Überschreitung des Grenzwerts von 1, kann der Bruch von Spannband, Gaskollektor und Zellverbinder prognostiziert werden. Das Verhältnis wird daher als Schädigungsparameter zur Prognose dieses Schadens festgelegt. Die Anmerkungen zu diesem, die in Abschnitt 8.2 getroffen wurden, gelten ebenfalls analog. Abbildung 9.5 zeigt die Auswertung des Parameters für den quasistatischen Drucktest in x-Richtung. In diesem Beispiel wird der Grenzwert an keiner Stelle überschritten, weshalb von keinem Bruch von Spannband, Gaskollektor und Zellverbinder auszugehen ist.

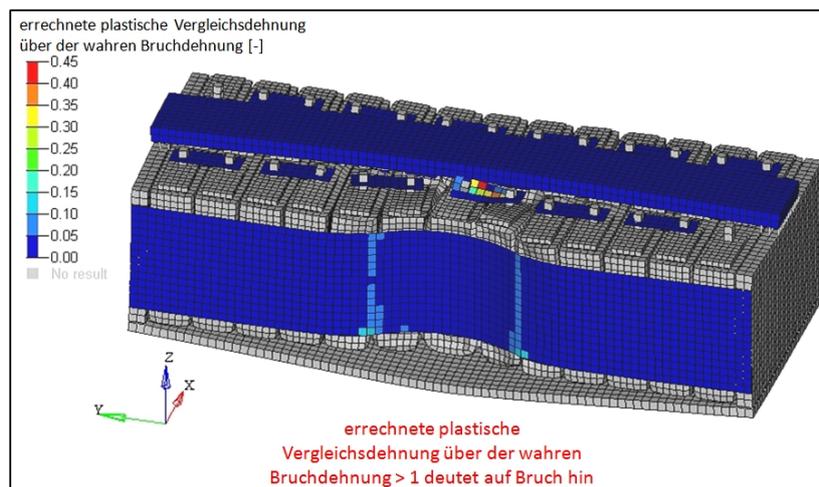


Abbildung 9.5: Errechnete plastische Vergleichsdehnung über der wahren Bruchdehnung bei maximaler Intrusion im Zuge des quasistatischen Drucktests in x-Richtung

Versagen von Verbindungselementen

Die Auswertung der Stauchversuche in Abschnitt 5.2 lässt den Schluss zu, dass die Verbindungselemente der Zellen häufig von Schäden betroffen sind. Verbindungselemente liegen am Modul in Form der Verbindung zwischen Spannband und Spannplatte, zwischen Gaskollektor und Spannplatte und zwischen Kühlplatte und Spannplatte vor. Ein Versagen dieser Verbindungs-

elemente ist daher in Betracht zu ziehen. Ziel ist es nun einen Schädigungsparameter festzulegen, der eine Prognose des Versagens der Verbindungselemente des Moduls ermöglicht. Die Problemstellung ist somit analog zur Feststellung des Versagens der Verbindung zwischen Polplatte und Capplate in Unterabschnitt 9.2.1. Da auch sämtliche Verbindungselemente mittels Tied Kontakts modelliert sind, kann das Vorgehen zur Schadenslokalisierung aus Unterabschnitt 9.2.1 übernommen werden. Durch Überprüfung der Belastung des Tied Verbinders auf Überschreitung der zulässigen Belastung, kann das Versagen der Verbindungselemente prognostiziert werden. Die *Belastung des Tied Verbinders* wird daher als Schädigungsparameter zur Prognose dieses Schadens festgelegt. Die zulässige Belastung ist im Zuge von Versuchen zu ermitteln.

Versagen der Dichtverbindung

Im Zuge der Simulation der Missbrauchstests in Abschnitt 8.2 waren auch die Dichtflächen der Dichtungen zwischen dem Gaskollektor und den einzelnen Zellen von der Deformation betroffen. Bei der Modellierung dieser wurde von lösbaren Flächendichtungen zwischen ruhenden Bauteilen ausgegangen, in Form von Weichstoffdichtungen, da diese die gebräuchlichste Variante darstellen. Um die Dichtheit dieser Dichtungen zu gewährleisten ist eine bestimmte Dichtungskraft erforderlich, die mittels Versuchen in Abhängigkeit des Innendrucks zu ermitteln ist. Zusätzlich wird ein gleichmäßiger Pressungsverlauf entlang der Dichtungslinie vorausgesetzt [Matek u.a. 2000, S. 626 ff.]. Infolge der Deformation der Dichtflächen, ist der Verlust des erforderlichen Pressungsverlaufs denkbar und ein Versagen der Dichtverbindungen ist daher in Betracht zu ziehen. Ziel ist es nun einen Schädigungsparameter festzulegen, der eine Prognose dieses Schadens ermöglicht. Der Kontaktdruck kann im Postprozessor ausgewertet werden. Durch Überprüfung dieses Drucks auf Einhaltung des erforderlichen Pressungsverlaufs, kann somit das Versagen der Dichtverbindungen festgestellt werden. Der *Kontaktdruck* wird daher als Schädigungsparameter zur Prognose dieses Schadens festgelegt. Abbildung 9.6 zeigt die Auswertung dieses Parameters für den quasistatischen Drucktest in x-Richtung. In diesem Beispiel weist die mittlere vergrößert dargestellte Dichtung keine geschlossene Dichtungslinie auf, während die rechte vergrößert dargestellte Dichtung ihre Dichtungskraft vollständig verliert. Von einem Versagen mehrerer Dichtverbindung ist daher auszugehen.

