



Bernhard Lichtenegger

Entwicklung eines Finite Elemente Modells zur Untersuchung der mechanischen Eigenschaften von lithiumbasierenden Batterien

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

Durchgeführt am Institut für Fahrzeugsicherheit [Member of Frank Stronach Institute]

TU-Graz Dekanat für Maschinenbau

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

Betreuer: Dipl.-Ing. Dr. techn. Gregor Gstrein

Graz, Mai 2012



Inhalt

Inhalt	I
Eidesstattliche Erklärung	III
Danksagung	IV
Liste der verwendeten Abkürzungen und Einheiten	V
Kurzfassung	VII
Abstract	IX
1 Einleitung	1
2 Energiespeicher im automotiven Bereich	3
2.1 Speichersysteme im Überblick	3
2.2 Funktionsweise von Batterien	4
2.2.1 Bauformen von Lithium-Ionen-Batterien	6
2.3 Gefahrenquellen von Lithium-Ionen-Batterien	6
2.4 Trends in der Entwicklung von lithiumbasierenden Energiespeichern	8
2.5 Integration von Lithium-Ionen-Batterien in Fahrzeugsimulationsmodelle	10
2.5.1 Anforderungen eines FE-Batteriemodells im Fahrzeug	10
3 Simulationsmethoden zur Abbildung einer Batterie	12
3.1 Angewandte Simulationsmethode	14
3.2 Vereinfachungen in der Modellerstellung	15
4 Analyse der Einzelkomponenten	17
4.1 Verwendete Lithium-Ionen-Batterie	17
4.2 Materialbestimmung	19
4.3 Schichtdickenuntersuchung	22
4.4 Methoden zur Ermittlung der Materialeigenschaften	27
4.4.1 Zugversuch allgemein	27
4.5 Durchführung des Zugversuchs und Ergebnisse	28
4.6 Durchführung des Durchbiegungsversuchs und Ergebnisse	44
5 Simulation der Einzelkomponenten	47
5.1 Geeignete Materialmodelle	47
5.2 Aufbau Simulationsmodell	52
5.3 Validierung Simulation/Versuch	55
6 Zusammenführen der Einzelkomponenten zu einem Gesamtmodell	64
6.1 Aufbau Gesamtmodell	64
6.2 Interaktion zwischen den Lagen	66
7 Zellenversuche	71
7.1 Erstellung einer Prüfmatrix für die Gesamtzellenversuche	71
7.1.1 Prüfmatrix für die ungeladenen Zellenversuche	71
7.1.2 Prüfmatrix für die geladenen Zellenversuche	72

Inhalt

7.2	Prinzipversuche am Prüfstand Werkstattpresse ERBA 5	73
7.3	Prüfstand PRESTO 420	77
7.4	Durchführung der Zelltests und Ergebnisse	79
7.5	Validierung Simulation/Zelltests	88
8	Zusammenfassung der Ergebnisse	98
9	Ausblick	99
10	Anhang	100
11	Abbildungsverzeichnis	108
12	Tabellenverzeichnis	111
13	Literaturverzeichnis	112

Eidesstattliche Erklärung

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

Graz, am

.....
(Unterschrift)

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

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich besonders bei meinem Betreuer Dr. Gregor Gstrein bedanken, der mich während meiner Diplomarbeit umfangreich unterstützt und für meine zahlreichen Fragen stets ein offenes Ohr hatte.

Ich bedanke mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Fahrzeugsicherheit für die gute Zusammenarbeit und das angenehme Arbeitsklima. Ganz besonders danke ich hier Dr. Florian Feist für die vielen Hilfestellungen und richtungsweisenden Ratschläge bezüglich der Finite-Elemente-Simulation. Weiters möchte ich mich bei Dipl.-Ing. Christian Ellersdorfer bedanken, der einen maßgeblichen Anteil zur erfolgreichen Durchführung der Arbeit beitrug und mir bei dem einen oder anderen Problem stets mit Rat und Tat zur Seite stand.

Für die Möglichkeit, meine Arbeit am Institut für Fahrzeugsicherheit erstellen zu können, danke ich Prof. Hermann Steffan.

Vielen Dank an Dr. Wolfgang Sinz und Martina für das Korrekturlesen meiner Arbeit.

Nicht zuletzt gilt mein besonderer und tiefer Dank meinen Eltern, die mir mein Studium ermöglicht haben und mich nicht nur finanziell unterstützten, sondern immer auch offen für meine Anliegen waren.

Liste der verwendeten Abkürzungen und Einheiten

Ah	Amperestunde (elektrische Ladung)
AIT	Austrian Institute of Technology
C	Elektrische Kapazität
CAD	Computer Aided Design
CFC	Channel Frequency Class
Co	Kobalt
°C	Temperatur (Grad Celsius)
DB	Diamantspannbacken
DIN	Deutsches Institut für Normung
FE	Finite Elemente
FEM	Finite Elemente Methode
g	Gramm (Masse)
GB	Gummispannbacken
kg	Kilogramm (Masse)
kN	Kilonewton (Kraft)
Li ⁺	Lithiumkationen
LiMO ₂	Lithium-M-Oxid; das M steht für Co, Ni oder Mn
LiPF ₆	Lithiumhexafluorophosphat (Elektrolyt)
mm/min	Millimeter pro Minute (Geschwindigkeit)
mm/s	Millimeter pro Sekunde (Geschwindigkeit)
m	Meter (Länge)
Mn	Mangan
mm	Millimeter (Länge)
ms	Millisekunden (Zeit)
mΩ	Milliohm (elektrischer Widerstand)
N/mm ²	Newton pro Quadratmillimeter (Spannung, Elastizitätsmodul)
N	Newton (Kraft)
Ni	Nickel
PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
SAE	Society of Automobile Engineers
SEI	Solid Electrolyt Interface
Si	Silizium
SOC	State of Charge
V	Volt (elektrische Spannung)
VSI	Vehicle Safety Institute

Abkürzungen und Einheiten

Wh	Wattstunde (Energie)
Wh/kg	Wattstunde pro Kilogramm (Energiedichte)
Wh/L	Wattstunde pro Liter (Energiedichte)
μm	Mikrometer (Länge)

Kurzfassung

Die zunehmende Umweltbelastung durch den Automobilssektor in den letzten Jahren erfordert vermehrt Ansätze, um diese schädlichen Emissionen nachhaltig zu reduzieren. Eine Möglichkeit diese zu reduzieren sind Hybrid- sowie reine Elektrofahrzeuge, mit denen eine nahezu schadstofffreie Fortbewegung möglich ist. Um dies zu erreichen, wird die Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität immer wichtiger, wobei der sichere Betrieb von Elektrofahrzeugen während dem „normalen“ Fahrbetrieb, aber auch und insbesondere im Fall eines Unfalles, eine wesentliche Herausforderung darstellt.

Die vorliegende Diplomarbeit behandelt die Untersuchung der mechanischen Eigenschaften einer Lithium-Ionen-Batterie im Realversuch, welche in weiterer Folge in der Finite-Elemente-Simulation abgebildet wurden. Das vorliegende Modell könnte zukünftig in die Gesamtfahrzeugsimulation integriert werden, um das Verhalten des Energiespeichers infolge eines Crashes virtuell abschätzen zu können.

Die untersuchte Zelle gehört zu den Lithium-Polymer-Zellen d.h. sie besitzt einen festen bzw. gelartigen Elektrolyt und findet im Modellbausektor ihre Anwendung. Sie ist aber hinsichtlich ihrer Zellchemie mit Traktionsbatterien (Energiespeicher für den Automobilbereich) vergleichbar. Auch vom Aufbau her entspricht die untersuchte Zelle typischen Speichersystemen, die in Elektrofahrzeugen zum Einsatz kommen.

In der vorliegenden Arbeit werden daher keine allgemein gültigen Ergebnisse abgeleitet, die Gültigkeit der getroffenen Aussagen beschränkt sich ausschließlich auf die verwendete Lithium-Polymer-Pouchzelle.

Im ersten Schritt wurde der Aufbau des Energiespeichers analysiert. Dafür wurde die Zelle im ungeladenen Zustand geöffnet, um die einzelnen Lagen detaillierter untersuchen zu können. So wurde die Anzahl der Bestandteile ermittelt sowie eine Materialbestimmung durchgeführt. Die Schichtdicken der Batteriekomponenten konnten durch ein Lichtmikroskop festgestellt werden, die Art der Metallschicht (Kupfer, Aluminium) wurde im Rasterelektronenmikroskop bestimmt. Um die mechanischen Eigenschaften jeder einzelnen Lage abbilden zu können, wurden mechanische Prinzipversuche geplant und durchgeführt. Dafür wurde beispielsweise eine Reihe von Zugversuchen herangezogen, mit denen es möglich war, die notwendigen Materialparameter bestimmen zu können. Die gewonnenen Werte lieferten die Eingabewerte für die Materialkarten in der Simulation. Nach dieser

Validierung wurde Schritt für Schritt ein Gesamtmodell der Zelle aufgebaut. Parallel dazu galt es, sich eine geeignete Prüfmatrix für die Gesamtzelle zu überlegen, um das Gesamtmodell entsprechend validieren zu können. Im Zuge dessen wurde ein Prüfstand konzipiert (1), mit dem die Versuche an der Gesamtzelle im geladenen und ungeladenen Zustand durchgeführt werden konnten. Nach erfolgreicher Absolvierung der Tests erfolgte die Validierung des Simulationsmodells anhand von Versuchsdaten, wobei bei einem großen Spektrum an unterschiedlichen Belastungskonfigurationen eine sehr gute Übereinstimmung der Versuchs- bzw. Simulationsergebnisse erreicht werden konnte.

Mit dem in dieser Arbeit entwickelten Simulationsmodell können nun die Belastungen der einzelnen Komponenten der Batterie untersucht und anhand dieser eventuell kritische Bereiche in der Zelle identifiziert werden. In weiterer Folge könnte das entwickelte Finite-Elemente-Batteriemodell zu einem bzw. mehreren Batteriemodulen zusammengefasst und in ein virtuelles Fahrzeug eingebaut werden, um beispielsweise Prognosen über sicherheitstechnische Aspekte abgeben zu können.

Abstract

The increasing relevance of environmental pollution caused by motor vehicles requires attempts to reduce vehicles' noxious emissions. One approach to reduce emissions are hybrid- and fully electric vehicles which are enabling low emission mobility. As a result research and development in the area of the electric mobility gains importance, whereas the safe operation of electric vehicles under "normal" driving conditions, in cases of misuse and in case of accident is a major challenge.

This diploma thesis deals with the experimental investigation of the mechanical properties of a lithium ion cell and with the modelling in a finite element simulation code. Ultimately the cell's finite element model shall be integrated into a battery, a module or a full-vehicle model. Such, it will be possible to predict the mechanical behaviour of cell, battery and module under crash loading.

The cell under study is a lithium polymer cell characterized by a firm or gel-like electrolyte. It commonly finds application in R/C models, nonetheless, the cell is comparable to those used automotive traction batteries with respect to cell chemistry, design, size and capacity.

In the present work no generally valid results are derived, all statements exclusively apply to the used lithium polymer pouchcell.

Firstly, the design of the battery was analysed. The cell was fully discharged, stripped and each single component was carefully examined. The number of the electrodes was counted and material properties were characterized by tensile-testing. The thickness of each single layer was determined by light microscopy, metal layers were more closely examined and identified (copper, aluminium) by grid electron microscopy. To establish the mechanical properties of every single part, experiments were planned and carried out. Numerous tensile tests were conducted to obtain the material parameters required for the finite element model. Each single layer's FE-material card was validated by simulating the tensile tests. Eventually, a model of the complete cell was set up. A suitable set of experimental tests was required to validate the cell's model properly. A test bench for the charged and uncharged cell tests was designed and constructed (1) enabling a variety of bending and crushing tests. After successful completion of the experimental tests, using charged and uncharged cell, the cell's FE model was validated. Simulations and experiments correlated very well with respect to the various load configurations. With the developed finite elements-cell model loads for

each single component could be investigated and give possible reasonable predictions of critical states of the battery. In the future, the developed finite elements-cell model might find application in battery, module and full-vehicle simulations and help to improve the safety of vehicles using Li-traction batteries.

1 Einleitung

Hintergrund

In Zeiten von steigenden Energiepreisen und immer strengeren Regulierungen bezüglich dem Schadstoff- und CO₂-Ausstoß bei Fahrzeugen, ist die Elektrifizierung des Antriebsstranges von Fahrzeugen ein wichtiges Ziel in der Entwicklung der Automobilindustrie. Ein wesentlicher Einflussfaktor ist dabei das Gefahrenpotenzial (z.B. Explosionsgefahr durch Überladen der Zelle), das durch den Einsatz von Lithium-Ionen Batterien entsteht und so gut wie möglich minimiert werden muss. Derzeit werden die Energiespeicher in sehr robusten Gehäusen verbaut und ins Fahrzeug integriert, um die Energieträger bestmöglich gegen Deformierungen, die im Falle eines Unfalles auftreten, schützen zu können. Derartige mechanische Belastungen können im schlimmsten Fall zu einer unerwünschten Reaktion der Zelle (z.B. Kurzschluss, Brand) führen. Dieser robuste Einbau wirkt sich jedoch nachteilig auf die Fahrzeuggesamtmasse und in weiterer Folge auch auf die Reichweite des Automobils aus. Deshalb wird aktuell intensiv danach geforscht, inwieweit Traktionsbatterien mechanischen Belastungen standhalten können, ohne dabei das Risiko für ein Versagen (z.B. Brand) der Zellen zu erhöhen.

Beschreibung

Der zunehmende Verkehr und der damit verbundene Ausstoß von CO₂ zählen zu den Hauptverursachern des Treibhauseffekts. Eine Möglichkeit, um diesem Trend entgegenzuwirken, sind alternative Antriebskonzepte für Kraftfahrzeuge wie Hybrid- oder Elektroantriebe. Diese zukunftsweisenden Technologien stellen die Fahrzeughersteller aktuell vor neue Herausforderungen. Eine dieser Herausforderungen ist die Untersuchung der eingesetzten Energiespeicher bezüglich deren maximaler mechanischer Belastbarkeit, bei welcher noch keine Gefahr ausgeht, um in weiterer Folge das Fahrzeug so leicht wie möglich bauen zu können.

Ein Ansatz zur Ermittlung der Grenzbelastungen, welcher im Zuge dieser Diplomarbeit aufgegriffen wird, ist die Entwicklung eines Finite-Elemente-Modells von Lithium-Ionen Batterien. Eine Grundanforderung an dieses Modell ist dabei die richtige Abbildung des mechanischen Verhaltens der Batterie. Dafür ist es notwendig, das Verhalten der Einzelkomponenten in der Zelle zu untersuchen, um daraus in weiterer Folge ein mögliches Versagen der gesamten Zelle vorhersagen zu können.

In dieser Diplomarbeit soll näher auf die Entwicklung eines numerischen Simulationsmodells einer Lithium-Ionen-Batterie eingegangen werden. Die durchgeführten numerischen Simulationen werden anhand von Prinzipversuchen mit ganzen Zellen oder nur Einzelkomponenten validiert.

Durchführung

Der Gesamtumfang der Arbeit lässt sich in folgende Bereiche einteilen:

- Recherche über mögliche Simulationsmethoden zur Abbildung des Verformungsverhaltens einer Lithium-Ionen Batterie
- Analyse möglicher Materialmodelle zur Abbildung der Einzelkomponenten, Bestimmung der notwendigen Inputparameter für die Simulation
- Ableitung von notwendigen Materialtests zur Bestimmung der erforderlichen Materialparameter (z.B.: Zugversuch, ...)
- Durchführung der Zugversuche mit den einzelnen Lagen unter Berücksichtigung des Einflusses des Elektrolyts (trockene und feuchte Versuche), Abbildung der Versuche in der Simulation
- Aufbau eines Prüfstandes zur Untersuchung des mechanischen Verhaltens der gesamten Batterie unter quasistatischen Lasten (z.B.: 3-Punkt-Biegung, ...)
- Durchführung von Tests mit geladenen und ungeladenen Zellen, Ableitung eines Finite-Elemente-Modells für die betrachtete Lithium-Ionen Batterie, Korrelation der Simulation mit den Versuchsergebnissen
- Dokumentation

2 Energiespeicher im automotiven Bereich

Im folgenden Kapitel werden zunächst mögliche Energiespeichersysteme im Automobilbereich vorgestellt. Danach sollen der prinzipielle Aufbau und die Gefahrenquellen von Lithium-Ionen-Batterien näher betrachtet werden. Folglich werden Gründe diskutiert, weshalb eine Integration von lithiumbasierenden Energiespeichern in Gesamtfahrzeugsimulationsmodellen von Bedeutung ist und erläutert, welche Anforderungen sich daraus an ein Finite-Elemente-Modell im Fahrzeug ergeben.

2.1 Speichersysteme im Überblick

Das folgende Kapitel ist inhaltlich aus (2) entnommen. Grundsätzlich gibt es heutzutage verschiedene Möglichkeiten Energie zu speichern. Der „klassische“ Energiespeicher im Automobilbereich ist nach wie vor der Kraftstofftank mit den meist verwendeten Energieträgern Diesel und Benzin. Durch die zunehmende Elektrifizierung des Antriebsstranges werden jedoch auch vermehrt andere Speicher eingesetzt, wie zum Beispiel Sekundärbatterien. Als Sekundärbatterien werden Energiespeicher bezeichnet, die wieder aufladbar sind. Die folgende Tabelle soll einen Überblick über gängige Speichersysteme geben:

Speichersystem	Energie-träger	Energiedichte		Leistungs-dichte	Lebensdauer/ Zyklusfestigkeit	Selbst-entladung
		Wh/kg	Wh/l			
Kondensator	Kondensator	4	5	o	+ / ++	--
Sekundärzellen	NaNiCl	100		-	+ / +	-
	Pb-PbO ₂	20 - 40	50 - 100	+	o / o	+
	Ni-Cd	40 - 60	100 - 150	+	++ / ++	-
	Ni-MH	60 - 90	150 - 250	+	++ / ++	-- (++)
	Ag-Zn	80 - 120	150 - 250	++	- / -	++
	Li-Ion	100 - 200	150 - 500	+	+ / +	+
Kraftstoff	Benzin	12700	8800	++		++
	Diesel	11600	9700	++		++

++ sehr gut + gut o durchschnittlich - schlecht -- sehr schlecht

Tabelle 2-1 Speichersysteme (2)

Generell kann gesagt werden, dass die Energiedichte eine der wichtigsten Größen zur Charakterisierung des Speichermediums ist und die von fossilen Kraftstoffen zurzeit um den

Faktor 100 höher liegt als jene von Sekundärzellen. Neben der Leistungsdichte, die beschreibt wie viel Leistung pro Masse abgegeben werden kann, sind auch die Lebensdauer und Zyklenfestigkeit von großer Bedeutung. Die heutigen Fahrzeuge werden für einen Betrieb von zirka zehn Jahren ausgelegt, d.h. idealerweise sollte die Lebensdauer des Energiespeichers jener des Fahrzeugs entsprechen. Die derzeit eingesetzten Batterien sind jedoch auf Grund von Alterungsmechanismen, wie beispielsweise Korrosion der Elektroden, nur für eine gewisse Anzahl von Zyklen verwendbar und müssen daher erneuert werden. In diesem Zusammenhang interessiert auch die für das „Auffüllen“ des Energiespeichers benötigte Ladezeit, die im Vergleich zu konventionellen Kraftstoffen sehr viel höher ist. Zusätzlich zu den bisher genannten Aspekten ist die Selbstentladung, die während eines längeren Ruhezustandes der Batterie auftreten kann, bei Lithium-Ionen-Batterien deutlich geringer, als die bei den anfänglich in der Elektromobilität verwendeten Nickel-Cadmium-Akkumulatoren. Das Phänomen der Selbstentladung bei Diesel und Benzin kann durch das Verdunsten dieser Kraftstoffe erklärt werden.

Der Vorteil des besseren Wirkungsgrades (ca. 80% der gespeicherten Energie wird in Antriebsenergie umgesetzt (3)) von Traktionsbatterien gegenüber fossilen Kraftstoffen (max. 25% kann in Antriebsenergie umgesetzt werden (3)) und das große Entwicklungspotenzial der Lithium-Ionen-Technologie bestätigt die aktuell starke Forschungstätigkeit in diesem Bereich. Auf aktuelle Entwicklungsrichtungen und zukünftige Trends wird im Kapitel 2.4 näher eingegangen.