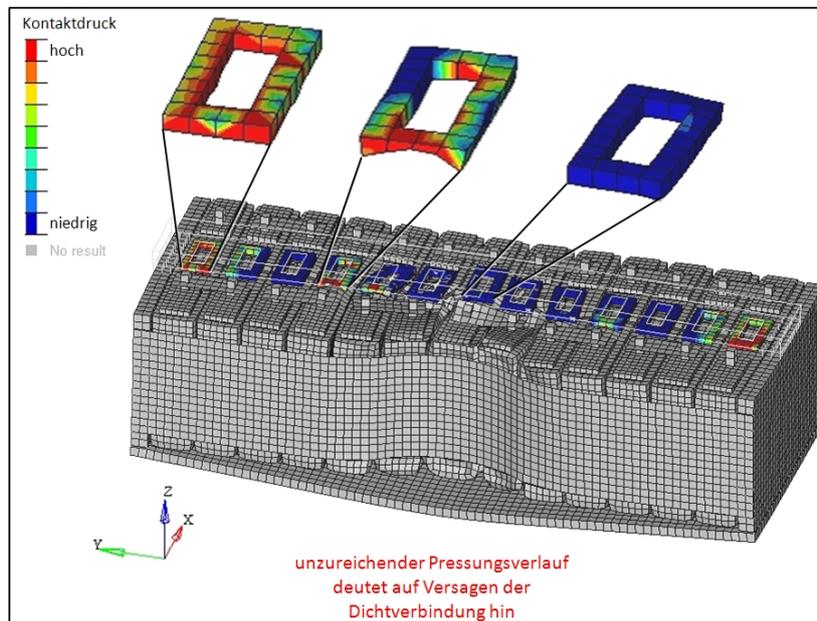


Abbildung 9.6: Kontaktdruck auf die Dichtungen bei maximaler Intrusion im Zuge des quasistatischen Drucktests in x-Richtung

9.2.2 Schäden infolge eines elektrischen Versagens

In weiterer Folge werden wieder die Schäden infolge eines elektrischen Versagens behandelt.

Äußerer Kurzschluss

Im Zuge der Simulation der Missbrauchstests in x-Richtung in Abschnitt 8.2 führte die Intrusion des Impaktors zum Kontakt eines Zellverbinders mit dem Gaskollektor. Mit der Erhöhung der Intrusion treten weitere Zellverbinder mit dem Gaskollektor in Kontakt und werden über diesen stromleitend verbunden. Da die betroffenen Komponenten eine Potentialdifferenz aufweisen, ist ein äußerer Kurzschluss in Betracht zu ziehen. Ziel ist es nun einen Schädigungsparameter festzulegen, der eine Prognose des äußeren Kurzschlusses infolge des Kontakts von stromleitenden Komponenten mit Potentialdifferenz ermöglicht. Der Kontakt zweier Komponenten führt zu einem Kontakt-*druck* zwischen diesen, der im Postprozessor ausgelesen werden kann. Durch Überprüfung dieses Drucks auf sein Vorhandensein zwischen stromleitenden Komponenten mit Potentialdifferenz, kann somit der äußere Kurzschluss festgestellt werden. Der *Kontakt-**druck*** wird daher als Schädigungsparameter zur

Prognose dieses Schadens festgelegt. Abbildung 9.7 zeigt die Auswertung dieses Parameters für den quasistatischen Drucktest in x-Richtung. Die farbige Darstellung erleichtert die Überprüfung auf Kontakt, gegenüber der Überprüfung anhand des Deformationsbilds alleine. Zur Prognose des äußeren Kurzschlusses ist zusätzlich noch das Potential der betroffenen Komponenten zu klären.

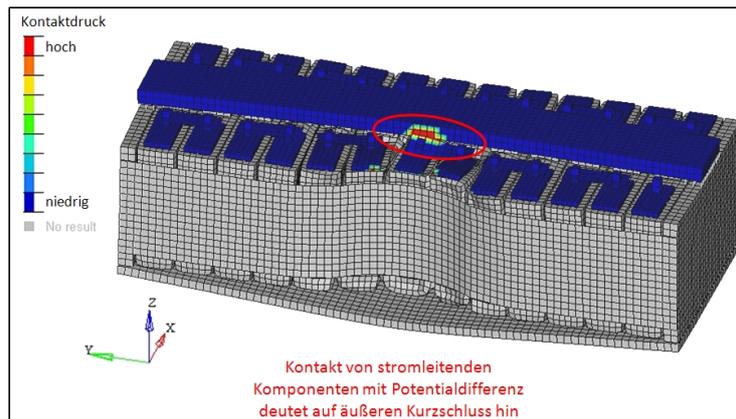


Abbildung 9.7: Kontaktdruck bei maximaler Intrusion im Zuge des quasistatischen Drucktests in x-Richtung

Der in Abschnitt 8.2 simulierte Missbrauchstest in x-Richtung führte auch zu einer Relativbewegung der Zellen untereinander. Durch die Vorspannung des Zellstapels begünstigt, ist ein Versagen des Isolierlacks an der Hüllenoberfläche in Betracht zu ziehen, das in weiterer Folge zu einem äußeren Kurzschluss führen kann. Ziel ist es nun einen Schädigungsparameter festzulegen, der eine Prognose des Versagens des Isolierlacks ermöglicht, um in weiterer Folge auch auf den äußeren Kurzschluss schließen zu können. An dieser Stelle wird angenommen, dass das Versagen des Isolierlacks infolge einer Belastung auf Scherung eintritt. Die Scherspannung an der Hüllenoberfläche kann im Postprozessor ausgelesen werden. Durch Überprüfung dieser Spannung auf Überschreitung der zulässigen Scherspannung, die in Versuchen zu ermitteln ist, kann somit das Versagen des Isolierlacks festgestellt werden. Die *Scherspannung an der Hüllenoberfläche* wird daher als Schädigungsparameter zur Prognose dieses Schadens und in weiterer Folge zur Feststellung des äußeren Kurzschlusses festgelegt.

Kapitel 10

Modellbewertung

In den vorangegangenen Kapiteln wurde der Aufbau des FE-Modells der Batteriezelle und des darauf aufbauenden Batteriemoduls beschrieben, sowie die Erstellung von Materialkarten behandelt. Ebenfalls wurden Missbrauchstests simuliert und Schädigungsparameter zur Schadenslokalisierung an Zelle und Modul abgeleitet. An dieser Stelle gilt es nun die Ergebnisse und Aussagen bewertend zusammenzufassen und die nächsten Schritte zur Weiterentwicklung aufzuzeigen. Dazu werden innerhalb dieses Kapitels einerseits das FE-Modell hinsichtlich der Abbildbarkeit des Verhaltens von Zelle und Modul und andererseits die festgelegten Schädigungsparameter zur Schadenslokalisierung evaluiert.

10.1 Evaluation des FE-Modells

Innerhalb dieses Abschnitts wird das FE-Modell diskutiert, hinsichtlich der Abbildbarkeit des Verhaltens von Zelle und Modul. Dies erfolgt für Zelle und Modul getrennt, aufgrund der unterschiedlichen Basen auf der diese Modelle aufbauen.

Diskussion des Zellmodells

Das Zellmodell wird anhand der Stauchversuche und deren Simulation in Kapitel 5 diskutiert. Das Ausknickverhalten und der damit verbundene Kraftverlauf der Versuche in x- und z-Richtung ist maßgeblich durch Hülle und Capplate bestimmt und lässt sich über diese Komponenten prinzipiell abbilden. Insbesondere in x-Richtung kann das Verhalten bis über den ersten Schadenseintritt hinaus abgebildet werden. In z-Richtung kann der erste

Kraftanstieg abgebildet werden, dann übersteigt jedoch die Maximalkraft in der Simulation jene der Realversuche. Daher ist dieser Versuch, der bisher der Validierung diente, ebenfalls zur Abstimmung von Hülle und Capplate heranzuziehen, um das Ausknickverhalten in z-Richtung besser abzubilden. Der Abbildbarkeit des Kraftverlaufs über Hülle und Capplate sind jedoch auch Grenzen gesetzt. In weiterer Folge hat dessen Abbildung auch über den Innenkörper zu erfolgen, wofür seine CAD Daten zu beschaffen sind. Im Gegensatz dazu ist der Kraftverlauf der Versuche in y-Richtung maßgeblich durch das Zellmaterial bedingt und lässt sich über dieses prinzipiell abbilden. Insgesamt kann das Verhalten bis zum Eintreten des ersten Schadens abgebildet werden. Die darauf folgende Abnahme des kontinuierlichen Kraftanstiegs wurde im FE-Modell nicht berücksichtigt, da dieses Verhalten nicht ausschließlich mechanischer Natur ist und dessen Ursache noch zu klären ist. Denkbar ist, dass der Spannungsabfall mit diesem Verhalten in Verbindung steht, da der SOC das Volumen des Zellmaterials beeinflusst. Ist dieses Verhalten zu implementieren, ist für das Zellmaterial ein alternatives Materialmodell zu wählen, das auch die Modellierung eines Kraftabfalls ermöglicht. Im Zuge der Materialkartenerstellung ist das Material der Hülle zusätzlich zu prüfen, ob die Annahme einer vernachlässigbaren Anisotropie gültig ist, da es sich hierbei um eine tiefgezogene Komponente handelt und daher ein wesentliches anisotropes Materialverhalten möglich ist.

Diskussion des Modulmodells

Nach der Simulation des Missbrauchstests in Kapitel 8 kann festgehalten werden, dass das Modulmodell in der Lage ist, bekannte Effekte abzubilden, wie die unterschiedliche Intrusionstiefe abhängig von der Belastungsart. Auch ist es robust gegen unterschiedliche Lastfälle, womit es sich zur Simulation von Missbrauchstests eignet. Das generische Modulmodell erfüllt somit seinen Zweck, eine Methode zur Modellierung eines Batteriemoduls aufzuzeigen.

10.2 Evaluation der Schadenslokalisierung

Im Zuge dieses Abschnitts werden die abgeleiteten Schädigungsparameter zur Schadenslokalisierung diskutiert, inwieweit diese die Prognose von Schäden an Zelle und Modul infolge einer mechanischen Belastung ermöglichen. Insgesamt konnten für sämtliche eruierte Schäden Schädigungsparameter gefunden werden, womit eine Prognose dieser prinzipiell möglich ist. In dieser

Aussage steckt die Einschränkung der Schadenslokalisierung, dass diese einerseits nur für eruierte Schäden möglich ist. Während die Schäden an der Zelle anhand der Stauchversuche eruiert wurden, und die Auflistung dieser daher als vollständig zu betrachten ist, wurden die Schäden am Modul anhand der Simulation von Missbrauchstests eruiert. Diese Auflistung ist daher im Zuge von Versuchen am Modul auf ihre Vollständigkeit zu überprüfen. Die zweite Einschränkung der Schadenslokalisierung unterscheidet sich nach dem zu prognostizierenden Schaden, weshalb diese im Folgenden getrennt voneinander betrachtet werden.

Schäden infolge eines mechanischen Versagens

Als Erstes wird das *Knicken der Hülle* betrachtet. Die Schädigungsparameter Belastung der Zelle und Druckspannungen in der Hülle ermöglichen eine zuverlässige Prognose des Schadens in den Beispielen in Unterabschnitt 9.2.1. Von einer zuverlässigen Prognose in anderen Lastfällen ist daher auszugehen. Auch die Prognose des *Bruchs* wird durch den Schädigungsparameter errechnete plastische Vergleichsdehnung über die wahre Bruchdehnung in den Beispielen in Unterabschnitt 9.2.1 ermöglicht. Die Prognose ist konservativ, denn neben den von Schaden betroffenen Gebieten werden auch weitere markiert, aufgrund der unberücksichtigten Spannungsmehrachsigkeit. Zur Einschränkung der markierten Gebiete sind die Elemente zusätzlich auf Dehnung zu überprüfen. Es empfiehlt sich dazu, dass Elementnetz an den kritischen Stellen zu verfeinern. Stellt dies eine zu starke Einschränkung zur Prognose des Schadens dar, sind weitere Materialversuche zur Ermittlung von Parametern durchzuführen, um ein Kriterium implementieren zu können, welches die Spannungsmehrachsigkeit berücksichtigt. Das *Versagen von Verbindungselementen* soll durch den Schädigungsparameter Belastung des Tied Verbinders prognostiziert werden. Dazu ist die zulässige Belastung noch mittels Versuchen zu ermitteln. An dieser Stelle sei erwähnt, dass sich beispielsweise die Auswertung der Belastung des Tied Verbinders Polplatte/Capplate auf die gesamte Verbindung bezieht. Stellt diese Tatsache eine zu starke Einschränkung zur Prognose dieses Schadens dar, ist auf den in Abschnitt 5.4.4 behandelten Verbinder PLink zurückzugreifen. Dieser ermöglicht die Auswertung für jede Clinchverbindung getrennt. Als Nächstes wird das *Versagen der Dichtverbindung* behandelt. Der Schädigungsparameter Kontaktdruck auf die Dichtungen soll die Prognose des Schadens ermöglichen, was im Beispiel in Unterabschnitt 9.2.1 exemplarisch gezeigt wird. Zur Prognose ist der erforderliche Pressungsverlauf der Dichtungen noch mittels Versuchen zu ermitteln.