2.2 Funktionsweise von Batterien

Dieses Teilkapitel ist inhaltlich aus (4) entnommen. Die Funktionsweise von Lithium-Ionen-Akkumulatoren ist fast gleich wie bei galvanischen Batterien. Als galvanische Zellen werden im Allgemeinen Bauteile bezeichnet, mit denen eine Umwandlung von chemischer in elektrische Energie möglich ist. Der kleine Unterschied von lithiumbasierenden Energiespeichern im Gegensatz zu den erwähnten galvanischen Zellen liegt darin, dass bei ihnen keine chemische Reaktion der aktiven Materialien stattfindet. Des Weiteren werden sowohl in der positiven als auch in der negativen Elektrode Lithium-Ionen eingelagert. Die folgende Abbildung zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Lithium-Ionen-Zelle:

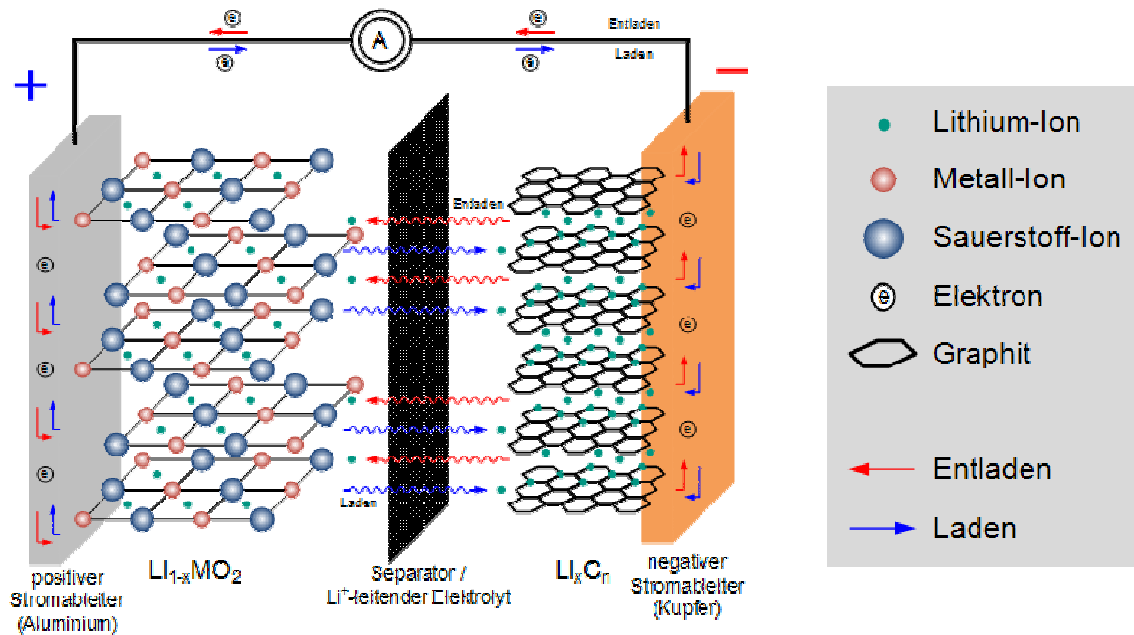
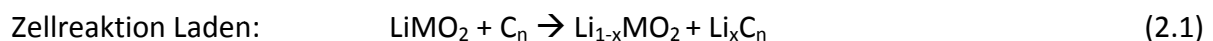


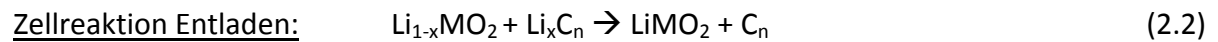
Abbildung 2-1 Aufbau, Lade- und Entladereaktion einer Lithium-Ionen-Zelle (5)

Üblicherweise besteht die negative Elektrode einer Zelle aus dem Stromableiter bzw. Trägermaterial Kupfer und dem aktiven Material Graphit. Das aktive Material der positiven Elektrode enthält Lithium-Metalloxide in Schichtstruktur, wobei das „M“ in der Reaktionsgleichung (Gleichungen 2.1 und 2.2) für „Metall“ steht. Für dieses Metall wird je nach Bauart der Zelle entweder Cobalt, Nickel oder Mangan verwendet. Als Trägermaterial kommt üblicherweise Aluminium zum Einsatz. Die beiden Elektroden werden durch einen elektrolytgetränkten Separator voneinander getrennt, um einen möglichen Kurzschluss der Batterie zu verhindern. Beim Ladeprozess wandern die Lithium-Ionen der positiven Elektrode durch den Elektrolyt und den Separator hindurch und werden im negativen Stromableiter an der Oberfläche der Graphitschicht eingelagert. Diese „Einlagerung“ der Ionen im Kohlenstoff wird als Interkalation (vom lateinischen Wort intercalare=einschieben abgeleitet) bezeichnet.

Beim Laden einer Lithium-Ionen-Batterie ergibt sich folgende Reaktionsgleichung:



Beim Entladen der Zelle bewegen sich die Lithium-Ionen von der Graphitschicht zurück in das Metalloxid des positiven Stromableiters. Dabei tritt folgende chemische Reaktion auf:



Von besonderer Bedeutung für das Funktionieren der Interkalation und in weiterer Folge der Batterie, ist die Ausbildung einer schützenden Deckschicht auf der Oberfläche der negativen Elektrode, auch Anode genannt, die für die Lithium-Ionen durchlässig, für Lösungsmittelmoleküle jedoch undurchlässig ist. Diese Schicht wird als SEI-Schicht (**S**olid **E**lectrolyt **I**nterface) bezeichnet und bildet sich während des ersten Ladezyklus. Falls diese Schicht nicht ausreichend ausgebildet ist, kommt es zur Interkalation von positiven Lithium-Ionen mitsamt den Lösungsmittelmolekülen. Dadurch wird die Anode irreversibel beschädigt.

2.2.1 Bauformen von Lithium-Ionen-Batterien

Die Funktionsweise von lithiumbasierenden Batterien, welche im vorigen Kapitel beschrieben wurde, ist unabhängig von der Geometrie der Zellen. Im Automobilbereich werden hauptsächlich prismatische oder zylindrische Zellen verwendet. Bei den prismatischen Batterien wird in weiterer Folge zwischen flachen, quasiprismatischen Zellen (Pouch-Zellen) und prismatischen Zellen mit einer Metallhülle (metal-can-Zelle) unterschieden. Die in der vorliegenden Arbeit betrachtete Zelle zählt zu den Pouch-Zellen, die auch als Modul (besteht aus mehreren Zellen) oder „Battery Pack“ (besteht aus mehreren Modulen) ausgeführt sein kann (6).

2.3 Gefahrenquellen von Lithium-Ionen-Batterien

Der Inhalt des folgenden Teilkapitels ist aus (2) und (7) entnommen. Der Einsatz von Traktionsbatterien im automotiven Bereich bringt auch eine Reihe von Gefahren mit sich. Eine mechanische Beschädigung der Lithium-Ionen-Batterie kann zum Austritt des teils reizenden Elektrolyts führen. Noch kritischer sind die Reaktionen bei Überladung sowie bei thermischer Belastung der Zelle. Als „Worst Case“ kann der sogenannte „thermal Runaway“ eintreten, bei dem es zu einem unkontrollierten Temperaturanstieg innerhalb der Batterie kommt. Eine Erwärmung der Zelle über 100 °C kann dazu führen, dass das Graphit mit den eingelagerten Lithium-Ionen exotherm reagiert. Als Erstes schmilzt der Separator, wodurch es zum Kontakt der beiden Elektroden und folglich zum inneren Kurzschluss der Zelle kommt. Bei ca. 200 °C treten auch Reaktionen im Kathodenmaterial auf, wobei bei einem Nichtabführen der entstandenen Wärme in der Einzelzelle, im Falle eines ganzen

Batteriemoduls, auch weitere Zellen beschädigt werden können. Die Anzahl der verbauten Zellen in einem Batteriemodul hängt vom verwendeten Zelltyp ab (siehe Kapitel 2.2.1). Aufgrund der starken Temperaturerhöhung besteht die Gefahr, dass die Zellen durch den dadurch hervorgerufenen Druckanstieg im Inneren des Moduls explodieren. Deshalb sind diese häufig mit Sicherheitsventilen ausgestattet, die bei zu großem Druckanstieg geöffnet werden und somit eine mögliche Detonation verhindern können.

Laut (7) lassen sich die Gefahrenpotentiale von Lithium-Ionen-Batterien wie folgt gliedern (wörtlich):

1. „Gefahr durch elektrische Spannung“
2. „Gefahr durch elektrischen Strom“
3. „Gefahr durch austretende Inhaltsstoffe“
4. „Gefahr durch Feuer und/oder Explosion“

Gefahr durch elektrische Spannung:

In der Elektromobilität besitzen die heute verwendeten Batteriemodule Nennspannungen von 100V bis zu 800V. Diese hohe Spannung wird durch das in Serie schalten von Batterieeinzelzellen erreicht, wobei die Nennspannung einer Zelle zirka 4V (siehe Tabelle 4-1) beträgt. Das Berühren dieser Energiespeicher kann zu einem elektrischen Schlag und im schlimmsten Fall zum Tode führen, weshalb spezielle genormte Sicherheitsmaßnahmen bezüglich Isolierung und Berührschutz erforderlich sind. Wartungsarbeiten bzw. Reparaturen dürfen somit nur von geschulten Fachkräften durchgeführt werden.

Gefahr durch elektrischen Strom:

Gefahren durch den elektrischen Strom können einerseits durch Überlastung und andererseits durch Zwischenfälle wie zum Beispiel einer Leitungsunterbrechung im Falle eines Unfalles, entstehen. Diese unerwünschten Effekte können rasch zu lokalen Überhitzungen und in weiterer Folge zum Brand des Fahrzeugs führen.

Gefahr durch austretende Inhaltsstoffe:

Wie oben schon erwähnt, kann eine mechanische Beschädigung von Lithium-Ionen-Batterien zum Austritt von flüssigen oder gasförmigen Inhaltsstoffen der Zelle führen. Der Elektrolyt

besteht meist aus Carbonaten und dem Leitsalz LiPF_6 . Dieses Leitsalz ist für eine Verbesserung der Leitfähigkeit verantwortlich und kann in Verbindung mit Feuchtigkeit Flusssäure bilden, die hoch giftig ist und zu einer Reizung der Atemwege führen kann. Bedingt durch die Verwendung dieses Leitsalzes, kann in sehr geringen Mengen (kaum nachweisbar) auch das hochgiftige Phosphin entstehen. Durch Verdampfen des Elektrolyts kann es zum Austritt von Gasen wie Methan, Ethan, Propan und Butan kommen.

Gefahr durch Feuer und/oder Explosion:

Die in den Batterien eingesetzten Materialien, wie zum Beispiel Graphit und der für den Separator verwendete Kunststoff, sind brennbar, wobei auch der Elektrolyt zu den leicht entzündlichen Stoffen zählt. Auf die Folgen einer Überhitzung und deren Abhilfe wurde bereits am Beginn des Kapitels näher eingegangen.

Aufgrund der Tatsache, dass im Rahmen dieser Arbeit Tests mit geladenen Batterieeinzelzellen durchgeführt wurden, liegt der Fokus der möglichen auftretenden Gefahrenquellen vor allem in den Bereichen der „**Gefahr durch Feuer und/oder Explosion**“ und der „**Gefahr durch austretende Inhaltsstoffe**“. Zur Wahrung der eigenen Sicherheit wurden dementsprechende Schutzmaßnahmen beim Hantieren mit der Zelle getroffen:

- Tragen einer Schutzmaske
- Bereitstellung von genügend Frischluft (Absaugung) nach geladenen Tests
- Tragen von Schutzhandschuhen
- Bereitstellen eines Feuerlöschers im Falle eines Brandes der Zelle

2.4 Trends in der Entwicklung von lithiumbasierenden Energiespeichern

Die Technologie von lithiumbasierenden Batterien ist, verglichen mit anderen Speicherkonzepten, noch relativ jung, weshalb zurzeit intensiv an Weiterentwicklungen, wie beispielsweise an der Erhöhung der Leistungsdichte, Lebensdauer, Sicherheit etc., gearbeitet wird. Ein nennenswerter Teil der Forschung beschäftigt sich auch mit der Entwicklung neuer Elektrodenmaterialien, um die Leitungsfähigkeit der Zelle zu erhöhen. Folgend werden die Trends bezüglich der eingesetzten Materialien beschrieben (inhaltlich aus (8) entnommen).

Anodenmaterialien:

Eine Übersicht über potenzielle zukünftige Anodenmaterialien gibt die Abbildung 2-2:

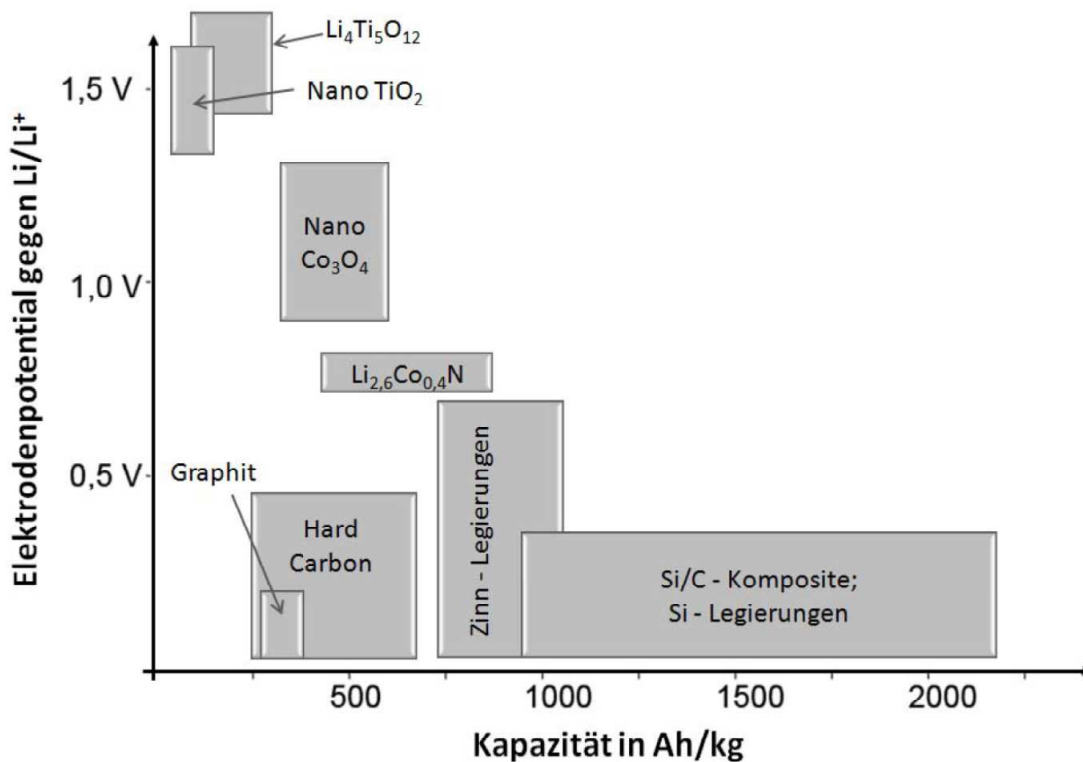


Abbildung 2-2 Potenzielle Anodenmaterialien (8)

Neben den kohlenstoffbasierenden Aktivmaterialien, deren chemische Stabilität durch Oberflächenmodifikationen, wie beispielsweise durch Einlagerung von Metallen oder Metalloxiden, verbessert wird, werden vor allem Legierungen, die zur Erhöhung der spezifischen Kapazität der Zelle führen, erforscht. Das Hauptproblem vieler Legierungskomponenten ist deren große Volumenänderung von bis zu 200% beim Laden und Entladen der Batterie, welche zu einer Zerstörung der Elektrode durch Rissbildung führen kann. Um dies zu verhindern, wird aktuell versucht, die Elektroden aus Nanopartikeln aufzubauen um dadurch die unerwünschten Spannungen besser absorbieren zu können. Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung von Kompositen (Si/C-Komposite) bei denen der Kohlenstoff die Volumenausdehnung kompensiert.

Kathodenmaterialien:

Zu den bisher verwendeten Metalloxiden, deren Nachteil in der geringen elektrischen Leitfähigkeit liegt, wird zunehmend versucht, diese durch Phosphate (Eisenphosphat) zu

ersetzen. Dadurch sind sehr hohe Lade- und Entladeströme realisierbar, was zu einer Verkürzung der Ladezeit führt.

Elektrolyte und Separatoren:

Die größte Herausforderung bei der Weiterentwicklung des Elektrolyts ist die elektrochemische Stabilität bei hohen Batteriespannungen sowie die Verbesserung der Sicherheitseigenschaften. Derzeit sind die verwendeten Stoffe entflammbar, weshalb intensiv an Festkörperelektrolyten (keramisch) und „ionischen Flüssigkeiten“ geforscht wird. Der Vorteil von Festkörperelektrolyten liegt darin, dass sie isolierend wirken, wodurch auf die Verwendung eines Separators verzichtet werden kann. Das Plus von „ionischen Flüssigkeiten“ ist die Nicht-Entflammbarkeit, die gute ionische Leitfähigkeit sowie die hohe thermische Stabilität.

Der Entwicklungsschwerpunkt bei Separatoren liegt aktuell in der Verbesserung der Ionendurchlässigkeit und der thermischen Stabilität.

2.5 Integration von Lithium-Ionen-Batterien in Fahrzeugsimulationsmodelle

Die zunehmende virtuelle Produktentwicklung wird auch im Bereich der Elektromobilität immer wichtiger. Aktuell werden die verbauten Energiespeicher bestmöglich gegen Verformungen (massive Kapselung der Zelle im Fahrzeug), die beispielsweise als Folge eines Unfalles auftreten können, geschützt. Dies wirkt sich nachteilig auf das Gesamtgewicht des Fahrzeugs und in weiterer Folge auch auf die Reichweite des Fahrzeuges aus, weshalb vermehrt Überlegungen angestellt werden, wie man unnötigen Ballast einsparen kann. Dabei gilt es herauszufinden, inwieweit einzelne Zellen bzw. Batteriemodule in der Lage sind, mechanischen Belastungen schadensfrei standzuhalten. Der Aspekt der Insassensicherheit darf in diesem Zusammenhang nicht außer Acht gelassen werden, da eine Beschädigung der Zellen im schlimmsten Fall zur Explosion der Energiespeicher führen kann. Eine einfache Abbildung als „Black Box“ der einzelnen Zellen bzw. der Batteriemodule im Fahrzeugsimulationsmodell ist deshalb nicht mehr ausreichend. Die notwendigen Anforderungen an das Simulationsmodell werden im folgenden Unterkapitel beschrieben.

2.5.1 Anforderungen eines FE-Batteriemodells im Fahrzeug

In einer Batterie laufen mechanische (Verformung), thermische (Wärmeleitung), elektrische (Kurzschluss) und auch chemische (Reaktionskinetik) Vorgänge ab. Um das Verhalten der

Batterie bestmöglich abbilden zu können, müssten all diese Effekte in einem Simulationsmodell berücksichtigt werden. Dies ist aber bislang nicht möglich.

In dieser Arbeit soll ein Modell der Batterie entwickelt werden, welches in weiterer Folge in ein Gesamtfahrzeugmodell integriert werden kann. Damit ergeben sich darüber hinaus auch Anforderungen hinsichtlich Rechendauer, was eine Fokussierung auf die für die Fragestellung wichtigsten Einflüsse erforderlich macht. Im Folgenden werden die Effekte erläutert, welche im Simulationsmodell abgebildet werden sollen:

Was muss das FE-Modell können?

- Mechanische Eigenschaften abbilden
- Verformungen der Gesamtzelle abbilden
- Verformungen der Batteriemodule abbilden
- Massen müssen mit der realen Zelle übereinstimmen
- Prognosen über die Beschädigung einzelner Komponenten liefern

Was muss das FE-Modell (vorerst) nicht können?

- Chemische Reaktionen abbilden
- Thermische Effekte der Zelle nachbilden
- Den Ladezustand der einzelnen Zelle und in weiterer Folge der Module über die Belastung abbilden
- Vorgänge die nach der Deformierung passieren (Ausgasung, Feuer) nachstellen

Es ist vorstellbar, dass zukünftige Modelle auch die vorerst „vernachlässigten“ Effekte ausreichend genau und mit einer „sinnvollen“ Rechendauer abbilden können.

3 Simulationsmethoden zur Abbildung einer Batterie

In diesem Kapitel werden die Möglichkeiten zur numerischen Simulation von Batterien aufgezeigt. Dabei wird neben einer multiphysikalischen Abbildungsvariante auch die Finite-Elemente-Methode beschrieben. Letztere wurde im Rahmen dieser Arbeit umgesetzt.

Multiphysikalische Abbildungsmethode:

Das Unternehmen COMSOL Multiphysics® vertreibt Softwarelösungen für verschiedenste Bereiche in Forschung und Entwicklung. Dieses Programm erlaubt die Abbildung und Kopplung sowohl von chemischen und thermischen als auch elektrischen und mechanischen Vorgängen in einem System. Damit wären die Voraussetzungen erfüllt, das Verhalten einer geladenen Batterie unter mechanischer Belastung möglichst realitätsnah beschreiben zu können. Die folgende Abbildung zeigt ein elektrochemisches Modell eines Lithium-Ionen-Batteriemoduls:

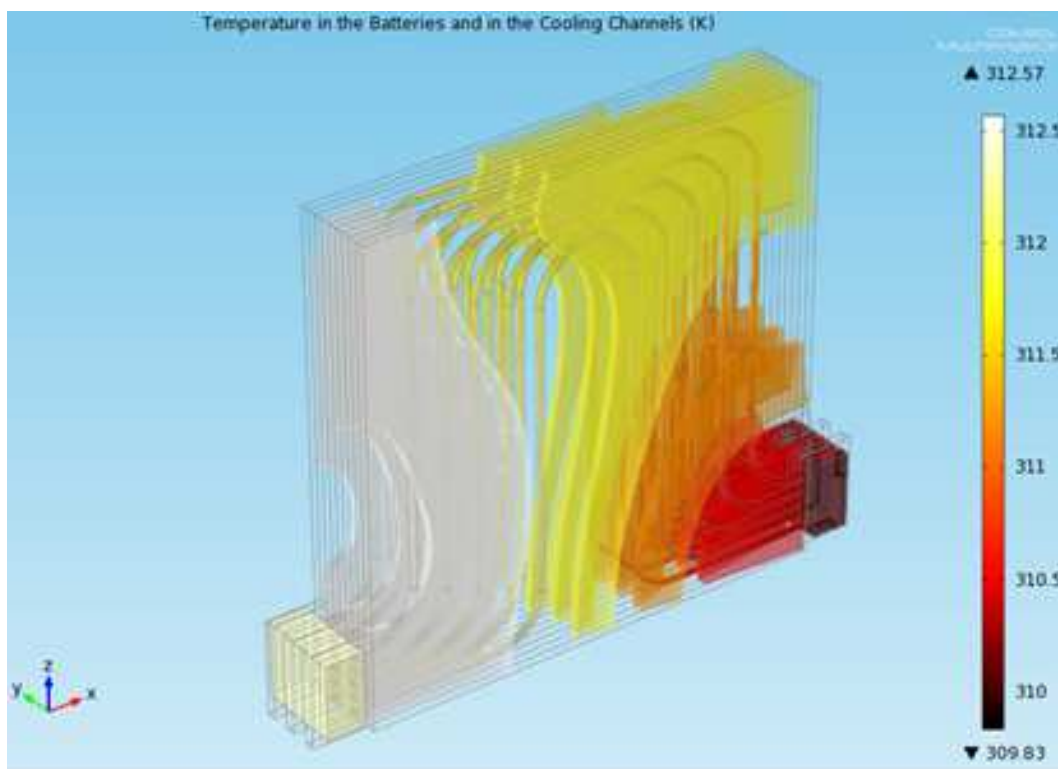


Abbildung 3-1 Elektrochemisches Modell eines Batteriemoduls (9)

Trotz der vielversprechenden Anwendungsmöglichkeiten ist der Einsatz dieses Programms für die Crashsimulation leider eingeschränkt, da für die hochdynamischen mechanischen

Vorgänge während eines Crashes bislang meist nur explizite FE-Solver eingesetzt werden. Mit dem verfügbaren impliziten Lösungsverfahren können lediglich statische und quasistatische Lastfälle analysiert werden.

Finite-Elemente-Methode:

Die Finite-Elemente-Methode (FEM) wird zur Berechnung komplexer Bauteile in den verschiedensten Bereichen der Technik verwendet. In Bezug auf die Batteriemodellierung gilt es vorab zu überlegen, wie die Batterie abgebildet werden kann. Dazu bestehen beispielsweise folgende Möglichkeiten:

- Abbildung als makroskopisches Modell
- Abbildung als mikroskopisches Modell

Bei einer Abbildung der Lithium-Ionen-Batterie als makroskopisches Modell werden die Eigenschaften der einzelnen Lagen zu einer Summeneigenschaft der Gesamtzelle zusammengeführt. Der einfache Aufbau des Modells und die geringe Rechenzeit kann dabei als Vorteil bezeichnet werden. Der Nachteil dieses Modells ist, dass keine Aussagen über innere Beschädigungen, die im Realfall auftreten (Kurzschluss), getroffen werden können. Ebenso bleiben die unterschiedlichen Materialien der Zelle (Kupfer, Aluminium, Elektrolyt, Separator) unberücksichtigt. Mit dieser unphysikalischen Abbildung der Batterie ergibt sich folglich eine enorme Einschränkung der Prognosefähigkeit im Vergleich zur Abbildung als mikroskopisches Modell.

Beim mikroskopischen Modell werden alle Bestandteile des Energiespeichers einzeln abgebildet. Da jede Komponente unterschiedliche Materialeigenschaften besitzt, können somit die notwendigen Parameter, wie beispielsweise Zugfestigkeit und Elastizitätsmodul, dem jeweiligen Bauteil zugeordnet werden. Auch die verschiedenen Dicken der Lagen können dadurch berücksichtigt werden. Durch die detaillierte Modellierung wird die Rechenzeit der Simulation verlängert, was sich aber erst bei mehreren Modulen stärker bemerkbar macht. Die Abbildung 3-2 zeigt den mikroskopischen Aufbau der untersuchten Zelle in der Simulation:

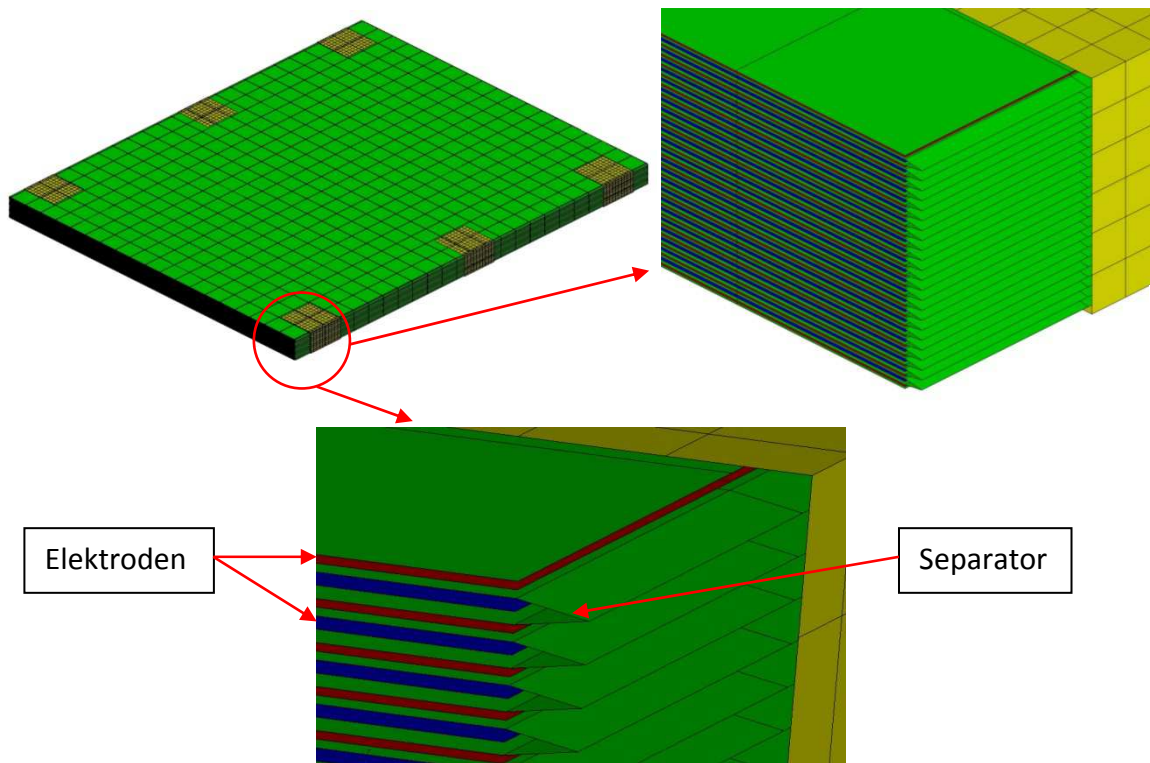


Abbildung 3-2 Mikroskopischer Aufbau der Lithium-Polymer-Batterie

In der oberen Abbildung ist der schichtweise Aufbau des numerischen Modells erkennbar. Die Anzahl der Schichten entspricht exakt der Realzelle und auch die Anordnung des Separators (gewickelt) kann der Batterie entsprechend nachgebildet werden. Auf den Aufbau und die Bestandteile der Lithium-Polymer-Zelle wird im Kapitel 4 näher eingegangen.

3.1 Angewandte Simulationsmethode

Die Berechnung des Simulationsmodells erfolgte mit einem nichtlinearen expliziten FE-Solver namens LS-Dyna® von Livermore Software Technology Corporation (LSTC). Für die Generierung des Modells waren weitere Programme erforderlich. Prinzipiell lässt sich die FE-Berechnung in drei Schritte gliedern:

1. Preprocessing: Darin erfolgt die Erstellung bzw. Implementierung (z.B. aus CAD-Programm) der Geometrie und ihrer Diskretisierung in ein Finite-Elemente-Netz. Je nach Topologie (dick- oder dünnwandige Querschnitte) kommen geeignete Elementtypen (z.B.: Solids, Shells,...) zum Einsatz. Zusätzlich zur Netzgenerierung werden den einzelnen Elementen Materialien und Lasten (statisch, dynamisch) zugewiesen sowie Randbedingungen (z.B.: Einspannungen, Lagerungen, ...) definiert.

Als Preprozessor wurde Hypermesh®, welches einen Teil des Softwarepakets von Hyperworks® von Altair darstellt, verwendet.

2. Processing: Innerhalb dieses Prozesses erfolgt zuerst die Überprüfung der zuvor definierten Elemente. Fehlen beispielsweise Materialwerte wird die Berechnung vorzeitig abgebrochen. Sind die Eingaben korrekt erfolgt die Lösung der Gleichungssysteme.

Als Solver wurde, wie anfänglich erwähnt, LS-Dyna® angewendet.

3. Postprocessing: Nach erfolgreicher Berechnung durch den Solver können die benötigten Informationen wie im Bauteil wirkende Kräfte, Spannungen, Deformationen und Dehnungen u.v.m. visuell im Postprozessor dargestellt werden. Für die Darstellung der in der Arbeit abgebildeten Diagramme wurde Hypergraph® und Hyperview® von Altair herangezogen.

3.2 Vereinfachungen in der Modellerstellung

Es wurde bereits erwähnt, dass eine Abbildung bis ins „kleinste Detail“ aus mehreren Gründen nicht zielführend ist. Einerseits wird dadurch das Modell sehr kompliziert, andererseits steigt die damit verbundene Rechenzeit. Auch im Hinblick auf die mögliche zukünftige Integration von Batteriemodulen der betrachteten Zelle im Gesamtfahrzeugsimulationsmodell gilt es, das numerische Modell der Einzelzelle so detailliert wie nötig abzubilden, ohne dabei die Prognosegüte zu berücksichtigen. Folgende Vereinfachungen in der Modellabbildung wurden deshalb getroffen:

- Effekte des Elektrolyts (Adhäsion) wurden durch Reibung zwischen den Lagen dargestellt, nicht aber als Flüssigkeit
- Änderung der mechanischen Eigenschaften der Elektroden beim Laden und Entladen blieben unberücksichtigt
- Änderung der volumetrischen Eigenschaften der Elektroden beim Laden und Entladen wurden vernachlässigt
- Die Wandstärke bzw. die Materialverteilung der einzelnen Schichten wurde als konstant angenommen
- Aufgrund der Tatsache, dass die Zelle luftdicht (vakuumiert) verschlossen ist, wurde ein geringer Unterdruck nachgebildet

- Die Verschweißung der Hülle an den Seitenflächen der Zelle wurde lediglich vereinfacht dargestellt
- Eine mögliche Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von der wirkenden Belastungsgeschwindigkeit wurde nicht berücksichtigt
- Die Zusammenführung des positiven und negativen Trägermaterials zu jeweils einer Elektrode (Plus- und Minuspol) wurde nicht abgebildet (siehe Abbildung 3-3)

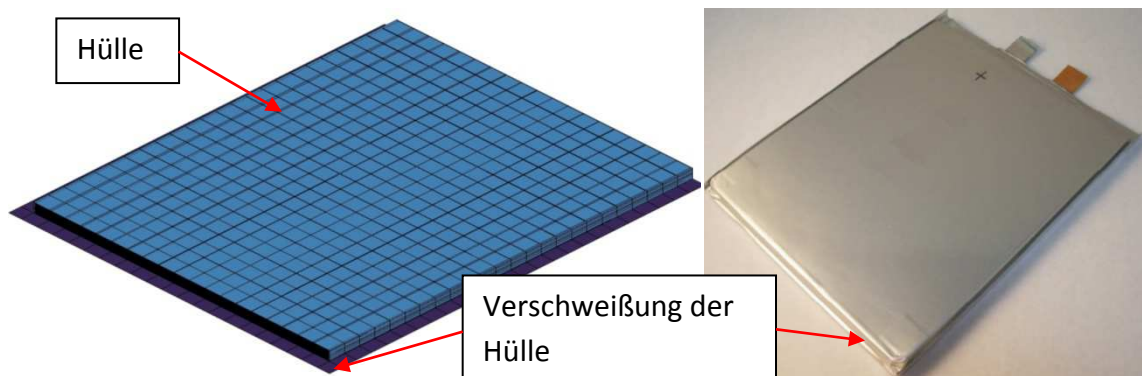


Abbildung 3-3 Vergleich: Vereinfachtes Simulationsmodell (links) mit Realzelle (rechts)

In der oberen Abbildung ist das numerische Modell mit den vorher erwähnten Vereinfachungen ersichtlich. Das blaue Shell stellt die Hülle dar, unter welcher sich das Innenleben der Zelle (siehe Abbildung 3-2) befindet.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass mit den getroffenen Vereinfachungen des numerischen Modells ein guter Kompromiss zwischen Abbildungsgenauigkeit und Rechendauer gefunden werden konnte.

4 Analyse der Einzelkomponenten

Zu Beginn dieses Kapitels wird auf die verwendete Lithium-Ionen-Batterie und deren Eigenschaften eingegangen. Danach folgen die Untersuchung der Zellkomponenten und eine Beschreibung der Vorgehensweise zur Ermittlung der erforderlichen Materialparameter. Die daraus gewonnenen Werte liefern die Inputs für die numerische Simulation. In weiterer Folge (siehe Kapitel 5.3) kann anhand dieser Versuchsdaten eine Validierung der Simulationsergebnisse durchgeführt werden.

4.1 Verwendete Lithium-Ionen-Batterie

Die in der vorliegenden Arbeit betrachtete Zelle gehört zur Gruppe der Lithium-Polymer-Batterien, welche besonders im Modellbau Verwendung findet. Die Lithium-Polymer-Zelle ist eine Weiterentwicklung der Lithium-Ionen-Zelle und zeichnet sich durch eine hohe Energiedichte und verbesserte Zyklenlebensdauer aus. Ein weiterer Unterschied zu herkömmlichen Zellen liegt darin, dass bei den üblichen Energiespeichern ein flüssiger Elektrolyt und bei der Polymer-Batterie ein gelartiger Elektrolyt (LiPF_6) verwendet wird.

Die Gründe für die Verwendung dieser Zelle und die damit verbundenen Untersuchungen lassen sich wie folgt erklären:

- Aufbau der Zelle ähnelt Fahrzeugtraktionsbatterien, sie besitzt lediglich eine geringere Kapazität
- Aufgrund der geringeren Kapazität der Lithium-Polymer-Batterie ist das Gefahrenpotenzial bei Zerstörung einer geladenen Zelle deutlich geringer als bei Batterien mit höherer Kapazität
- Für die zu absolvierenden Tests im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden diese Zellen vom AIT (Austrian Institute of Technology) gratis zur Verfügung gestellt.

Die Tabelle 4-1 enthält die wichtigsten Daten und Abmessungen der Zelle. Die nachfolgende Abbildung zeigt ein Foto der Lithium-Polymer-Batterie:

Modell	7799130L
Positives Material	LiMn_2O_4

Negatives Material		Graphit
Spannung	Durchschnitt	3.8V
	Max.	4.2V
	Min.	2.8V
Kapazität		8.2Ah
Zyklenlebensdauer		1700
Gewicht		200g
Interner Widerstand		< 4mΩ
Energie		31.4Wh
Energiedichte	pro Gewicht	157Wh/Kg
	pro Volumen	316Wh/L
Max. Lade C-Rate		3C
Max. Entlade C-Rate		5C
Abmessungen	Dicke	7.70~8.05mm
	Breite	98.0mm
	Länge	130.0mm
Betriebstemperatur	Laden	0~45°C
	Entladen	-20~55°C
Lagertemperatur		-20~40°C

Tabelle 4-1 Datenblatt der verwendeten Zelle (6)



Abbildung 4-1 Foto der untersuchten Zelle

Charakteristisch für die Zelle sind die Nennspannung von 3,8V und die Energiedichte von 8,2Ah bei einem Gesamtgewicht der Zelle von 200g. Das positive Aktivmaterial besteht aus Lithium-Mangan-Oxid und an der negativen Elektrode kommt Graphit zum Einsatz. In der Abbildung 4-1 sind die positive Elektrode (Trägermaterial Aluminium) und die negative Elektrode (Trägermaterial Kupfer) gut erkennbar. Auf den Aufbau und welche Materialien sich in der Zelle befinden, wird im nächsten Teilkapitel eingegangen.

4.2 Materialbestimmung

Um herauszufinden aus wie vielen einzelnen Schichten und aus welchen Materialien die Zelle besteht, wurde die Batterie geöffnet. Zur Vermeidung eines möglichen Kurzschlusses beim Öffnen der Batterie, wurde der Energiespeicher vorab komplett entladen. Die folgende Abbildung zeigt das Öffnen und Zerlegen der Lithium-Polymer-Zelle:



Abbildung 4-2 Öffnen der Lithium-Ionen-Batterie

Nach Aufschneiden der Zelle war eine sofortige Verflüchtigung des Elektrolyts feststellbar. Zusätzlich konnte ein starker Geruch und eine reizende Wirkung des Stoffes wahrgenommen werden, weshalb während der Untersuchung aus gesundheitlichen Gründen ein Mund- und Augenschutz getragen wurden. Zwei Zellen vom selben Typ wurden geöffnet, um etwaige Unterschiede der Lagenanzahl bzw. des Aufbaus ausschließen zu können. Die folgende Abbildung soll den Aufbau der Zelle verdeutlichen.

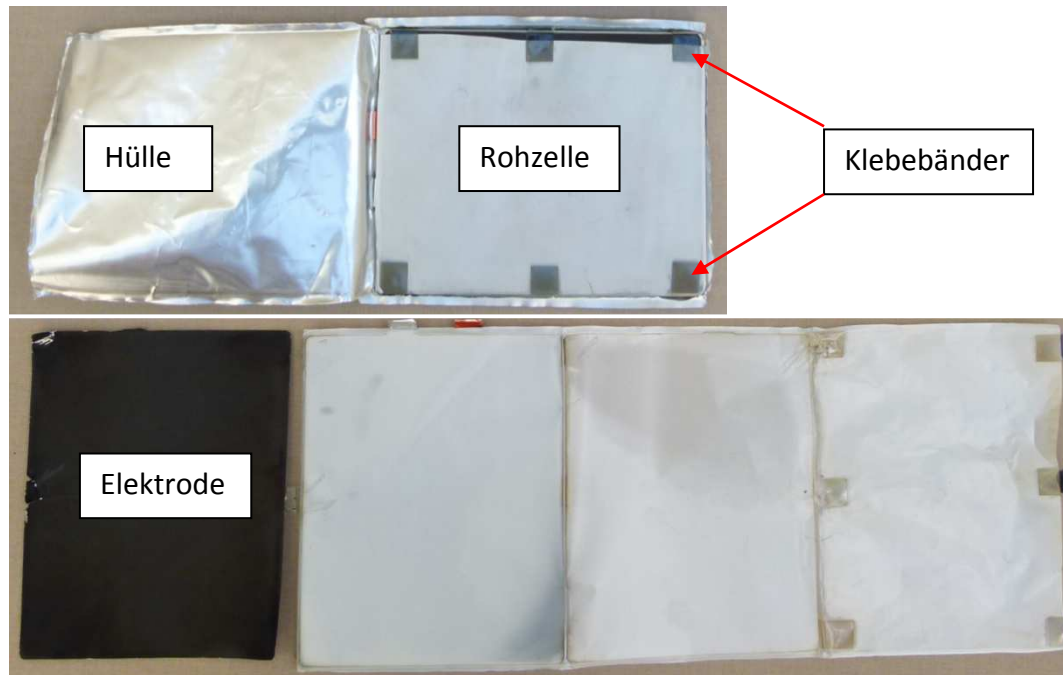


Abbildung 4-3 Aufbau der Zelle

Das obere Bild zeigt, dass die „Rohzelle“ (ohne Hülle bzw. Pouch) durch sechs Klebebänder fixiert ist. Das ist aller Wahrscheinlichkeit nach aus fertigungstechnischen Gründen notwendig, um ein „Auseinanderfallen“ der einzelnen Schichten zu verhindern. Die erste und die letzte Schicht bildet der Separator, der die Elektroden voneinander trennt. Dieser wird, wie das untere Bild der Abbildung 4-3 zeigt, um die Elektroden gewickelt und besteht somit aus „einem“ Stück. Zur Verdeutlichung, wie der Separator in der Zelle angeordnet ist, dient die folgende Prinzipskizze:



Abbildung 4-4 Anordnung des Separators in der Zelle

Die vollständige Trennung der beiden Elektroden durch den Separator ist in der oben dargestellten Abbildung 4-4 gut erkennbar. Zwischen den einzelnen Lagen des Separators sind abwechselnd die beiden Elektroden (Kathode, Anode) angeordnet.

Die Pouch (Hülle) bildet das „Gehäuse“ der Zelle und verhindert den Austritt des stark flüchtigen Elektrolyts aus der Batterie. Sie besteht aus einer, mit Kunststoff beschichteten Aluminiumfolie, wobei die Kunststoffbeschichtung als Dichtung fungiert.