Schäden infolge eines elektrischen Versagens

Der *innere Kurzschluss* soll durch den Schädigungsparameter Stauchung der Zelle prognostiziert werden. An dieser Stelle sei betont, dass sich die Grenzwerte auf die Lastfälle in den Stauchversuchen beziehen. Es ist daher mittels Versuchen zu überprüfen, ob die Grenzwerte auch auf andere Lastfälle übertragbar sind, in denen es zu einer Stauchung in die jeweilige Richtung kommt. Falls dies eine zu große Einschränkung darstellt, ist der Mechanismus der zum inneren Kurzschluss führt genauer zu untersuchen, um einen Schädigungsparameter ableiten zu können, der in einem engeren Zusammenhang mit dem inneren Kurzschluss steht. Die Prognose des *äußeren Kurzschlusses* ist abhängig von seiner Ursache. Einerseits tritt der äußere Kurzschluss infolge des Versagens der Verbindung zwischen Polplatte und Capplate auf der Seite des Minuspols ein. Die Prognose des Schadens wird dann über den Schädigungsparameter Belastung des Tied Verbinders ermöglicht, womit die Anmerkungen zum Versagen von Verbindungselementen analog gelten. Des Weiteren tritt der äußere Kurzschluss infolge des Kontakts von stromleitenden Komponenten mit Potentialdifferenz ein. Die Prognose des Schadens wird in diesem Fall durch den Schädigungsparameter Kontaktdruck zwischen den stromleitenden Komponenten mit Potentialdifferenz ermöglicht, was im Beispiel in Unterabschnitt 9.2.1 exemplarisch gezeigt wird. Bei der Bewertung des Potentials der stromleitenden Komponenten gilt es zu beachten, dass Hülle und Capplate der Zellen mit einem Isolierlack überzogen sind, um weitere Konstellationen für einen äußeren Kurzschluss zu verhindern. Auch kann der äußere Kurzschluss infolge des Versagens dieses Isolierlacks eintreten. Die Prognose des Schadens soll dann durch den Schädigungsparameter Scherspannung an der Hüllenoberfläche prognostiziert werden. Dazu ist die zulässige Scherspannung des Isolierlacks noch mittels Versuchen zu ermitteln.

Kapitel 11

Zusammenfassung und Ausblick

Abschließend werden innerhalb dieses Kapitels die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zusammengefasst und hinsichtlich der Erreichung der in Abschnitt 1.1 vereinbarten Meilensteine überprüft. Zu Beginn des Projekts wurden Stauchversuche an der Zelle durchgeführt, anhand dieser die abzubildenden mechanischen Eigenschaften der Zelle gewonnen wurden. Mit der Simulation der Stauchversuche wurden, mittels Vergleichs der simulierten Ergebnisse mit jenen der Realversuche, die Haupteinflussfaktoren auf das Verhalten der Zelle ermittelt. So ist das Ausknickverhalten und das damit verbundene Kraftniveau in x- und z-Richtung des Versuchs maßgeblich durch Hülle und Capplate bestimmt, während der Kraftverlauf in y-Richtung des Versuchs maßgeblich durch das Zellmaterial bestimmt ist. Der Schwerpunkt der Modellierung der Zelle wurde daher auf diese Komponenten und auf die Clinchverbindung zwischen Polplatte und Capplate gelegt. Zur Beschreibung des Zellmaterials fiel die Wahl auf das Materialmodell #41 und zur Modellierung der Verbindung wurde ein Tied Kontakt eingesetzt. Mit der Parametrisierung dieser Komponenten anhand der Versuche, ist das FE-Modell der Batteriezelle in der Lage, die mechanischen Eigenschaften der Zelle abzubilden. Darauf aufbauend wurde das generische FE-Modell des Batteriemoduls aufgebaut. Der Schwerpunkt der Modellierung lag hierbei in einer effizienten Umsetzung der Verspannung des Moduls. Diese wurde in der Reihenfolge Vorspannung des Zellstapels, Vorspannung des Gaskollektors und Entlastung des Moduls als dreistufige Simulation gelöst. Durch das Zellmodell als Basis, ist das Modulmodell ebenfalls in der Lage die mechanischen Eigenschaften des Moduls abzubilden. Des Weiteren wurde der Bedarf an Materialkarten zur Abbildung des Materialverhaltens der Batteriekomponenten erhoben. Im Zuge des Projekts wurde die Materialkarte für das Material X5CrNi18-10 erstellt, während die übrigen Materialkarten vom Projektpartner bezogen und

auf Eignung überprüft wurden. Damit ist der Bedarf an Materialkarten für das Erste gedeckt. In weiterer Folge wurden Missbrauchstests nach TÜV Süd und Daimler simuliert. Die Simulation zeigte, dass das FE-Modell in der Lage ist bekannte Effekte aus der Versuchsserie von TÜV Süd und Daimler abzubilden und somit zur Simulation von Missbrauchstests tauglich ist. Darauf aufbauend wurden die Stauchversuche sowie die Simulation der Missbrauchstests erneut hinsichtlich der aufgetretenen Schäden ausgewertet. Nun wurden Schädigungsparameter abgeleitet, die, durch Auswertung dieser im Postprozessor, eine Prognose über das Eintreten von Schäden ermöglichen. Insgesamt konnten für sämtliche eruierte Schäden Schädigungsparameter gefunden werden, womit eine Prognose dieser prinzipiell möglich ist. Abschließend wurden die Ergebnisse evaluiert, um die Einschränkungen des FE-Modells hinsichtlich der Abbildbarkeit des Verhaltens und der Prognose von Schäden an Zelle und Modul festzustellen. Es kann zusammengefasst werden, dass die vereinbarten Meilensteine somit erfüllt wurden.

Im Zuge der Modellbewertung wurden auch die nächsten Schritte zur weiterführenden Modellierung elektrischer Energiespeicher aufgezeigt. Diese lassen sich dahingehen zusammenfassen, dass die Basis auf der die vorliegende Arbeit aufbaut zu erweitern ist. Dies betrifft die Durchführung weiterer Versuche. Zum einen sind Versuche an Zelle und Modul selbst notwendig, um das FE-Modell anhand weiterer Lastfälle validieren zu können. Zum anderen sind Komponentenversuche notwendig, um die zulässigen Belastungen dieser feststellen zu können, was zur Bestimmung der Grenzwerte der Schädigungsparameter und damit der Erweiterung der Prognosefähigkeit der Schadenslokalisierung dient. Des Weiteren sind jene Materialkarten auf Basis von Materialversuchen am Rohmaterial des Moduls zu erstellen, die bisher vom Projektpartner bezogen wurden.