Nach dem Zerlegen wurden die Komponenten sortiert, um eine genauere Untersuchung der Materialien vornehmen zu können. (Abbildung 4-5)

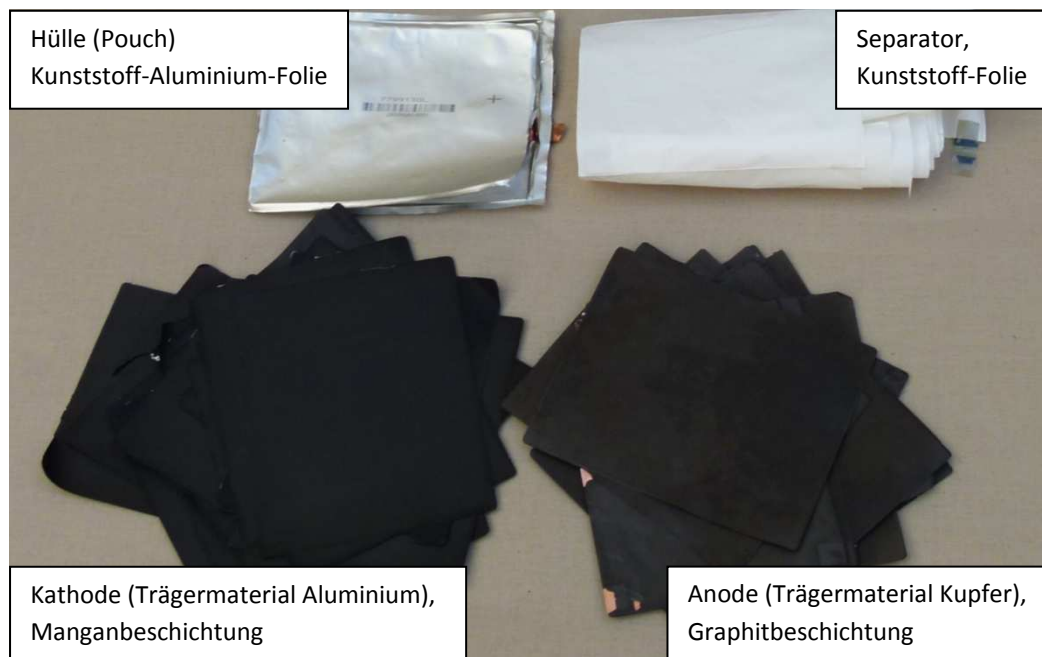


Abbildung 4-5 Sortierung der Zelle nach Bestandteilen

Die Bestandteile der Lithium-Polymer-Zelle wurden vermessen und die Anzahl der Komponenten bestimmt. In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse der Zerlegung zusammengefasst:

	Kathode	Anode	Separator	Hülle (Pouch)	Klebeband
Anzahl	23	24	1	1	6
Länge	-	-	4,66m	-	-
Abmessungen	118x95mm	118x95mm	118x95mm	130x105mm	10x10mm
Dicke	0,13mm	0,10mm	0,025mm	0,15mm	0,04mm

Tabelle 4-2 Ergebnisse der Batteriezersetzung

Die Abmessungen beziehen sich auf die in Abbildung 4-3 ersichtliche Draufsicht der Einzelkomponenten. D.h. die Grundfläche des Separators entspricht jener der Elektroden,

um eine vollständige Trennung zwischen Anode und Kathode zu gewährleisten. Die Dicken der einzelnen Materialien wurden in erster Näherung mit einer Mikrometerschraube ermittelt. Eine genaue Schichtdickenbestimmung der Elektroden erfolgte im Zentrum für Elektronenmikroskopie in Graz. Die Ergebnisse werden im folgenden Teilkapitel dargelegt.

4.3 Schichtdickenuntersuchung

Auf Grund der Beschichtung der Elektroden war zur genauen Bestimmung der Dicken der Aktivmaterialien sowie des Trägermaterials eine Schichtdickenuntersuchung notwendig. Bei einer Abbildung der Elektrode als makroskopisches Modell würde ein Summenverhalten von Beschichtung und Metall über die Gesamtdicke genügen. Der Umstand, dass ein mikroskopisches Modell entwickelt werden soll, setzt eine detaillierte Abbildung bzw. Untersuchung der einzelnen Komponenten (Beschichtung, Trägermaterial) voraus. Diese Untersuchung wurde im Zentrum für Elektronenmikroskopie in Graz durchgeführt. Die beiden Elektroden wurden dafür in Kunstharz eingebettet und dann mit einem Mikrotom (Schneidgerät mit dem sehr dünne Proben erstellt werden können) angeschnitten. Anschließend wurden die Querschnitte mit einem Lichtmikroskop fotografiert und die Dicken der einzelnen Schichten vermessen. Im Rasterelektronenmikroskop wurde die Art der Metallschicht bestimmt, um die richtige Zuordnung zu den beiden Elektroden sicherzustellen. Die folgenden Abbildungen zeigen Auszüge der durchgeführten Untersuchung:



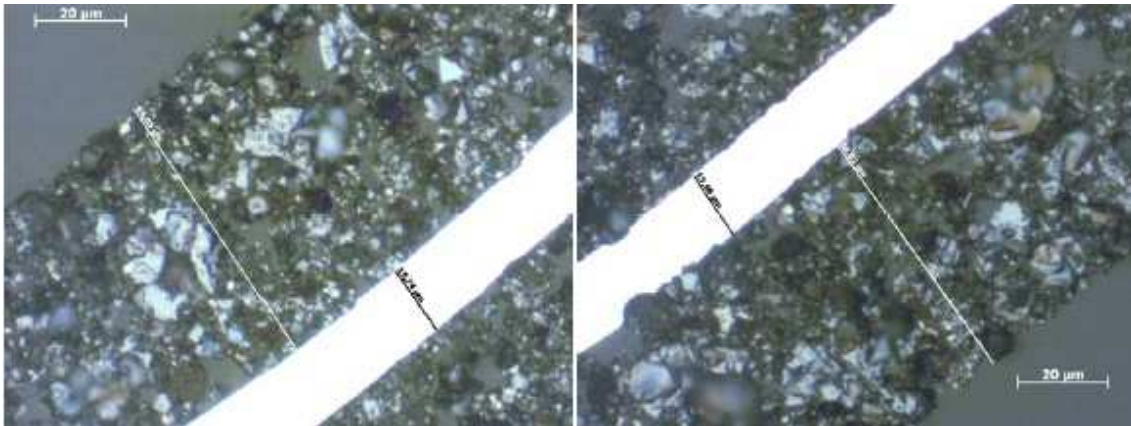


Abbildung 4-6 Mikroskopie der Kathode

Der weiße Streifen in der Abbildung stellt das Trägermaterial Aluminium dar. Die dunkleren Bereiche, wie beispielsweise im linken unteren Bild dargestellt, kennzeichnen das Aktivmaterial der positiven Elektrode. Im rechten oberen Bild kann man gut die ungleichmäßige Materialverteilung des Aktivmaterials erkennen. Für die Modellierung der Kathode als FE-Modell wurden die Wandstärken und Materialverteilungen als konstant angenommen (siehe Kapitel 3.2). In der Tabelle 4-3 sind die Ergebnisse der Untersuchung aufgelistet:

Schicht	Vermessung [μm]
Obere Schicht (Aktivmaterial)	60,6 - 77,1
Mittlere Schicht (Aluminium)	15,0 - 16,0
Untere Schicht (Aktivmaterial)	50,4 - 59,6

Tabelle 4-3 Vermessungsprotokoll Kathode

Die Abbildung 4-7 zeigt die Schichtdickenuntersuchung der Anode in verschiedenen Auflösungen (100 μm , 50 μm , 10 μm):

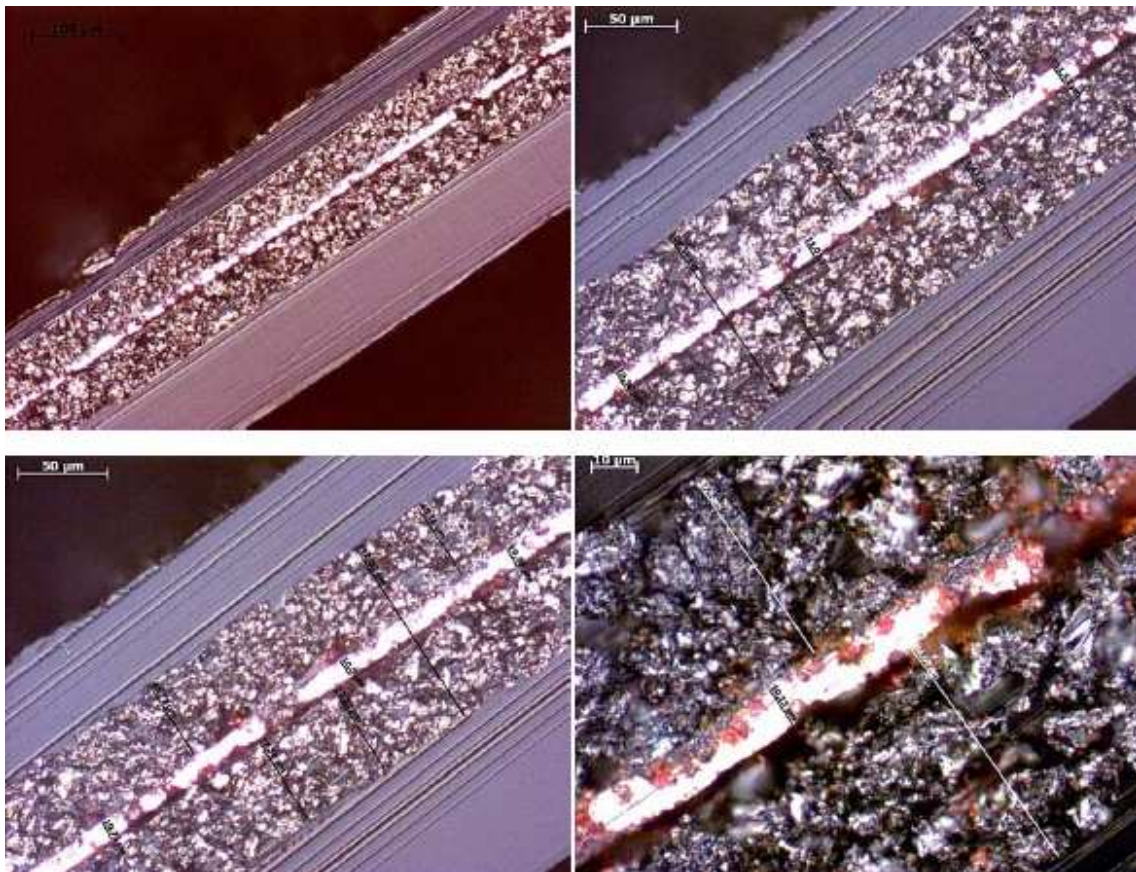


Abbildung 4-7 Mikroskopie der Anode

Im rechten unteren Bild ist das Metall (Kupfer) durch den hell leuchtenden, orange-roten Streifen zu erkennen. Das Aktivmaterial Graphit ist durch die dunklen Bereiche gut ersichtlich. Die Struktur vom Aktivmaterial kann als grobkörnig und inhomogen bezeichnet werden, was auf eine geringe Tragfähigkeit des Graphits schließen lässt. Die folgende Tabelle bestätigt die ungleichmäßige Materialverteilung, wie zuvor bei der Kathode und zeigt die aus der Mikroskopie abgeleiteten Messdaten für die Anode:

Schicht	Vermessung [μm]
Obere Schicht (Aktivmaterial)	45,2 - 45,8
Mittlere Schicht (Kupfer)	10,4 - 11,5
Untere Schicht (Aktivmaterial)	52,6 - 56,1

Tabelle 4-4 Vermessungsprotokoll Anode

Die Schichtdicken des Separators und der Pouch wurden mit Hilfe einer Mikrometerschraube bestimmt. Für den Separator konnte eine Dicke von ca. 25 μm ermittelt werden. Diese Messung wurde durch Informationen eines Separatorherstellers bestätigt. Bedingt durch

den schichtweisen Aufbau der Hülle (Aluminium, Kunststoff) ergaben sich zwei Werte für die Dicke der Schichten. Die Dicke der Aluminiumfolie beträgt ca. $100\mu\text{m}$, für die Nachbildung der Kunststofffolie im FE-Modell wurde eine Schichtdicke von ca. $50\mu\text{m}$ ermittelt.

Im Zuge eines weiteren Projektes wurde ebenfalls eine Lithium-Polymer-Zelle genauer untersucht. Durch den ähnlichen Aufbau dieser Batterie können die Schichtdicken von Separator und Hülle mit denen in der vorliegenden Arbeit untersuchten Batterie verglichen werden.

Die Abbildung 4-8 zeigt die mikroskopische Untersuchung des Separators:

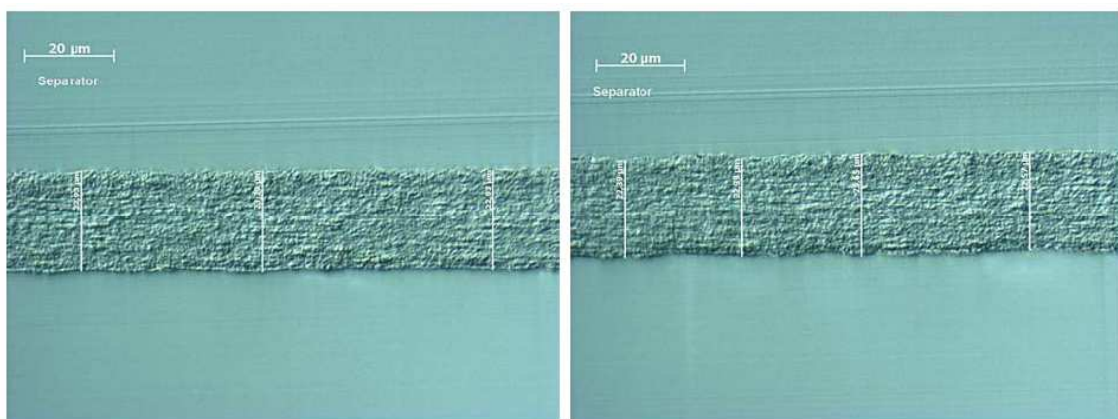


Abbildung 4-8 Mikroskopie des Separators

Der Separator besteht aus einer homogenen Schicht und weist eine Dicke von $22,4$ bis $23,7\mu\text{m}$ auf. Diese Schichtdicke sowie der Aufbau sind nahezu ident mit der in der vorliegenden Arbeit verwendeten Zelle.

Die Hülle der Lithium-Polymer-Batterie besteht aus einer Kunststoff-Aluminiumfolie, wie die folgende Abbildung zeigt:

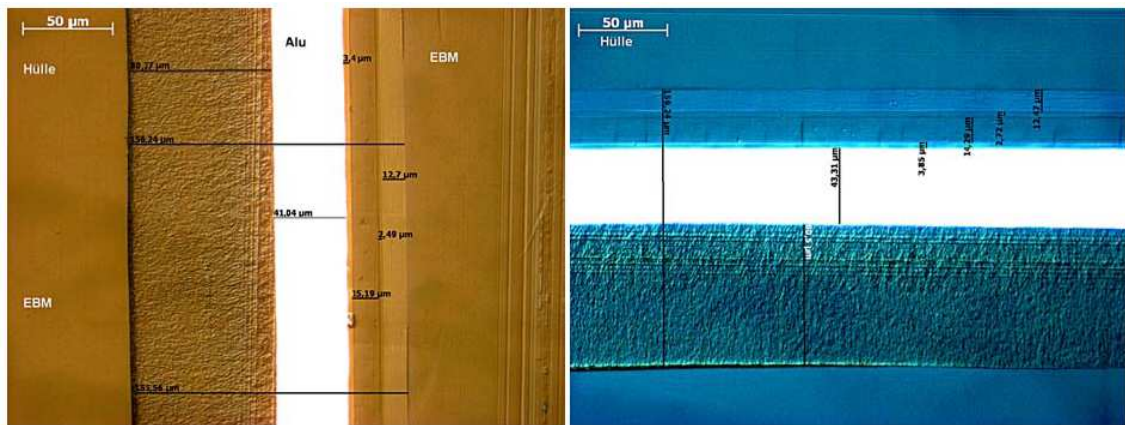


Abbildung 4-9 Mikroskopie der Hülle

Die Mikroskopie der Hülle ergab eine Dicke des Aluminiums (weißer Streifen) von ca. 42µm. Die Schichtdicken der Kunststofffolien (färbig dargestellt) betragen 2,5 bis 80,8µm. Die Gesamtdicke der Hülle beträgt somit ca. 120µm und ist auch mit der in der Arbeit untersuchten Zelle (150µm) vergleichbar. Größere Unterschiede ergaben sich lediglich in der Anzahl der Schichten der Kunststofffolie und in der Dicke der Aluminiumschicht (100µm in der betrachteten Zelle).

4.4 Methoden zur Ermittlung der Materialeigenschaften

Nachdem die geometrischen Abmessungen bzw. die Dicken der einzelnen Schichten in der Batterie bekannt sind, müssen dem Simulationsmodell als nächstes Materialeigenschaften zugewiesen werden. Die Werkstoffparameter aus der Literatur waren auf Grund des komplexen Aufbaus der Elektroden nicht ausreichend. Die verschiedenen Zellenhersteller, darunter auch der Hersteller der untersuchten Zelle, geben die genauen Materialparameter der Aktivmaterialien inkl. der Trägermaterialien aus Geheimhaltungsgründen nicht preis, weshalb eine experimentelle Ermittlung der gesuchten Werkstoffwerte notwendig war. Eine gängige Methode für die Ermittlung dieser Eigenschaften ist der Zugversuch, mit dem auch die notwendigen Eingabeparameter für das Simulationsmodell abgeleitet werden konnten. Dabei ergaben sich aufgrund der geringen Dicken der Zugversuchsproben Probleme bei der Versuchsdurchführung (insbesondere bei der Einspannung der Proben).

Zusätzlich zu den Zugversuchen wurden Durchbiegungsversuche (Kapitel 4.6) mit den Elektroden durchgeführt, da die vorhandenen Beschichtungen zwar wenig zur Zugfestigkeit beitragen, jedoch bedingt durch die Dicke der Aktivmaterialien (siehe Kapitel 4.3) erheblichen Anteil an der Biegesteifigkeit haben.

4.4.1 Zugversuch allgemein

Der Zugversuch zählt zu den quasistatischen, zerstörenden Prüfverfahren und dient der Ermittlung von Werkstoffkennwerten, wie zum Beispiel Zugfestigkeit und Elastizitätsmodul. Die dabei verwendeten Zugproben sind je nach Material und Querschnitt nach dem Deutschen Institut für Normung (DIN) definiert. Diese Geometrie hat jedoch den Nachteil, dass die Position der Risseinleitung nicht vorhersehbar ist. Da in der Simulation im Zuge einer Validierung eine bestmögliche Übereinstimmung mit Versuchsergebnissen erreicht werden soll, wird für die Zugversuche eine alternative Probenform getestet.

Eine schematische Darstellung einer genormten Flachprobe und deren Rissbildungsproblematik im Vergleich zur verwendeten Zugprobenform ist in der Abbildung 4-10 dargestellt:

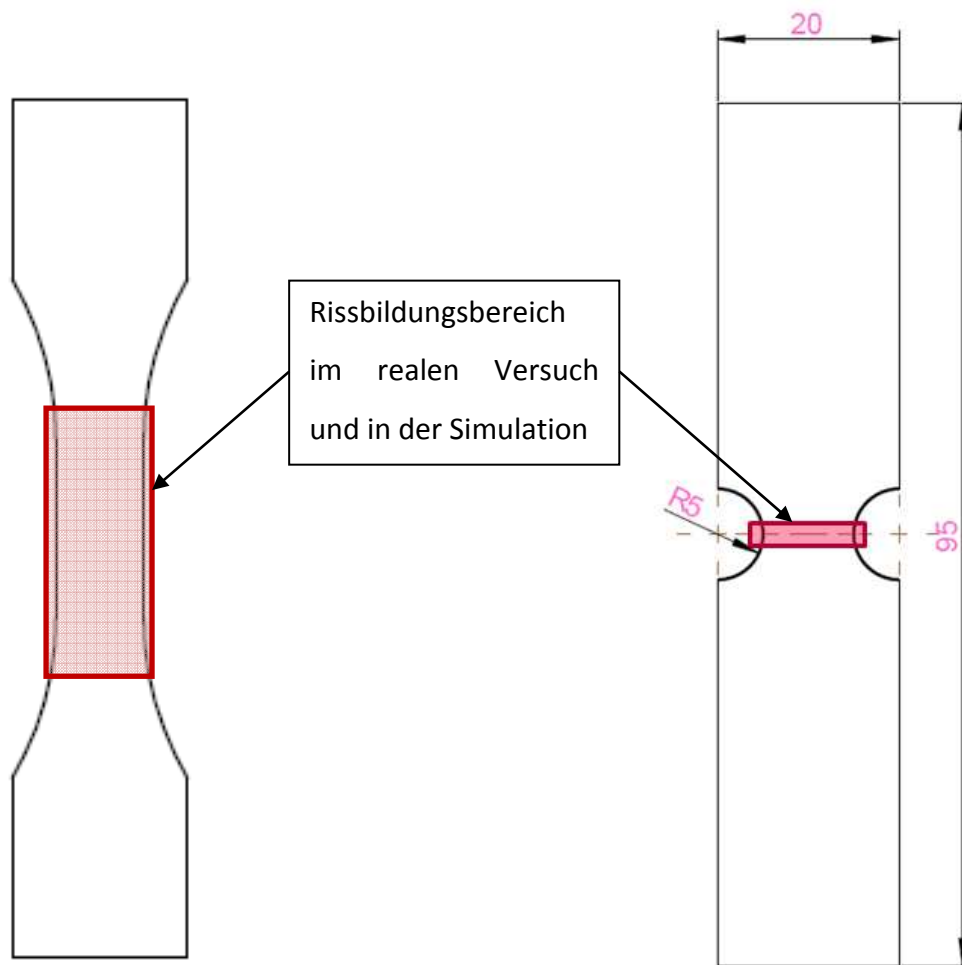


Abbildung 4-10 Vergleich einer genormten Zugprobenform (links) und der verwendeten Geometrie (rechts)

Auf Grund dieser Tatsache wurde nach Rücksprache mit einem Assistenten des Instituts für Festigkeitslehre an der Technischen Universität Graz eine neue Geometrie, die in der rechten Abbildung dargestellt ist, generiert. Somit konnte ein reproduzierbares Versagenskriterium im Versuch und der numerischen Simulation abgeleitet werden. Die durch die gekerbte Struktur vorhandene Spannungsüberhöhung (ca. 5%) kann mittels einer analytischen Lösung berechnet werden.

4.5 Durchführung des Zugversuchs und Ergebnisse

Dieses Teilkapitel beinhaltet die Durchführung der Zugversuche, Details zur Probenherstellung und die Ergebnisse der Versuche. Als Zugprüfmaschine wurde das institutseigene Prüfgerät (Z3-X500) verwendet. Aufgrund der extrem dünnen Probendicken ergaben sich Probleme mit der Einspannung der Prüflinge in der Prüfmaschine. Die anfänglich selbst gebauten Spannelemente aus zwei Blechen wurden aus technischen Gründen durch pneumatische Gummispannbacken ersetzt, welche vom Hersteller als

Zubehör zur Zugprüfmaschine empfohlen wurden. Die Gummischicht hat allerdings einen nicht unerheblichen Einfluss auf das Messergebnis, insbesondere die Bruchdehnung der Proben wurde deutlich verfälscht. Um diesen Effekt zu beseitigen, wurden letztendlich diamantbeschichtete Spannbacken angeschafft und alle Tests damit durchgeführt. Ein Vergleich der ermittelten Kraft-Weg-Kurven zwischen Gummi- und Diamantbacken ist in den Versuchskurven (siehe Zugversuchsergebnisse) abgebildet. Für die weiteren Betrachtungen, wie beispielsweise für die Validierung Simulation/Versuch, werden ausschließlich jene Verläufe, die durch die diamantbeschichteten Spannbacken ermittelt werden konnten, herangezogen. Die folgende Abbildung zeigt die eingesetzten Spannelemente:

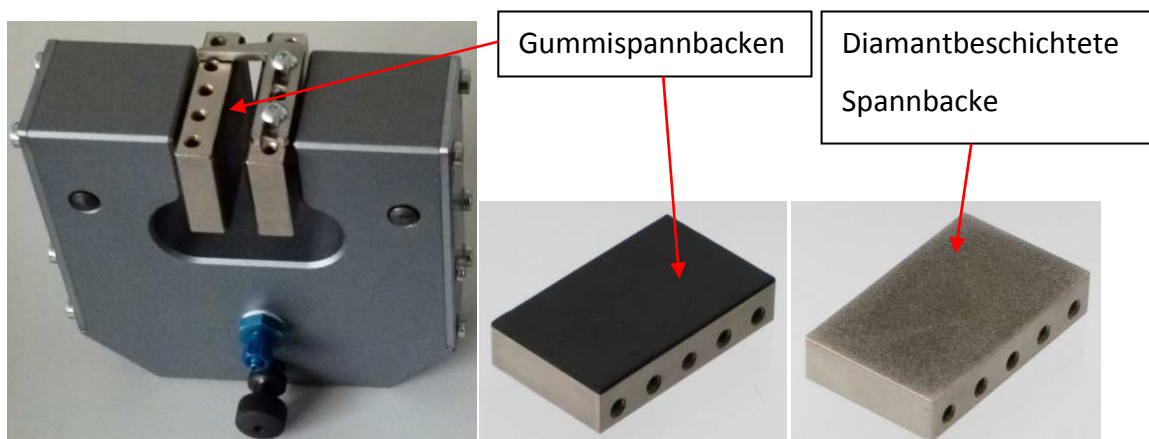


Abbildung 4-11 Pneumatisches Spannelement mit den verwendeten Spannbacken (10)

Mit dem pneumatischen Spannelement ist eine Spannkraft von 2,4kN erreichbar. Zur komfortablen Betätigung der Spannbacken wurden zusätzlich Fußtaster vom Hersteller bezogen, um ein schnelles und sicheres Einspannen zu gewährleisten.

In der Abbildung 4-12 ist die verwendete Prüfmaschine samt Eckdaten dargestellt:



Abbildung 4-12 Verwendete Zugprüfmaschine (11)

Ein weiterer Einflussfaktor auf die Messgenauigkeit der durchgeführten Zugversuche war die Kraftmessdose. Die anfänglich verwendete Lastzelle besitzt einen Messbereich von 3kN und eine Linearität von 0,03%. Die Kräfte, die bei den ersten Prinzipversuchen gemessen werden konnten, waren jedoch sehr gering ($<100\text{N}$), was zu einer gewissen Ungenauigkeit der Messergebnisse aufgrund des zu großen Messbereichs der Kraftmessdose führte. Durch diese Erkenntnisse wurde die Lastzelle mit einem Messbereich von 3kN durch eine Kraftmessdose mit 100N ersetzt. Der gesamte Prüfaufbau ist in der folgenden Abbildung dargestellt:

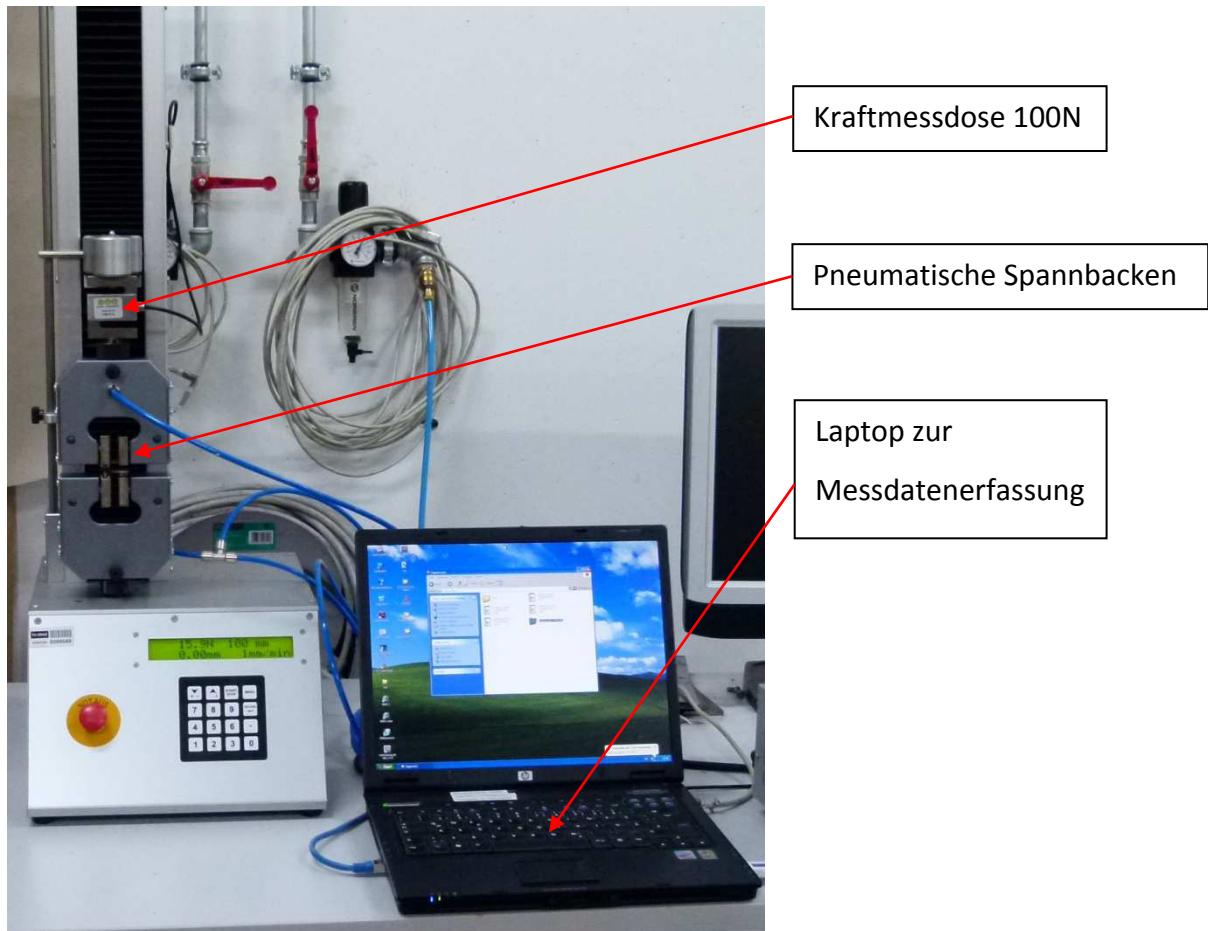


Abbildung 4-13 Prüfaufbau Zugversuch

Zugprobenherstellung:

Die Herstellung und Präparierung von Zugproben gilt in der Industrie als äußerst aufwendig und kostenintensiv. Höchstmögliche Präzision ist notwendig, um wiederholbare Ergebnisse zu erzielen, mit denen dann letztendlich das Simulationsmodell abgeglichen werden soll.

Folgende Aspekte sind dabei zu berücksichtigen:

- Reproduzierbarkeit der Probengeometrie → Alle Proben sollten die gleichen Abmessungen besitzen
- Erstellen der Prüflinge nur im ungeladenen Zustand möglich → Ansonsten Kurzschlussgefahr
- Probenpräparation (z.B. Schleifen) auf Grund der kleinen Abmessungen und der sehr geringen Dicke mit den verfügbaren Mittel nicht möglich
- Untersuchung von möglichen Richtungsabhängigkeiten der Proben → Prüflinge müssen in Längs- und Querrichtung zur Zelle geschnitten werden (siehe Abbildung 4-15)

Auf Grund der angeführten Gesichtspunkte waren folgende Herstellungsmethoden denkbar:

- Stanzen
- Laserschneiden
- Wasserstrahlschneiden

Durch den Umstand, dass brennbare Stoffe in der Lithium-Polymer-Batterie enthalten sind, wurde Laserschneiden als Probenherstellungsmethode ausgeschlossen. Stanzen konnte wegen den dazu benötigten kostspieligen Stanzwerkzeugen auch nicht in Betracht gezogen werden, weshalb die Proben mittels Wasserstrahlschneiden angefertigt wurden. Mit der Wasserstrahlmaschine konnte eine Genauigkeit der gewählten Geometrie im Hundertstel-Millimeter-Bereich erreicht werden. Die folgenden Abbildungen zeigen Auszüge der Probenherstellung und das Schnittbild der Zelle:



Abbildung 4-14 Probenherstellung durch Wasserstrahlschneiden

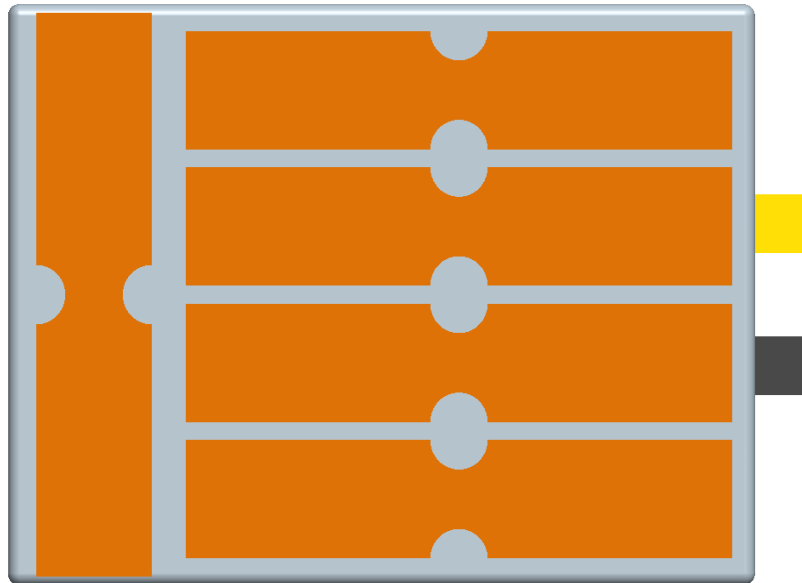


Abbildung 4-15 Schnittbild der Lithium-Polymer-Zelle

Die bereits erwähnte Richtungsabhängigkeit, die beispielsweise auf Herstellungsverfahren der Einzelkomponenten zurückzuführen ist (unterschiedliche Walzverfahren: kalt-warmgewalzt), wird durch das oben gezeigte Schnittbild untersucht. Dabei stellt die vertikale Probe in der Abbildung 4-15 die Querprobe dar und wird in den folgenden Versuchskurven mit „_q“ beschrieben.

Nach dem Zuschchnitt der Zugproben wurde eine mikroskopische Untersuchung des Schnittbildes einer Anode durchgeführt, um Abweichungen in den Materialwerten nach Absolvierung der Zugversuche begründen zu können. Ein Auszug dieser Untersuchungen ist in der folgenden Abbildung ersichtlich:

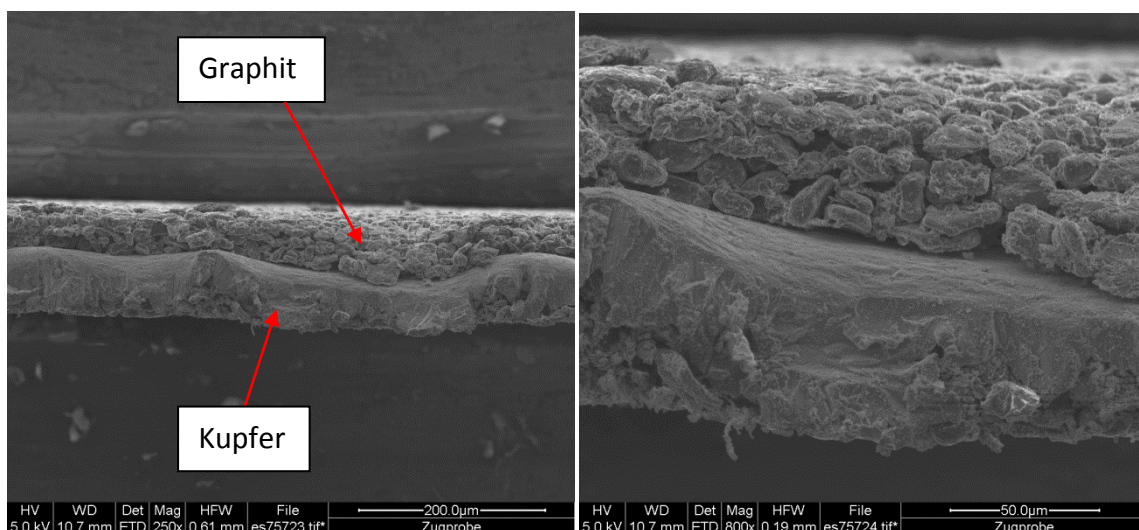


Abbildung 4-16 Mikroskopisches Schnittbild der Anode

Das Zuschneiden der Proben mit der Wasserstrahlschneidmaschine verursachte, wie in der oberen Abbildung dargestellt, mikroskopische Kerben bzw. starke Unregelmäßigkeiten auf der Materialoberfläche. Damit lassen sich die erheblichen Unterschiede in den mittels Zugversuch bestimmten Werkstoffparametern (Zugfestigkeit, Elastizitätsmodul) im Vergleich zu Werten aus der Literatur (12) erklären. Die grobkörnige und inhomogene Struktur des Graphits stimmt mit der mikroskopischen Untersuchung der ungeschnittenen Probe (siehe Abbildung 4-7) gut überein.

Zugversuchsergebnisse:

Vor der Durchführung der Versuche mussten für alle Proben einheitliche Prüfbedingungen festgelegt werden (Tabelle 4-5):

	Einspannlänge [mm]	Geschwindigkeit ZPM [mm/min]	Pre-Force [N]
Anode	13,9	1	1
Kathode	13,9	1	1
Separator	13,9	5	1
Hülle (Pouch)	13,9	5	1

Tabelle 4-5 Prüfbedingungen Zugversuch

Aufgrund der höheren ertragbaren Dehnung von Separator und Pouch und der damit verbundenen längeren Versuchsdauer, wurde die Geschwindigkeit der Zugprüfmaschine bei diesen Tests um das Fünffache erhöht.

Aufgrund der Tatsache, dass nicht alle Prüflinge nach dem Einspannen gleich „gestreckt“ waren, erfolgte die Aufzeichnung des Weges ab einer Vorspannkraft (Pre-Force) von 1N. Damit konnte eine unnötige Aufzeichnung des Weges vor dem Kraftanstieg vermieden werden.

Folgende Versuchskonfigurationen wurden miteinander verglichen:

- Vergleich Längs-/Querproben zur Überprüfung der Richtungsabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften der Einzelkomponenten
- Vergleich „trockene“/„feuchte“ Proben zur Untersuchung des Einflusses des Elektrolyts auf die mechanischen Eigenschaften der Prüflinge
- Vergleich Gummispannbacken/diamantbeschichtete Spannbacken zur Untersuchung des Einflusses des weichen Materials (Gummi) auf die Versuchskurven

Als trockene Proben werden in diesem Zusammenhang jene bezeichnet, die nach Öffnen der Zelle ein paar Tage im Freien getrocknet wurden, um somit eine vollständige Verflüchtigung des Elektrolyts herbeizuführen und um in weiterer Folge den Einfluss des gelartigen Stoffes auf die mechanischen Eigenschaften ausschließen zu können. Bei den feuchten Prüflingen handelt es sich um Proben, die gleich nach dem Zuschnitt getestet worden sind. Dadurch sollte ein möglicher Einfluss des Elektrolyts auf die Materialkennwerte abgebildet werden.

Die Anzahl der durchgeführten Versuche aller Proben richtete sich nach der Reproduzierbarkeit der Versuchskurven, wodurch die unterschiedlichen Versuchsanzahlen begründet sind. Als Kriterium für das Versuchsende wurde der vollständige Bruch der Probe gewählt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden bei manchen Diagrammen nicht alle Versuchskurven dargestellt.

Anode:

Die Abbildung 4-17 zeigt den Einfluss der Quer- und Längsproben auf die Zugversuchskurven:

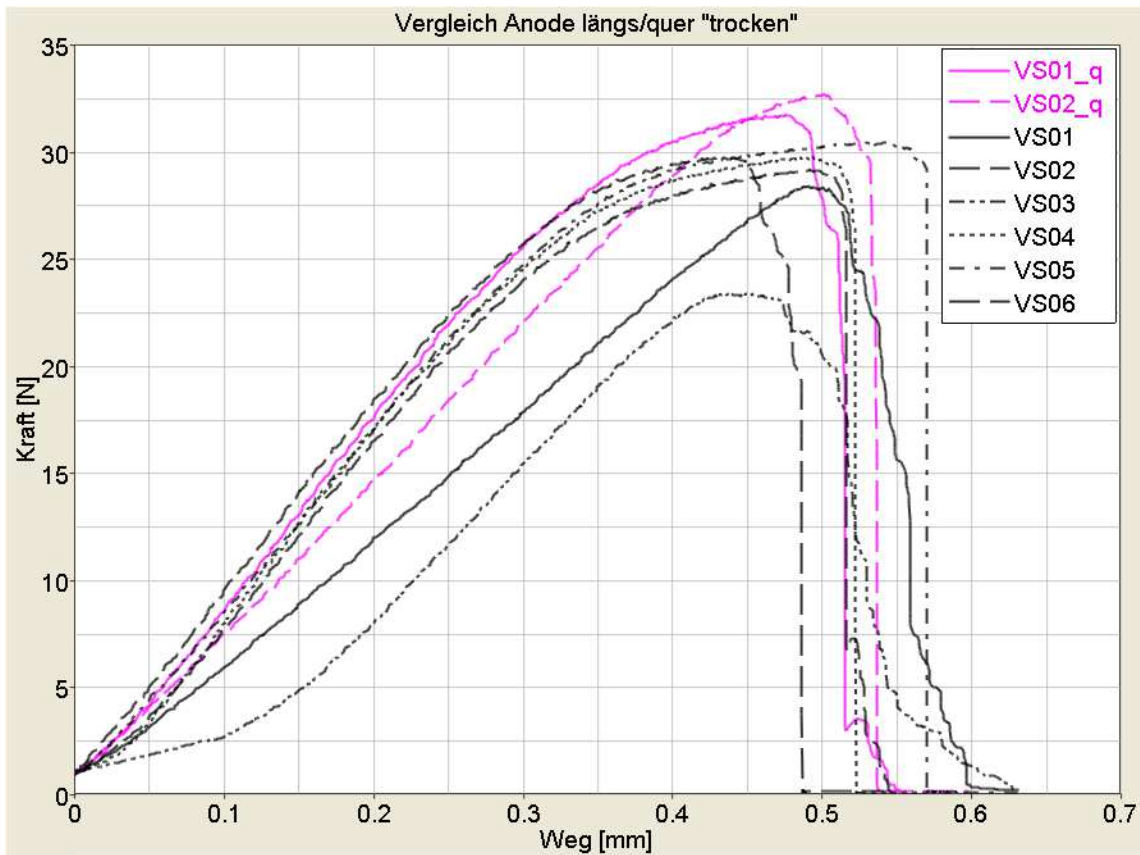


Abbildung 4-17 Vergleich Zugversuch Anode längs/quer „trodden“

Im oberen Diagramm wurden „trockene“ Proben und Gummispannbacken verwendet. Es zeigt sich eine minimale Richtungsabhängigkeit, wobei diese mit der Verwendung der diamantbeschichteten Spannbacken nicht bestätigt werden konnte (siehe Abbildung 4-18). Als „Ausreißer“ können die Versuche VS01 und VS03 bezeichnet werden, was sich auf Fehler in der Einspannung (z.B. Schiefes Einspannen der Probe) und möglicherweise Kerben in der Probe, zurückführen lässt.