Literaturverzeichnis

- [Anderson 1991] Anderson, T. L.: *Fracture Mechanics. Fundamentals and Applications*. Boca Raton: CRC Press, 1991.
- [Bady/Biermann 2000] Bady, Ralf; Biermann, Jan-Welm: *Hybrid- Elektrofahrzeuge. Strukturen und zukünftige Entwicklungen*. - Aachen: Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen, 2000.
- [BMW-Group 2010] BMW-Group: *BMW Group Innovationstage 2010. Mobilität der Zukunft*. - München: BMW-Group, 2010.
- [Borck/Eberleh/Raiser 2010] Borck, Felix; Eberleh, Bjoern; Raiser, Stephen: *Lithium-Ionen-Batterie. Hochintegriertes Modul als Systemgrundlage*. In: ATZ Elektronik 4/2010, S. 8-13.
- [Bremer 2010] Bremer, Wolfgang: *INS-Projekt. Normungsbedarf für alternative Antriebe und Elektromobilität*. - Ettlingen: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2010.
- [Bunkley 2011] Bunkley, Nick: *Batteries in Electric Cars Examined After Chevy Volt Fire* (2011). http://www.nytimes.com/2011/11/12/business/energy-environment/regulators-examine-electric-car-batteries-after-fire.html?_r=1 (29.01.2012)
- [carhs 2011] carhs: *Safety Companion 2011*. - Alzenau: carhs, 2011.
- [Clift u.a. 1990] Clift, S. E.; Harley, P.; Sturgess, C. E. N.; Rowe, G.W.: *Fracture prediction in plastic deformation processes*. In: International Journal of Mechanical Sciences 32 (1), S. 1-17.

- [Doughty/Crafts 2006] Doughty, Daniel H.; Crafts, Chris C.: *Freedom CAR. Electrical Energy Storage System Abuse Test Manual for Electric and Hybrid Electric Vehicle Applications*. - Albuquerque; Livermore: Sandia National Laboratories, 2006.
- [Doege/Meyer/Saeed 1986] Doege, Eckart; Meyer-Nolkemper, Heinz; Saeed, Imtiaz: *Fließkurvenatlas metallischer Werkstoffe*. - München; Wien: Hanser Verlag, 1986.
- [ESI-Group 2009] ESI-Group: *Solver Notes Manual*. - Paris: ESI-Group, 2009.
- [Graz 2010] Graz: *Graz ist Modellregion für E-Mobility (2010)*. [http:// www.graz.at/ cms/ beitrag/ 10157778/ 2767110/](http://www.graz.at/cms/beitrag/10157778/2767110/) (29.01.2012)
- [Hofmann 2010] Hofmann, Peter: *Hybridfahrzeuge*. - Wien: Springer Verlag, 2010.
- [Jossen/Weydanz 2006] Jossen, Andreas; Weydanz, Wolfgang: *Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen*. - Untermeitingen: Inge Reichardt Verlag, 2006.
- [Klein 2010] Klein, Bernd: *FEM. Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau, 8. Auflage*. - Wiesbaden: Vieweg & Teubner Verlag, 2010.
- [Kramer 2006] Kramer, Florian: *Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen, 2. Auflage*. - Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, 2006.
- [Lamm u.a. 2009] Lamm, Arnold; Warthmann, Wolfgang; Soczka-Guth, Thomas; Kaufmann, Rainer; Spier, Bernd; Friebe, Peter; Stuis, Heiko; Mohrdieck, Christian: *Lithium-Ionen-Batterie. Erster Einsatz im S 400 Hybrid*. In: ATZ Elektronik 7-8/2009, S. 490-499.
- [Marwede/Knoll 2010] Marwede, Max; Knoll, Michael: *Dossier Elektromobilität und Dienstleistungen*. - Berlin: Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, 2010.

- [Matek u.a. 2000] Matek, Wilhelm; Muhs, Dieter; Wittel, Herbert; Becker, Manfred; Jannasch, Dieter: *Roloff/Matek Maschinenelemente. Normung, Berechnung, Gestaltung, 14. Auflage.* - Braunschweig/Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, 2000.
- [Matthes/Riedel 2003] Matthes, Klaus-Jürgen; Riedel, Frank: *Fügetechnik. Überblick - Löten - Kleben - Fügen durch Umformen.* - Leipzig: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2003.
- [Meywerk 2007] Meywerk, Martin: *CAE-Methoden in der Fahrzeugtechnik.* - Berlin; Heidelberg: Springer Verlag, 2007.
- [Rösler/Harders/Bäker 2006] Rösler, Joachim; Harders, Harald; Bäker, Martin: *Mechanisches Verhalten der Werkstoffe, 2. Auflage.* - Wiesbaden: B. G. Teubner Verlag; GWV Fachverlage GmbH, 2006.
- [Sahraei u.a. 2010] Sahraei, Elham; Wierzbicki, Tomasz; Hill, Rich; Luo, Meng: *Crash Safety of Lithium-Ion Batteries Towards Development of a Computational Model.* - Warrendale: SAE International, 2010.
- [Toyota o.J.] Toyota: *Technology File* (o.J.). [http:// www.toyota-global.com/ innovation/ environmental_ technology/ technology_ file/](http://www.toyota-global.com/innovation/environmental_technology/technology_file/) (30.01.2012)
- [Wech u.a. 2011] Wech, Lothar; Richter, Richard; Justen, Rainer; Schöneburg, Rodolfo: *Crash Safety Aspects of HV Batteries for Vehicles.* - Deutschland: TÜV SÜD Automotive GmbH; Daimler AG, MercedesCar Group, 2011
- [Wilde 2008] Wilde, Andreas: *Eine modulare Funktionsarchitektur für adaptives und vorausschauendes Energiemanagement in Hybridfahrzeugen.* - München: Technische Universität München, 2008.
- [Winklhofer/Trattnig 2008] Winklhofer, Johannes; Trattnig, Gernot: *Innovative und anwendungsgerechte Materialcharakterisierung für die Crashsimulation.* - Graz: Kompetenzzentrum - Das virtuelle Fahrzeug, Forschungsgesellschaft mbH, 2008.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Terminschiene zur Erreichung der Projektziele	15
2.1	Verteilung der CO_2 Emissionen der EU-15 im Jahr 2005 auf die verursachenden Sektoren [Hofmann 2010, S. 3]	18
2.2	Entwicklung der verschiedenen Antriebsformen für Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen weltweit [Hofmann 2010, S. 13]	19
2.3	Unterschiedliche Formen des Antriebsstrangs von Hybridfahrzeugen [Toyota o.J.]	20
3.1	Grundprinzip der elektrochemischen Zelle im Fall der Entladung [Hofmann 2010, S. 152]	25
3.2	Vergleich von Energie- und Leistungsdichte der im automotiven Bereich eingesetzten Energiespeicher [Wilde 2008, S. 9]	26
3.3	Grundprinzip der Lithium Ionen Batterie bei Ladung und Entladung [Hofmann 2010, S. 164]	28
3.4	Prismatische Lithium Ionen Zelle [Jossen/Weydanz 2006, S. 106]	29
4.1	Überblick über die Straßenverkehrssicherheit [Kramer 2006, S. 3]	31
4.2	Überblick über die Crash Gesetze in Europa und den USA [carhs 2011, S. 16]	33
4.3	EUCAR Gefährdungsklassen zur Bewertung der Reaktion der elektrischen Energiespeicher auf die Missbrauchstests [Doughty/Crafts 2006, S. 15]	35
4.4	Texturierte Platte für den quasistatischen Drucktest [Doughty/Crafts 2006, S. 17]	36