In der nächsten Abbildung ist der Einfluss der diamantbeschichteten Spannbacken erkennbar:

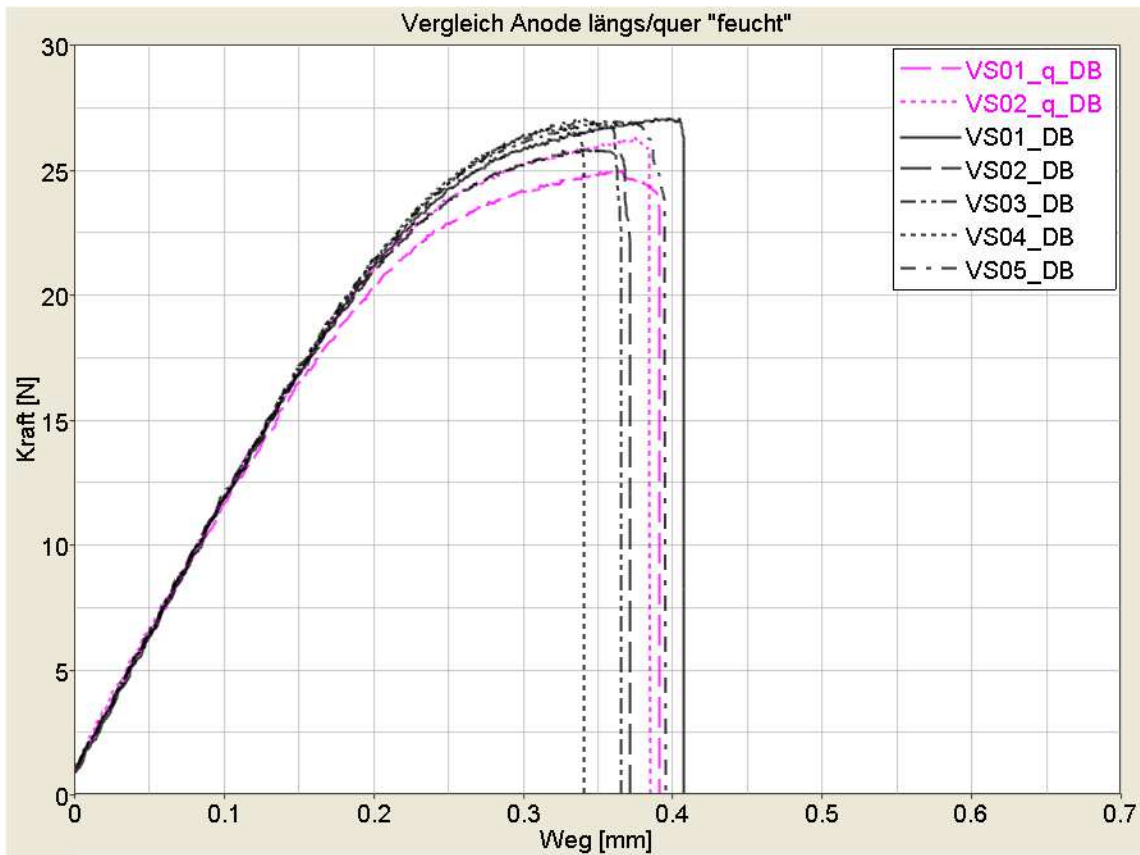


Abbildung 4-18 Vergleich Zugversuch Anode längs/quer „feucht“

Der dargestellte Versuch wurde mit „feuchten“ Proben, d.h. die Proben wurden direkt nach dem Wasserstrahlzuschnitt belastet, und mit diamantbeschichteten Spannbacken durchgeführt.

Ein Vergleich zwischen „trockenen“ und „feuchten“ Versuchen mit diamantbeschichteten Spannbacken erfolgt in der nächsten Abbildung:

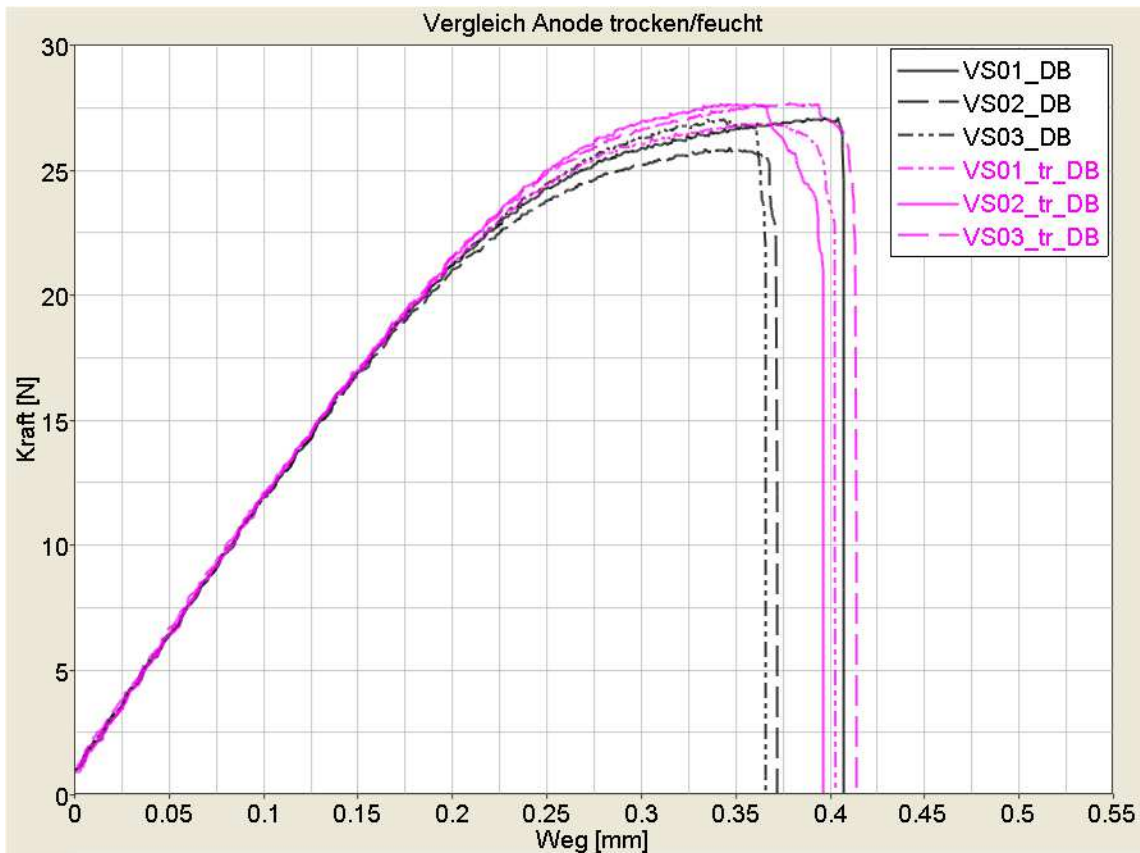


Abbildung 4-19 Vergleich Zugversuch Anode „trocken“/„feucht“

In der Literatur (13) wird oftmals der Einfluss des Elektrolyts auf die mechanischen Eigenschaften der einzelnen Komponenten der Zelle beschrieben. In der besagten Literatur (13) ist beispielsweise der Unterschied zwischen einem getränkten und getrockneten Separator dargestellt. Dabei liegt der Wert des Elastizitätsmoduls um ca. 15% höher als jener des trockenen Materials. Dies konnte bei den Zugversuchen, welche z.B. die Abbildung 4-19 zeigt, nicht bestätigt werden.

Das kommende Diagramm stellt die Gummibacken und die diamantbeschichteten Spannbacken gegenüber:

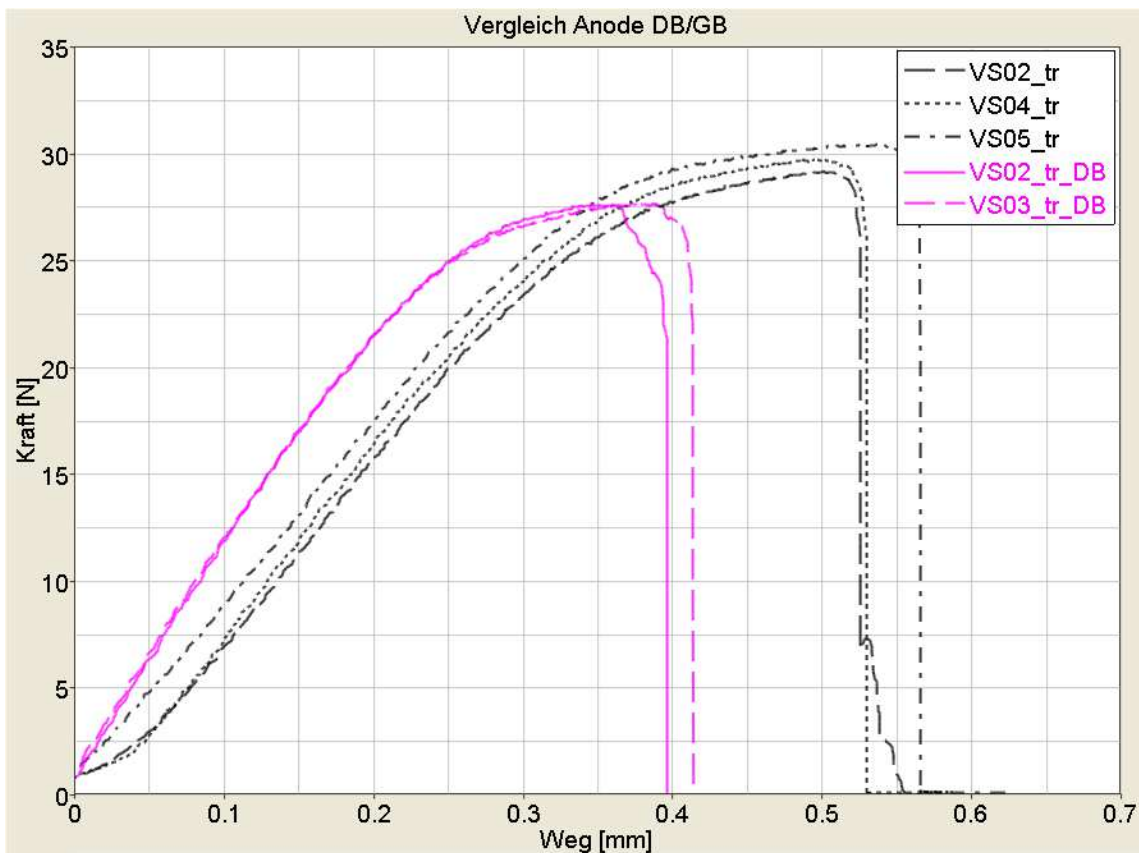


Abbildung 4-20 Vergleich Anode Gummibacken/diamantbeschichtete Spannbacken

In der oben dargestellten Abbildung 4-20 ist der Unterschied der Spannelemente klar erkennbar. Die schwarzen Kurven repräsentieren die Gummibacken (GB), die rosa Linien stellen die diamantbeschichteten Spannbacken (DB) dar. Bei vergleichbarem maximalem Kraftniveau zeigen sich Abweichungen im Anstiegsverhalten der Kurven sowie bei den Bruchdehnungen. Diese Phänomene sind durch den Einfluss des geringeren Elastizitätsmoduls der Gummischicht auf den Spannbacken begründbar.

Abschließend zu den Anodenversuchen können zusammenfassend folgende Schlüsse gezogen werden:

- Geringe/keine Richtungsabhängigkeit der Prüflinge erkennbar
- Keine Auswirkung des Elektrolyts auf die Versuchskurven
- Starke Unterschiede ergaben sich bei den Kurven durch die verschiedenen Spannbacken

Aufgrund der Tatsache, dass auch bei den anderen Einzelkomponenten kein Einfluss des Elektrolyts festgestellt werden konnte und in weiterer Folge nur mehr die Ergebnisse der diamantbeschichteten Spannbacken für die Validierung Simulation/Versuch herangezogen werden, wird in den folgenden Abbildungen nur mehr der Vergleich der Längs- mit den Querproben im feuchten Zustand angestellt.

Kathode:

Im folgenden Diagramm macht sich bereits ein Unterschied im Verlauf der Kurven im Vergleich zur Anode bemerkbar, insbesondere bei der maximalen Bruchdehnung. Dies erscheint auch plausibel, da die Elektroden aus verschiedenen Trägermaterialien bestehen und unterschiedliche Schichtstärken aufweisen (Kupfer, Aluminium).

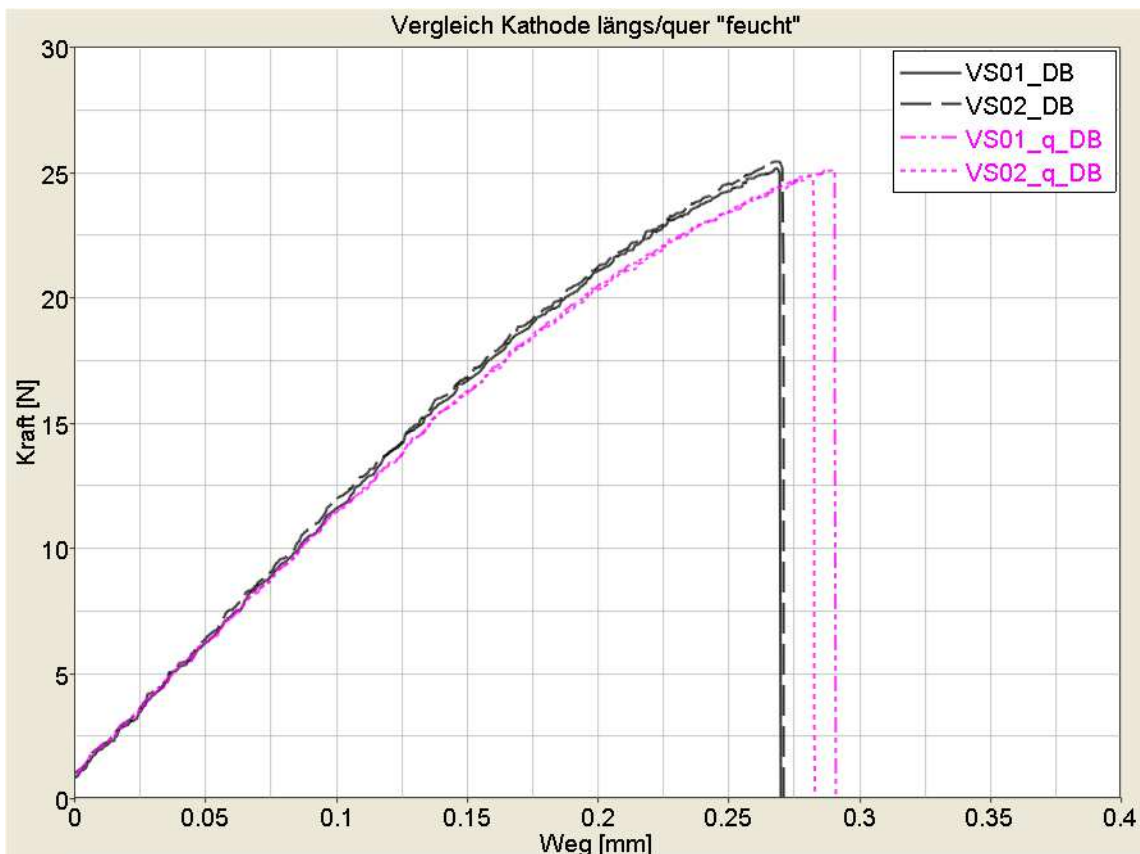


Abbildung 4-21 Vergleich Zugversuch Kathode längs/quer „feucht“

Die Richtungsabhängigkeit ist auch bei dieser Zelle für die Kathode nur sehr gering ausgeprägt, wobei das Kraftniveau von 25N bei den Längs- und Querversuchen ident ist. Abschließend zu den Kathodenversuchen können zusammenfassend folgende Schlüsse gezogen werden:

- Geringe/keine Richtungsabhängigkeit der Prüflinge erkennbar
- Keine Auswirkung des Elektrolyts auf die Versuchskurven
- Starke Unterschiede ergaben sich bei den Kurven durch die verschiedenen Spannbacken

Separator:

Der Separator ist zur Verbesserung des Lithium-Ionentransports mit Elektrolyt getränkt. Die Bezeichnung „feuchte“ und „trockene“ Versuche ist in diesem Zusammenhang nicht genau definiert, da es bedingt durch die Materialstruktur zu einer schnellen Verflüchtigung des Elektrolyts kommt. Aus Gründen der Einheitlichkeit wurden diese Bezeichnungen jedoch beibehalten. Die folgende Abbildung zeigt den Vergleich der Längs- und Querproben mit diamantbeschichteten Spannbacken:

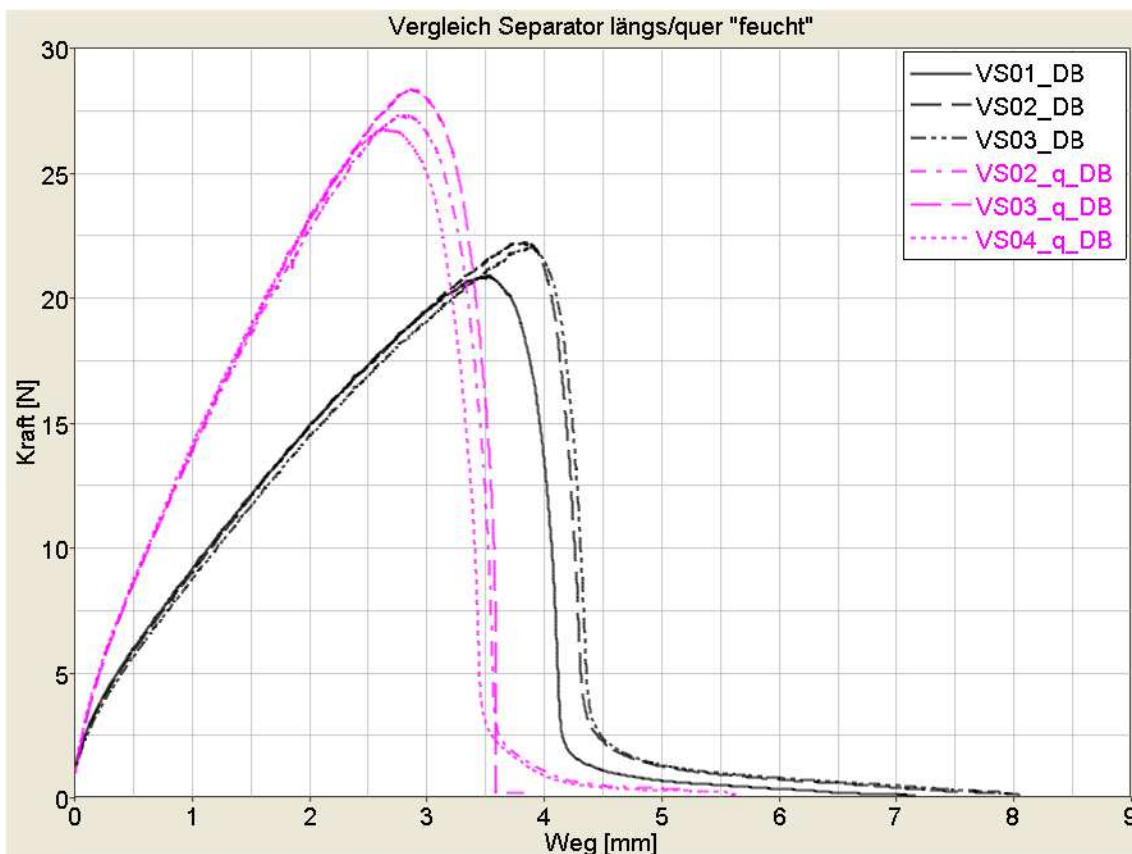


Abbildung 4-22 Vergleich Zugversuch Separator längs/quer „feucht“

In der oberen Abbildung ist eine große Richtungsabhängigkeit der Prüflinge feststellbar. Dies kann auf den Herstellungsprozess des Separators zurückgeführt werden. Dieser wird durch Extrusion (Verfahren zur Kunststoffherstellung) und anschließendem Kalandrieren

(Walzverfahren zur Kunststofffolienherstellung) hergestellt. Im Allgemeinen werden Polypropylen (PP) oder Polyethylen (PE) als Werkstoff für den Separator verwendet. Eine mikroskopische Aufnahme eines PP-Separators ist in der Abbildung 4-23 ersichtlich:

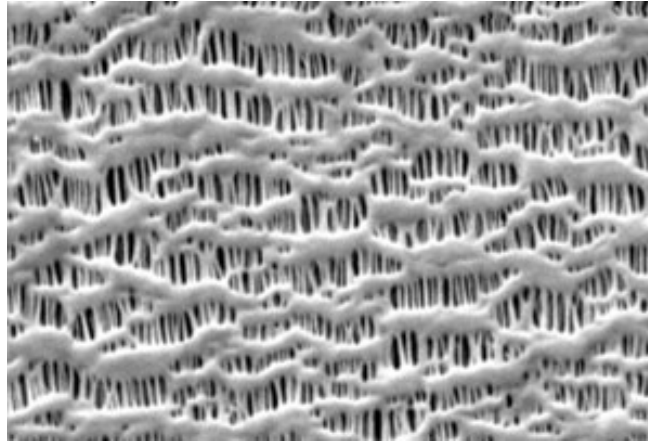


Abbildung 4-23 Mikroskopische Aufnahme eines PP-Separators (14)

Durch die in der Abbildung erkennbare Struktur kann die Richtungsabhängigkeit der Längs- und Querproben begründet werden.