4.5	Versuchsaufbau für den quasistatischen Drucktest und für den dynamischen Stoßtest [Wech u.a. 2011, S. 3]	37
4.6	Vergleich des quasistatischen Drucktests mit den dynamischen Stoßtests an der Mercedes ML450 Hybrid Lithium Ionen Batterie [Wech u.a. 2011, S. 6]	38
5.1	Lithium-Ionen Batteriezelle nach VDA Standard mit ihren Abmaßen und der Benennung der wesentlichen Komponenten .	40
5.2	Versuchsaufbau der Stauchversuche in z-Richtung	43
5.3	Verläufe der Stempelkraft und der Zellspannung über dem Stempelweg bei den Stauchversuchen in x-Richtung	44
5.4	Deformationsverhalten der Zelle beim Stauchversuch #4 in x-Richtung	44
5.5	Verläufe der Stempelkraft und der Zellspannung über dem Stempelweg bei den Stauchversuchen in y-Richtung	46
5.6	Deformationsverhalten der Zelle beim Stauchversuch #2 in y-Richtung	46
5.7	Verläufe der Stempelkraft und der Zellspannung über dem Stempelweg bei den Stauchversuchen in z-Richtung	47
5.8	Deformationsverhalten der Zelle beim Stauchversuch #8 in z-Richtung	48
5.9	Berechnungsgeometrie der Batteriezelle	49
5.10	Elementnetz der Batteriezelle	50
5.11	Simulationsmodell des Stauchversuchs in y-Richtung	51
5.12	Simulationsergebnisse der Stauchversuche ohne Zellmaterial im Vergleich mit den jeweiligen Realversuchen	52
5.13	Parameter des Materialmodells #41 zur Beschreibung des einachsigen Zug/Druck Verhaltens [ESI-Group 2009, S. 223] . . .	53
5.14	Simulationsergebnis des Stauchversuchs in y-Richtung im Vergleich mit den jeweiligen Realversuchen nach erfolgter Parametrisierung des Zellmaterials	56
5.15	Simulationsergebnis des Stauchversuchs in x-Richtung im Vergleich mit den jeweiligen Realversuchen nach erfolgter Abstimmung von Hülle und Capplate	58

5.16	Ausknickverhalten der Simulation der Stauchversuche in x- und y-Richtung im Vergleich mit den jeweiligen Realversuchen nach erfolgter Abstimmung von Hülle und Capplate	58
5.17	Simulationsergebnis des Stauchversuchs in z-Richtung im Vergleich mit den jeweiligen Realversuchen zur Validierung	60
5.18	Ausknickverhalten der Simulation des Stauchversuchs in z-Richtung im Vergleich mit dem jeweiligen Realversuch zur Validierung	61
6.1	Berechnungsgeometrie des Batteriemoduls	63
6.2	Elementnetz des Batteriemoduls	64
6.3	Simulationsmodell zur Vorspannung des Zellstapels	66
6.4	Vergleich der Möglichkeiten zur Vorspannung des Zellstapels	67
6.5	Auswirkung der Simulationsdauer auf die Vorspannung des Zellstapels	68
6.6	Simulationsmodell zur Vorspannung des Gaskollektors	69
6.7	Ergebnis der Vorspannung des Gaskollektors und Verteilung der Vorspannkraft auf ausgewählte Dichtungen	70
6.8	Simulationsmodell zur Entlastung des Moduls	71
6.9	Ergebnis der Entlastung des Moduls und Verteilung der Vorspannkraft auf ausgewählte Dichtungen	72
6.10	Auswirkung der unterschiedlichen Reduktionsmöglichkeiten anfänglicher Durchdringungen auf die Vorspannung des Zellstapels bei Entlastung des Moduls	73
7.1	Zugprobe aus dem Material X5CrNi18-10	78
7.2	Ergebnis der Zugversuche für das Material X5CrNi18-10	78
7.3	Vergleich der quasistatischen Fließkurve basierend auf Materialversuchen am Rohmaterial des Batteriemoduls, mit jener Fließkurve des Projektpartners für das Material X5CrNi18-10	81
7.4	Vergleich des Simulationsergebnisses des quasistatischen Drucktests in x-Richtung mit der Materialkarte basierend auf Materialversuchen am Rohmaterial des Batteriemoduls, mit jenem Ergebnis mit der Materialkarte des Projektpartners für das Material X5CrNi18-10	82