Abschließend zu den Separatorversuchen können zusammenfassend folgende Schlüsse gezogen werden:

- Starke Richtungsabhängigkeit des Separators erkennbar, verursacht durch Herstellungsprozess
- Keine Auswirkung des Elektrolyts auf die Versuchskurven
- Starke Unterschiede ergaben sich bei den Kurven durch die verschiedenen Spannbacken

Hülle (Pouch):

Bei den Zugversuchen, die mit der Hülle durchgeführt wurden, standen nur wenige Proben zur Verfügung. Es konnte jedoch trotzdem eine gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse erzielt werden. Ein Vergleich von „trockenen“ und „feuchten“ Versuchen wurde deshalb nicht durchgeführt, da die Pouch für die Undurchlässigkeit des Elektrolyts verantwortlich ist.

Das Diagramm zeigt den Vergleich längs/quer mit den diamantbeschichteten Spannbacken:

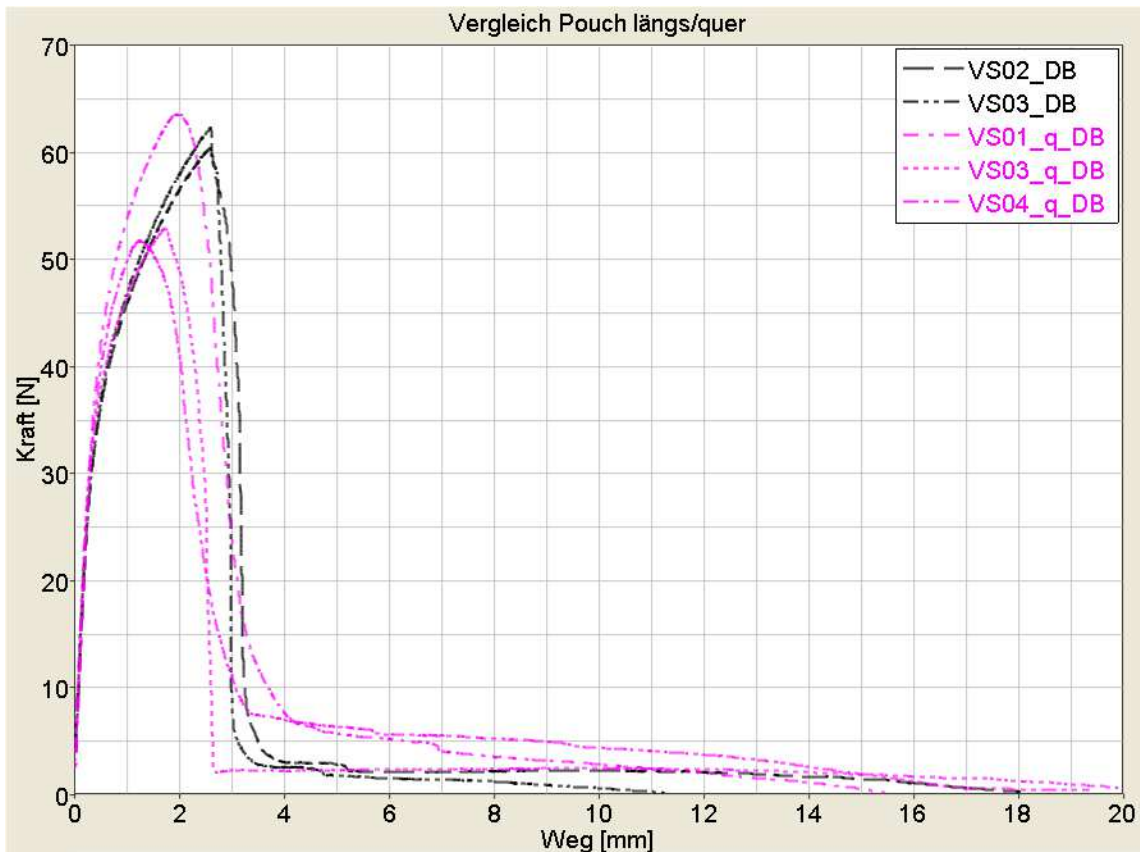


Abbildung 4-24 Vergleich Zugversuch Pouch längs/quer diamantbeschichtete Spannbacken

Auffällig ist die Restkraft aller Versuchskurven von ca. 10N bei ca. 4mm Verschiebung. Dies rührt daher, dass es zuerst im Bereich von 60-70N zum Bruch des Trägermaterials Aluminium kommt, anschließend ist nur mehr das Resttragverhalten der Kunststoffolie für den weiteren Kurvenverlauf verantwortlich, bis auch diese schlussendlich versagt. Dieses Resttragverhalten war auch im Versuch sichtbar, wie die folgende Abbildung zeigt:

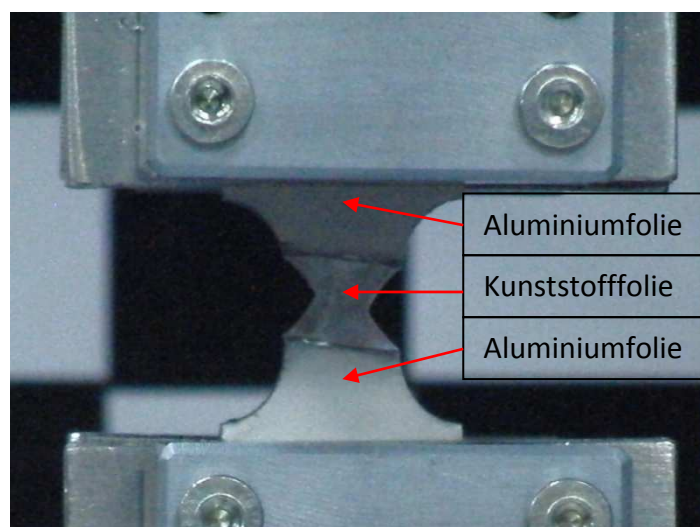


Abbildung 4-25 Zugversuch Pouch: Resttragverhalten der Kunststoffolie

In der Mitte des Bildes ist die noch tragende Kunststoffolie gut erkennbar. Dieser Effekt konnte bei allen Versuchen mit der Hülle festgestellt werden.

Eine Richtungsabhängigkeit der Längs- und Querproben (siehe Abbildung 4-24) konnte nicht bestätigt werden.

Abschließend können zu den Versuchen mit der Hülle folgende Schlüsse gezogen werden:

- Keine Richtungsabhängigkeit der Prüflinge erkennbar
- Keine Auswirkung des Elektrolyts auf die Versuchskurven
- Geringe Unterschiede ergaben sich bei den Kurven durch die verschiedenen Spannbacken

4.6 Durchführung des Durchbiegungsversuchs und Ergebnisse

Wie bereits in Kapitel 4.4 erwähnt, tragen die Aktivmaterialien aufgrund ihrer Werkstoffeigenschaften wenig zur Zugfestigkeit bei. Aufgrund der Tatsache, dass sie jedoch im Vergleich zum Trägermaterial um ein Vielfaches dicker sind leisten sie einen erheblichen Beitrag zur Biegesteifigkeit. Dieser Einfluss wurde mittels einfacher Versuche untersucht und anschließend auch in der Simulation (siehe Kapitel 5.3) abgebildet.

Durchbiegungsergebnisse:

Vor Durchführung der Durchbiegungsversuche wurde zunächst eine ungeladene Zelle geöffnet. Anschließend wurden Auflager, die auch beim 3-Punkt-Biegeversuch (siehe Kapitel 7) verwendet wurden, mit einem Abstand von 83mm (siehe Abbildung 4-26) positioniert. Dieser Abstand entspricht derselben Distanz, wie bei den durchgeführten Zellentests (siehe Kapitel 7.4).

Die Versuchsanordnung mit den vordefinierten Randbedingungen ist in der Abbildung 4-26 dargestellt:

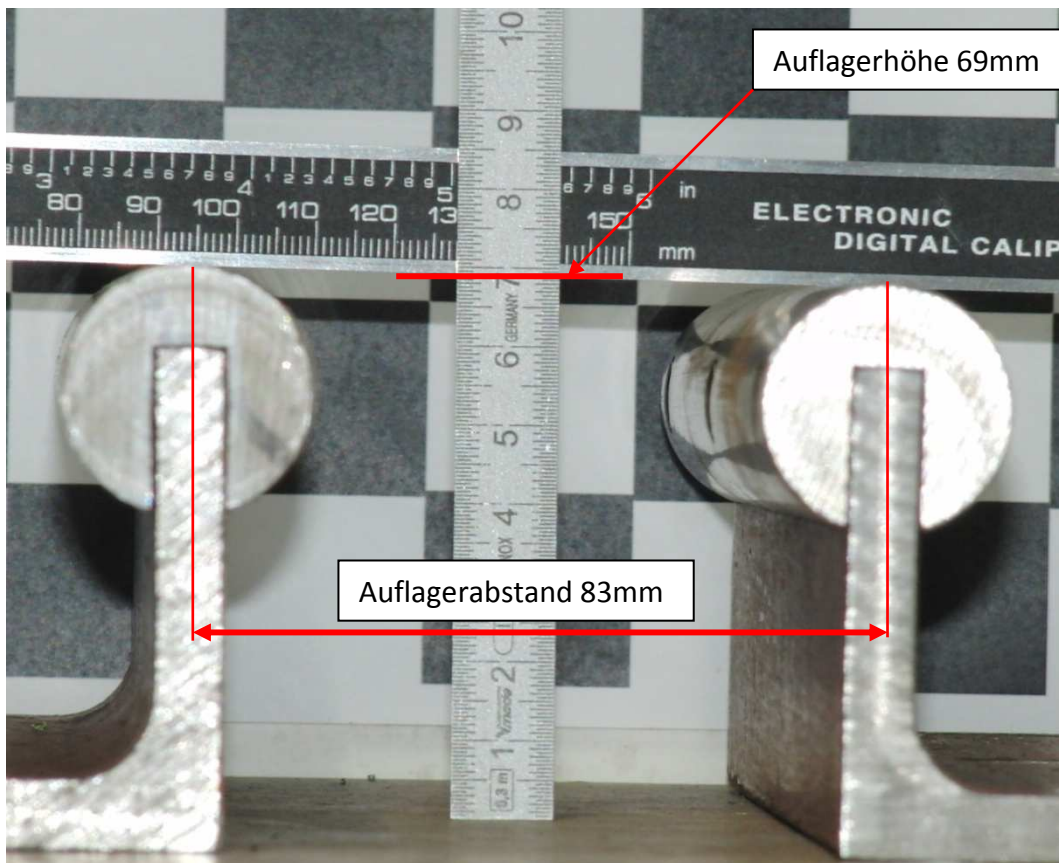


Abbildung 4-26 Versuchsanordnung Durchbiegung

Im nächsten Schritt wurde eine Elektrode aus der geöffneten Lithium-Polymer-Zelle entnommen und mittig auf die Auflager gelegt. Für die Anode sah dies wie folgt aus:

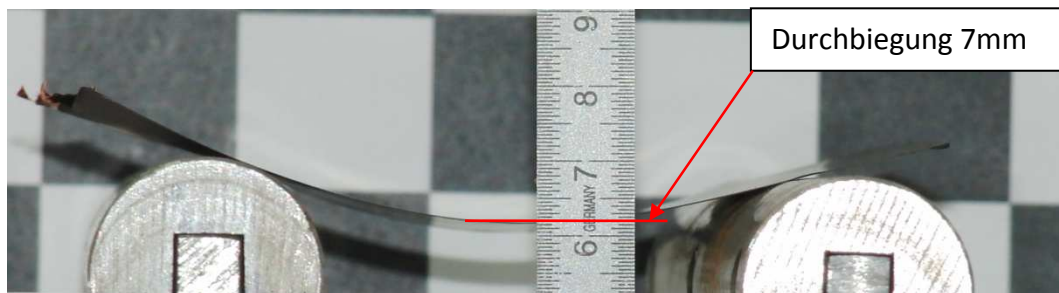


Abbildung 4-27 Durchbiegungsversuch Anode

In der oben dargestellten Abbildung ist die Durchbiegung der negativen Elektrode (Anode) gut erkennbar. Allein durch die Schwerkraft, also ohne zusätzliche Lasteinwirkung, beträgt diese 7mm.

Derselbe Versuch wurde mit der Kathode durchgeführt. Der Test ist in der folgenden Abbildung dargestellt:

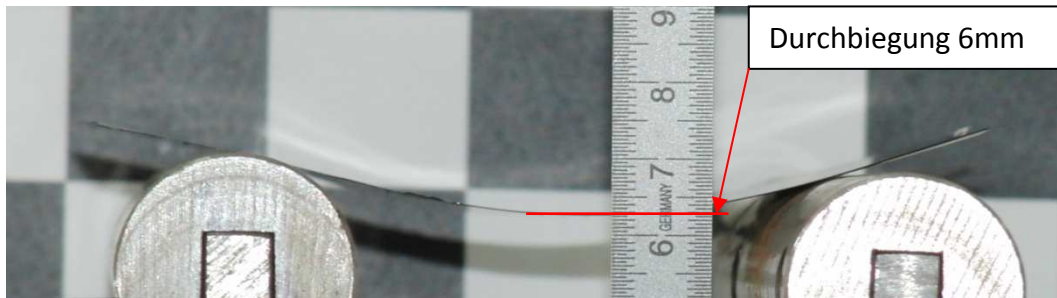


Abbildung 4-28 Durchbiegungsversuch Kathode

Durch die höhere Dicke des Aktivmaterials der Kathode ergab sich beim Versuch eine geringere Durchbiegung von 1mm im Vergleich zur Anode. Obwohl die beiden Elektroden unterschiedliche Trägermaterialien (Kupfer, Aluminium) mit jeweils anderen Schichtstärken besitzen, fiel der Unterschied in der Durchbiegung aufgrund der abweichenden Materialeigenschaften der Aktivschichten von Kathode und Anode vergleichsweise gering aus.

5 Simulation der Einzelkomponenten

Aus den in den Versuchen ermittelten Materialeigenschaften der einzelnen Komponenten der Batterie, kann nun im nächsten Schritt das Simulationsmodell der Batterie aufgebaut werden. Vor dem Aufbau des Gesamtmodells müssen zunächst die einzelnen Bestandteile bestmöglich abgebildet werden. In diesem Kapitel wird auf die Wahl geeigneter Materialmodelle, den Modellaufbau jeder Einzelkomponente für sich und den Vergleich der Tests mit dem Simulationsergebnis eingegangen.

5.1 Geeignete Materialmodelle

Das Programm LS-Dyna® bietet eine Vielzahl an unterschiedlichen Materialmodellen zur Auswahl an. Dabei kann zwischen universell einsetzbaren Modellen (z.B. *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY) und spezialisierten Materialmodellen (z.B. *MAT_LAMINATED_COMPOSITE_FABRIC) unterschieden werden. Jedes Modell hat Vorteile aber auch Einschränkungen, die vom Einsatz und dem zu beschreibenden Material abhängig sind. Zunächst muss also analysiert werden, welche physikalischen Effekte in den jeweiligen Lagen auftreten, um dann in weiterer Folge ein Materialmodell zu wählen, welches diese Effekte auch abbilden kann. Auf Grund der Versuchsdaten sollten die Materialkarten daher folgende Eigenschaften abbilden können:

- Elastisches Verhalten der Elektroden
- Plastisches Verhalten der Elektroden
- Richtungsabhängiges Verhalten des Separators (orthotropes Verhalten)
- Richtungsunabhängiges Verhalten der Elektroden (isotropes Verhalten)
- Resttragverhalten der Kunststoffolie nach Bruch der Aluminiumschicht (Hülle)
- Schädigungsverhalten, d.h. Versagen (Bruch) soll nachgebildet werden können (für alle Einzelkomponenten notwendig)

Durch diese Rahmenbedingungen kamen die nachfolgenden Materialkarten in die engere Auswahl:

- *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY (*MAT_024)
- *MAT_LAMINATED_COMPOSITE_FABRIC (*MAT_058)
- *MAT_ORTHOTROPIC_ELASTIC (*MAT_002)

- *MAT_ELASTIC (*MAT_001)

Im Folgenden werden die Materialkarten einzeln erklärt und ihre Stärken und Einschränkungen aufgezeigt:

***MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY (*MAT_024):**

Mit dieser Materialkarte kann ein Werkstoff mit elastisch-plastischem Verhalten nachgebildet werden. Zusätzlich ist die Eingabe eines Versagenskriteriums, mit dem man den Bruch der Probe „nachstellen“ kann, möglich. In der sogenannten Keywordcard des Materials (siehe Abbildung 5-1) wird dieses Versagenskriterium mit „FAIL“ bezeichnet und entspricht der maximal ertragbaren Dehnung (Bruchdehnung) des Werkstoffes. Für die Beschreibung der Einzelkomponenten der Batterie weist dieses Materialmodell folgende Vor- und Nachteile auf:

Vorteile:

- Elastisch-plastisches Verhalten (typisch für metallische Werkstoffe) kann nachgebildet werden
- Versagenskriterium kann berücksichtigt werden
- Einfache Parametrisierung der Materialkarte

Nachteile:

- Richtungsabhängigkeit kann nicht berücksichtigt werden
- Resttragverhalten der Kunststoffolie kann nicht nachgestellt werden

In der Keywordcard werden die Werkstoffdaten eingegeben und bestimmen dadurch den Kurvenverlauf des Spannung-Dehnung-Diagrammes. Die nachfolgende Abbildung zeigt exemplarisch den Aufbau des vorher beschriebenen Materials:

```
*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY
$#      MID      RO      E      PR      SIGY      ETAN      FAIL      TDEL
$#      1001     8.9E-6    10.    0.34    0.2      0.950    0.045    0.
$#      C      P      LCSS    LCSR    VP
$#      0.      0.      0.      0.      0.
$#      EPS1     EPS2     EPS3     EPS4     EPS5     EPS6     EPS7     EPS8
$#      0.      0.      0.      0.      0.      0.      0.      0.
$#      ES1      ES2      ES3      ES4      ES5      ES6      ES7      ES8
$#      0.      0.      0.      0.      0.      0.      0.      0.
```

Abbildung 5-1 Keywordcard eines elastisch-plastischen Materials

Jede Materialkarte besitzt eine Identifikationsnummer, die als Material-ID (MID) deklariert wird. Mit dieser ID kann der jeweiligen Komponente das zugehörige Material zugewiesen werden. Zusätzlich können dem Material die Eigenschaften: Dichte (RO), Elastizitätsmodul (E), Poissonzahl (PR), Streckgrenze (SIGY), die Steigung im plastischen Bereich eines Materials (ETAN) und Bruchdehnung (FAIL) zugeordnet werden. Weitere Parameter sind effektive plastische Dehnwerte (EPS1-EPS8) die dazugehörigen Werte der Streckgrenze (ES1-ES8) die anstelle von SIGY und ETAN definiert werden können, wobei diese für die Parametrisierung der Einzelkomponenten nicht verwendet wurden.