8.1	Simulationsmodell des quasistatischen Drucktests und des dynamischen Stoßtests in x-Richtung	85
8.2	Vergleich des Simulationsergebnisses des quasistatischen Drucktests in x-Richtung, mit jenem Ergebnis des jeweiligen dynamischen Stoßtests	87
8.3	Simuliertes Deformationsverhalten bei quasistatischer Versuchsdurchführung in x-Richtung, bei maximaler Intrusion	87
8.4	Vergleich des Simulationsergebnisses des quasistatischen Drucktests in z-Richtung, mit jenem Ergebnis des jeweiligen dynamischen Stoßtests	89
8.5	Simuliertes Deformationsverhalten bei quasistatischer Versuchsdurchführung in z-Richtung, bei maximaler Intrusion	89
9.1	Druckspannungen in der Hülle bei einsetzendem Knicken dieser im Zuge der Stauchversuche in x- und z-Richtung	93
9.2	Errechnete plastische Vergleichsdehnung über der wahren Bruchdehnung bei einsetzendem Bruch von Hülle und Capplate im Zuge der Stauchversuche in x- und z-Richtung	95
9.3	Versagen der Verbindung zwischen Polplatte und Capplate im Zuge der Stauchversuche in y-Richtung	96
9.4	Äußerer Kurzschluss an der Verbindung von Polplatte und Capplate infolge des Versagens der Verbindung zwischen diesen Komponenten im Zuge der Stauchversuche in y-Richtung	98
9.5	Errechnete plastische Vergleichsdehnung über der wahren Bruchdehnung bei maximaler Intrusion im Zuge des quasistatischen Drucktests in x-Richtung	99
9.6	Kontaktdruck auf die Dichtungen bei maximaler Intrusion im Zuge des quasistatischen Drucktests in x-Richtung	101
9.7	Kontaktdruck bei maximaler Intrusion im Zuge des quasistatischen Drucktests in x-Richtung	102
11.1	Abhängigkeit der plastischen Vergleichsdehnung bei Versagen von der Spannungsmehrachsigkeit und der Elementkantenlänge [Winklhofer/Trattnig 2008, S. 16]	121
11.2	Auszug aus der elektrochemischen Spannungsreihe [Jossen/Weydanz 2006, S. 15]	122

11.3 Überblick über Verbraucherschutztests in Europa und den USA
[carhs 2011, S. 21] 123

Tabellenverzeichnis

5.1	Versuchsportfolio zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften der Zelle	41
11.1	Materialien und Komponenten des FE-Modells der Batteriezelle und des Batteriemoduls, sowie dessen abzubildendes Verhalten	118
11.2	Zusammenfassung der Schädigungsparameter zur Schadenslokalisierung an der Zelle	119
11.3	Zusammenfassung der Schädigungsparameter zur Schadenslokalisierung am Modul	120

Anhang

Tabelle 11.1: Materialien und Komponenten des FE-Modells der Batteriezelle und des Batteriemoduls, sowie dessen abzubildendes Verhalten

Material	Komponente	Elastisch-Plastisches Verhalten	Dehnratenabhängigkeit	Anisotropie
(Zellmaterial)	Zellmaterial	+	-	+
AW-1050A	Hülle Capplate Polplatte Kühlplatte	+	-	-
X5CrNi18-10	Spannband GaskollektorU Pol Spannplatte	+	+	-
DC04	GaskollektorO	+	+	-
PP EPDM TV20	Dichtung	+	+	-
Cu99,9	Zellverbinder	+	-	-

Tabelle 11.2: Zusammenfassung der Schädigungsparameter zur Schadenslokalisierung an der Zelle

	Schaden	Schädigungsparameter	Grenzwert
mechanisches Versagen	Knicken der Hülle	a) Belastung der Zelle b) Druckspannungen in der Hülle	a) lokales Kraftmaximum b) Druckspannungskonzentration
	Bruch von Hülle und Capplate	errechnete plastische Vergleichsdehnung über der wahren Bruchdehnung	1
elektrisches Versagen	Versagen der Verbindung Polplatte/Capplate	Belastung des Tied Verbinders Polplatte/Capplate	zulässige Haltekraft (in Versuchen zu ermitteln)
	Innerer Kurzschluss	Stauchung der Zelle	geringste Stauchung bei Schadenseintritt
	Äußerer Kurzschluss (infolge des Versagens der Verbindung Polplatte/Capplate)	Belastung des Tied Verbinders Polplatte/Capplate	zulässige Belastung (in Versuchen zu ermitteln)

Tabelle 11.3: Zusammenfassung der Schädigungsparameter zur Schadenslokalisierung am Modul

	Schaden	Schädigungsparameter	Grenzwert
mechanische Ursache	Bruch von Spannband, Gaskollektor und Zellverbinder	errechnete plastische Vergleichsdehnung über der wahren Bruchdehnung	1
	Versagen von Verbindungselementen	Belastung des Tied Verbinders	zulässige Belastung (in Versuchen zu ermitteln)
	Versagen der Dichtverbindung	Kontaktdruck	erforderlicher Pressungsverlauf (in Versuchen zu ermitteln)
elektrische Ursache	Äußerer Kurzschluss (infolge des Kontakts von stromleitenden Komponenten mit Potentialdifferenz)	Kontaktdruck	Kontaktdruck zwischen stromleitenden Komponenten mit Potentialdifferenz vorhanden
	Äußerer Kurzschluss (infolge des Versagens des Isolierlacks)	Scherspannung an der Hüllenoberfläche	zulässige Scherspannung (in Versuchen zu ermitteln)

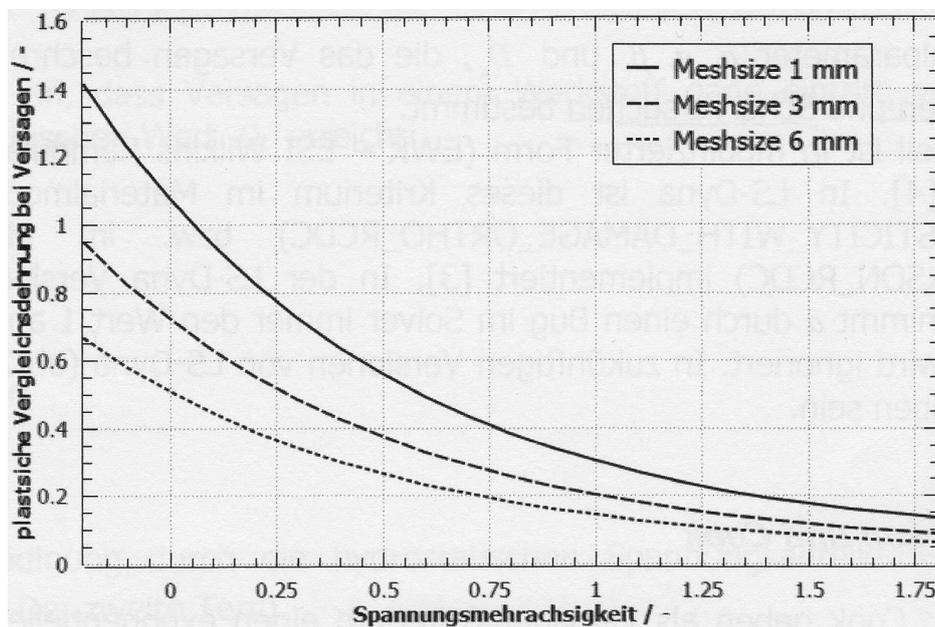


Abbildung 11.1: Abhängigkeit der plastischen Vergleichsdehnung bei Versagen von der Spannungsmehrachsigkeit und der Elementkantenlänge [Winklhofer/Trattng 2008, S. 16]

reduzierte Form		oxidierte Form	Ladungen	Potential in V_{SHE}
Li	↔	Li ⁺	+ e ⁻	-3.01
K	↔	K ⁺	+ e ⁻	-2.92
Ca	↔	Ca ²⁺	+ 2 e ⁻	-2.84
Na	↔	Na ⁺	+ e ⁻	-2.71
Al	↔	Al ³⁺	+ 3 e ⁻	-1.66
Mn	↔	Mn ²⁺	+ 2 e ⁻	-1.05
Zn	↔	Zn ²⁺	+ 2 e ⁻	-0.76
Fe	↔	Fe ²⁺	+ 2 e ⁻	-0.44
Cd	↔	Cd ²⁺	+ 2 e ⁻	-0.40
Ni	↔	Ni ²⁺	+ 2 e ⁻	-0.23
Pb	↔	Pb ²⁺	+ 2 e ⁻	-0.13
½ H ₂	↔	H ⁺	+ e ⁻	0.00
Cu	↔	Cu ²⁺	+ 2 e ⁻	0.34
Cu	↔	Cu ⁺	+ e ⁻	0.52
Hg	↔	Hg ²⁺	+ 2 e ⁻	0.80
Ag	↔	Ag ⁺	+ e ⁻	0.80
2 Br	↔	Br ₂	+ 2 e ⁻	1.07
2 H ₂ O	↔	O ₂ +4H ⁺	+ 4 e ⁻	1.23
2 Cl ⁻	↔	Cl ₂	+ 2 e ⁻	1.36
2 F ⁻	↔	F ₂	+ 2 e ⁻	2.87

Abbildung 11.2: Auszug aus der elektrochemischen Spannungsreihe [Jossen/Weydanz 2006, S. 15]

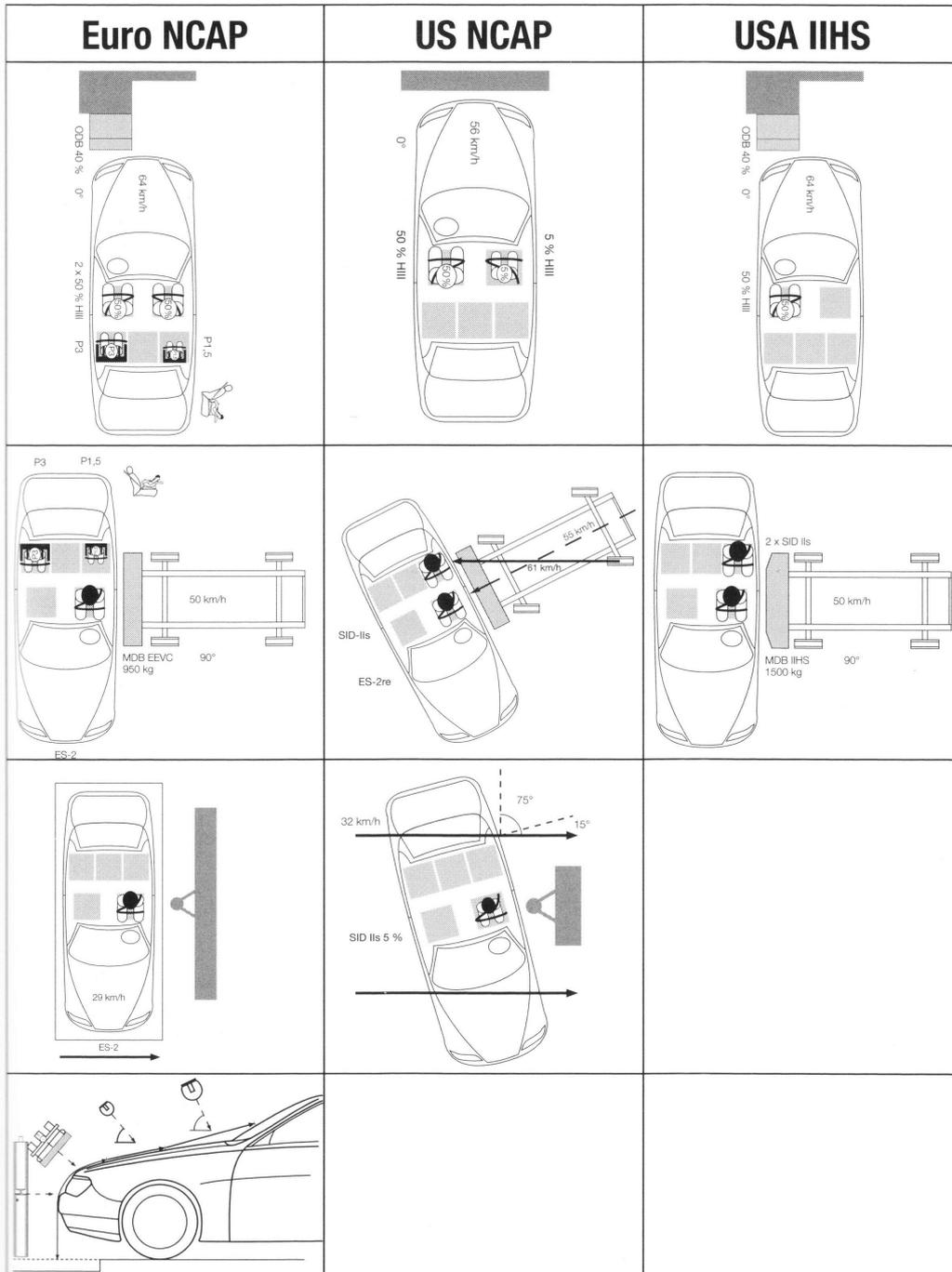


Abbildung 11.3: Überblick über Verbraucherschutztests in Europa und den USA [carhs 2011, S. 21]