Die folgende Abbildung zeigt, wie diese Parameter den Kurvenverlauf der Kraft-Weg-Kurve für den Zugversuch beeinflussen:

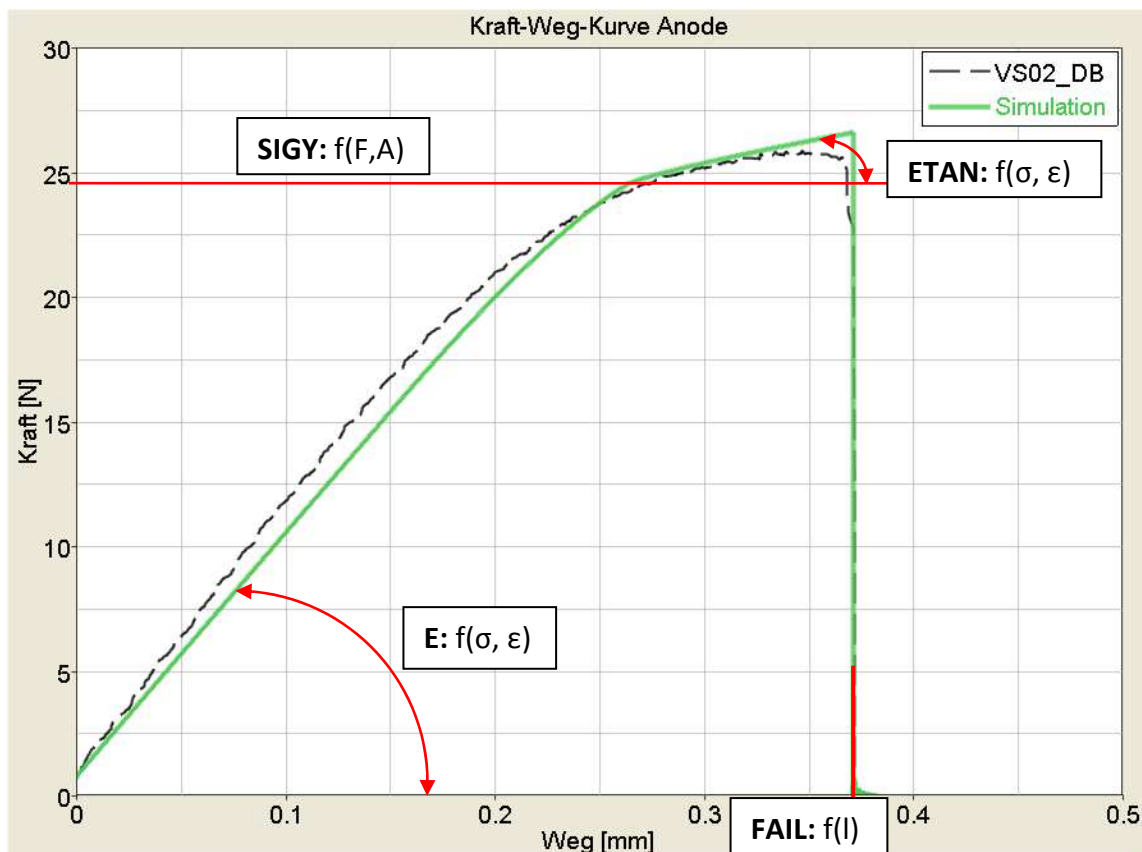


Abbildung 5-2 Einfluss der Materialparameter auf den Kraft-Weg-Verlauf in der Simulation

Durch die Variation dieser vier Parameter erfolgte die Anpassung des Kurvenverlaufs an den Realzugversuch der Anode und Kathode. Die Anfangssteigung der Kurve wird durch den Elastizitätsmodul (E) des Materials bestimmt. Mit der Streckgrenze (SIGY) wird der Beginn des plastischen Bereichs bestimmt, wobei die dabei auftretende Steigung mit dem ETAN-Wert beeinflusst wird. Der Parameter „FAIL“ (Bruchdehnung) ist das Versagenskriterium,

d.h. mit diesem Wert wird festgelegt, wann der Bruch der Probe eintreten soll. Für die Elemente des Simulationsmodells bedeutet dies, dass es nach Überschreiten des „FAIL“-Parameters zu einer Löschung der betroffenen Elemente kommt.

***MAT_LAMINATED_COMPOSITE_FABRIC (*MAT_058):**

Diese Materialkarte findet insbesondere im Bereich der Faserverbundwerkstoffe Verwendung, kann aber auch für beschichtete Materialien verwendet werden. Dabei kann, ausgehend von einem Schalenelement (Shell), der schichtweise Aufbau des Materials definiert werden. Die folgende Abbildung zeigt den Lagenaufbau eines Composite-Materials:

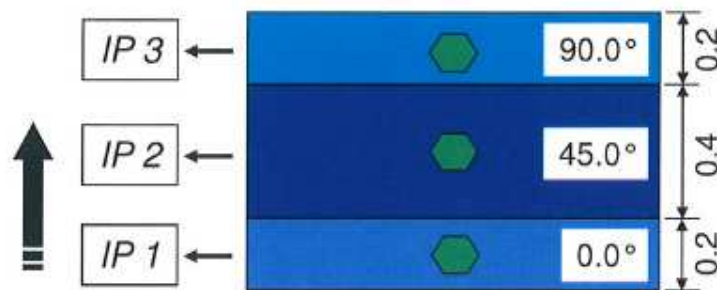


Abbildung 5-3 Aufbau eines Faserverbundwerkstoffes in LS-Dyna (15)

Die Lagendicke sowie der Lagenwinkel kann für jeden einzelnen Integrationspunkt (IP) explizit definiert werden, somit ergibt sich die Gesamtdicke des Lagenaufbaus aus der Summe der Einzelschichtdicken. Desweiteren ist es möglich, dass jedem Integrationspunkt eine eigene Materialkarte zugewiesen werden kann.

Vorteile:

- Verschiedene Beschichtungen einzeln parametrisierbar (Dicke, Elastizitätsmodul...)
- Versagenskriterium kann berücksichtigt werden
- Richtungsabhängigkeit abbildbar

Nachteile:

- Schwierigere Parametrisierung durch die Vielzahl an verschiedenen definierbaren Materialwerten im Gegensatz zum *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY
- Problematisch für die in weiterer Folge abzubildenden Biegeversuche der Zelle in der Simulation, da beim Versagen einer Schicht des Verbundes (z.B.: Graphit-Beschichtung der Elektrode) auch die anderen Elemente gelöscht werden. Das

Versagen der Aktivschicht auf der Elektrode bei intakt bleibender Aluminium- oder Kupferschicht kann also mit diesem Material nicht abgebildet werden.

***MAT_ORTHOTROPIC_ELASTIC (*MAT_002):**

Die Bezeichnung dieser Materialkarte beinhaltet das Wort „orthotropic“, d.h. dieses Materialmodell kann ein richtungsabhängiges (orthotropes) Verhalten von Werkstoffen abbilden. Besonders für den Separator, (siehe Abbildung 4-22) der in Längs- und Querrichtung, bedingt durch den Herstellungsprozess, unterschiedliche Materialeigenschaften besitzt, ist dieses Materialmodell von großer Bedeutung.

Vorteile:

- Richtungsabhängigkeit, die beim Zugversuch des Separators auftrat, abbildbar
- Einfache Parametrisierung der Materialkarte

Nachteile:

- Dieses Materialmodell beinhaltet kein Versagenskriterium
- Verschiedene Beschichtungen der Elektroden sind einzeln nicht parametrisierbar (homogener Aufbau des Materials)

***MAT_ELASTIC (*MAT_001):**

Für elastische Materialien mit isotropen Eigenschaften wird dieses Materialmodell verwendet.

Vorteile:

- Sehr einfache Parametrisierung der Karte
- Isotropes Verhalten abbildbar

Nachteile:

- Versagenskriterium kann allein durch die Verwendung dieser Materialkarte nicht berücksichtigt werden
- Nur elastisches Verhalten abbildbar
- Richtungsabhängigkeit kann nicht berücksichtigt werden

Durch die Gegebenheit, dass viele Materialmodelle kein Versagenskriterium besitzen, bietet LS-Dyna® die Möglichkeit, ein solches Abbruchkriterium durch die Verwendung von zusätzlichen Materialkarten zu definieren. Eine dieser Karten nennt sich

*MAT_ADD_EROSION mit der beispielsweise die maximal ertragbare Dehnung des Werkstoffes angegeben werden kann. So ist es möglich, für die Abbildung des Separators mit dem orthotropen Materialmodell MAT_002 (in welchem ja kein Bauteilversagen abgebildet werden kann) nachträglich mit MAT_ADD_EROSION Versagenskriterien in Abhängigkeit der Belastungsrichtung zu definieren. In der folgenden Tabelle sind die eingesetzten Materialmodelle für die einzelnen Komponenten der Lithium-Polymer-Zelle übersichtlich dargestellt:

Einzelkomponente	Materialkarte
Anode (Träger- und Aktivmaterial)	*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY (*MAT_024)
Kathode (Träger- und Aktivmaterial)	*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY (*MAT_024)
Separator	*MAT_ORTHOTROPIC_ELASTIC (*MAT_002) *MAT_ADD_EROSION
Hülle (Pouch)	*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY (*MAT_024)

Tabelle 5-1 Verwendete Materialkarten für die Simulation der Einzelkomponenten

Für die beiden Elektroden, die jeweils aus dem Trägermaterial (Kupfer, Aluminium) und der Beschichtung (Graphit, Lithiummanganoxid) bestehen, wurden, wie in der oberen Tabelle ersichtlich, dieselben Materialkarten zur Abbildung des Realversuchs in der Simulation verwendet. Auch die Hülle, die ebenfalls einen Lagenaufbau aufweist (Kunststoff, Aluminium), konnte mit dem *MAT_024 modelliert werden.

5.2 Aufbau Simulationsmodell

Dieses Teilkapitel beinhaltet den Aufbau der Simulationsmodelle für die Einzelkomponenten. Durch die Beschichtungen mancher Komponenten (Pouch, Anode, Kathode) musste dementsprechend auch das Modell diesen Gegebenheiten angepasst werden. Alle Komponenten wurden als Shell modelliert, wobei die Anzahl der Shells der jeweiligen Bauteile untereinander variierte. Der Separator bestand aus einem Shell, die Pouch (Aluminium-Kunststoffolie) aus zwei Shells, um das Resttragverhalten der Hülle bestmöglich abbilden zu können. Kathode und Anode wurden durch drei Shells aufgebaut, da sie aus dem metallischen Trägermaterial (Kupfer, Aluminium) und der Beschichtung auf der Ober- und

Unterseite des Metalls bestehen. Die einzelnen Shells konnten dabei durch die Definierung aller drei Lagen (z.B. für die Elektroden) mit denselben Knoten, miteinander verbunden werden. Das heißt, bei einem vorzeitigen Versagen der Beschichtung (siehe Abbildung 5-6) werden die Elemente der versagenden Komponente gelöscht, gleichzeitig bleiben die Elemente des Trägermaterials erhalten, bis auch diese nach Eintreten des Versagenskriteriums eliminiert werden. Durch diese Modellierung konnte dem jeweiligen Shell die zugehörige Materialkarte zugewiesen werden. Der nächste Schritt war die Zuweisung der Randbedingungen, um den Realversuch bestmöglich nachstellen zu können. Die Abbildung zeigt das Modell und die definierten Randbedingungen für den Zugversuch:

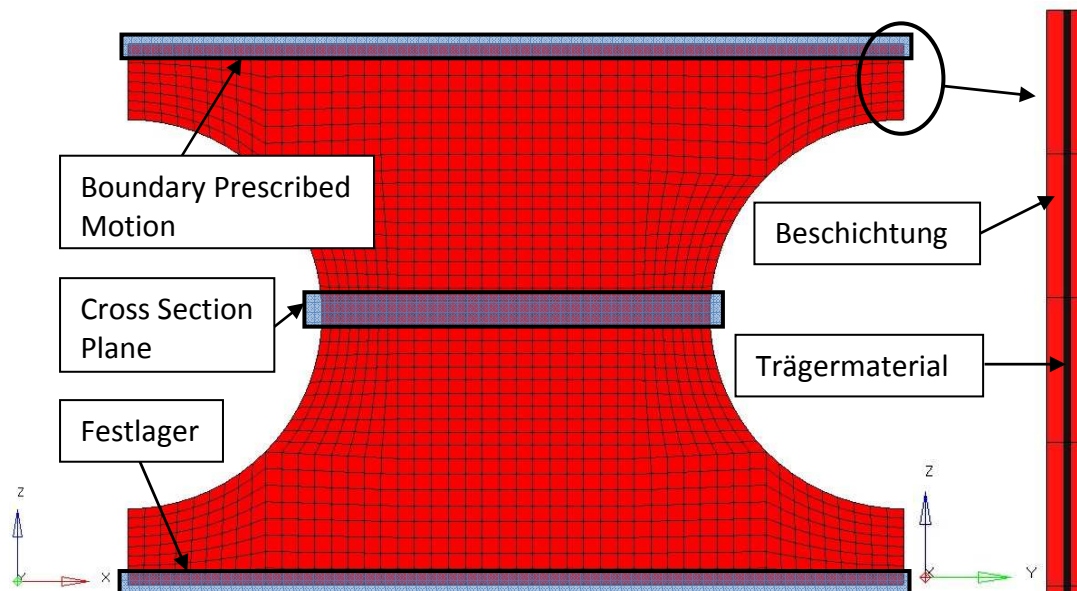


Abbildung 5-4 Simulationsmodell Zugversuch mit Randbedingungen

Als Festlager wurde die erste Reihe der Knoten definiert, diese Modellierung entspricht der Einspannung der Probe durch die Spannbacken. Die oberste Reihe der Knoten wurde mit einem „BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_SET“ nach einer vordefinierten Weg-Zeit-Kurve beaufschlagt. Mit dieser Kurve gibt man die Deformationsgeschwindigkeit über die Zeit an. Die Rechenzeit wurde mit 200ms festgelegt. Für das numerische Modell der Anode wurde somit ein Weg von 0,9mm (=Weg bei dem die Probe „sicher“ schon gerissen sein sollte) in 200ms zurückgelegt. Damit unterscheidet sich die Simulation deutlich vom Realversuch, bei dem der Test rund 55 Sekunden dauerte. Da aber eine Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften der einzelnen Zellkomponenten von der Belastungsgeschwindigkeit (siehe

Kapitel 3.2) nicht berücksichtigt wurde, spielt diese Abweichung keine Rolle bei der Validierung.

Die Verschiebung der oberen Einspannung als Funktion der Zeit, kann in das Ergebnis-File „NODOUT“ ausgegeben werden. Die Auswertung der anliegenden Zugkraft erfolgte über eine sogenannte „CROSS_SECTION_PLANE“. Dabei werden in einer definierten Ebene (siehe Abbildung 5-4) die Schnittkräfte in Z-Richtung (Zugkraft) ermittelt. Diese konnten in weiterer Folge gut mit der Belastung, die beim Realversuch auftrat, verglichen und das Modell somit validiert werden.

Die definierten Randbedingungen für das Simulationsmodell waren für alle Komponenten gleich, Unterschiede gab es nur in den Einstellungen der Weg-Zeit-Kurven.

Für den Durchbiegungsversuch wurden die gleichen Materialparameter wie beim Finite-Elemente-Modell der Zugversuche verwendet. Die Abmessungen der zu modellierenden Elektroden wurden aus den Ergebnissen der Batteriezerlegung (siehe Tabelle 4-2) entnommen. Das numerische Modell ist in der folgenden Abbildung dargestellt:

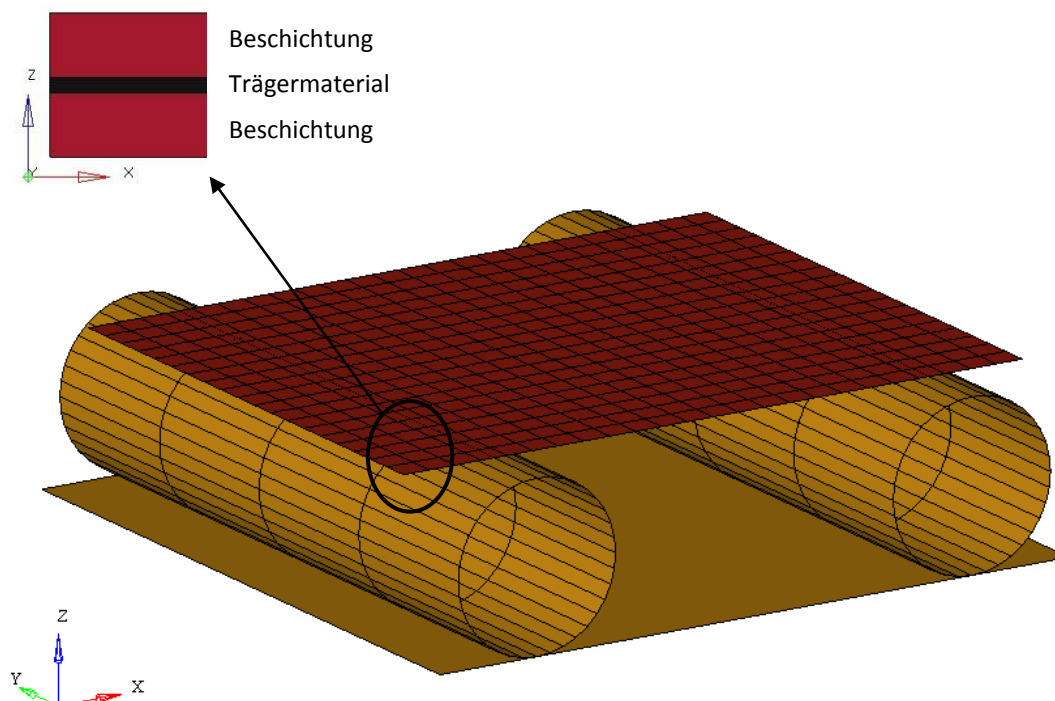


Abbildung 5-5 FE-Modell für die Abbildung der Durchbiegungsversuche

Die Elektroden sowie die Auflager wurden als Shell modelliert. Eine zusätzliche Belastung der Elektroden in der Simulation erfolgte nicht, im Modell wurde nur die, auch im Realversuch

wirkende, Schwerkraft implementiert. Die Kontakte zwischen den Auflagern und der Elektrode wurden durch Angabe eines Reibbeiwertes (0,1 - 0,2 entspricht Reibpaarung Stahl-Graphit trocken) bestmöglich nachgebildet. In der oberen Abbildung ist der Versuch zum Zeitpunkt $t=0\text{ms}$ (keine Verschiebung) dargestellt. Der Abstand zwischen den Auflagern und deren Durchmesser wurde entsprechend dem Realversuch angepasst.

5.3 Validierung Simulation/Versuch

In diesem Abschnitt werden die Simulationsergebnisse den Resultaten der Versuche gegenübergestellt. Als Vergleich wurden die repräsentativsten Kurvenverläufe der Zugversuche mit den diamantbeschichteten Spannbacken herangezogen. Die Ergebnisse der Durchbiegungsversuche wurden ebenfalls mit den Simulationsdaten verglichen.

Zugversuch:

Die folgende Abbildung zeigt einen Vergleich der Simulation mit dem Realversuch der Anode:

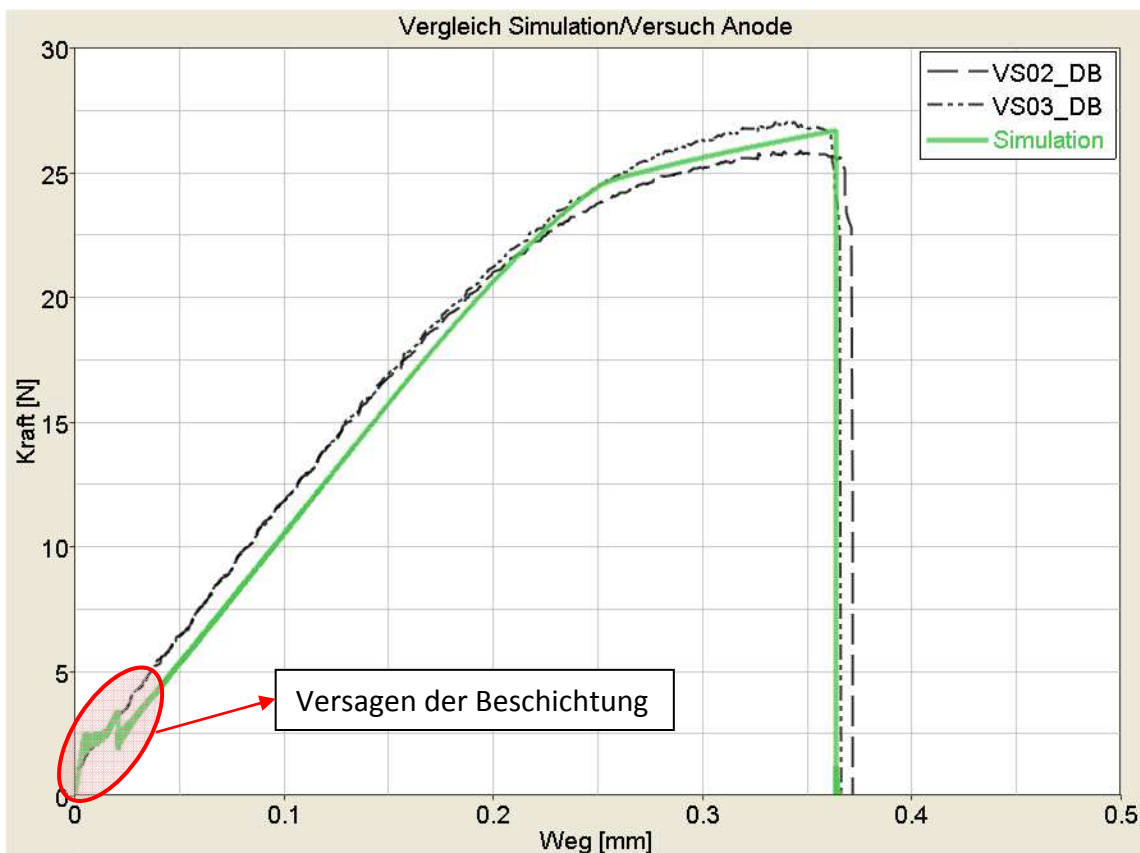


Abbildung 5-6 Vergleich Zugversuch/Simulation Anode

Im hervorgehobenen Bereich des Diagrammes kommt es zum Versagen des Aktivmaterials Graphit der Anode, dadurch lassen sich auch die Unregelmäßigkeiten des Kurvenverlaufs am Beginn erklären. Diese Unregelmäßigkeiten entstehen auf Grund von Schwingungen, die beim Bruch der Beschichtung auftreten. In der Simulation sieht dieses Versagen wie folgt aus:

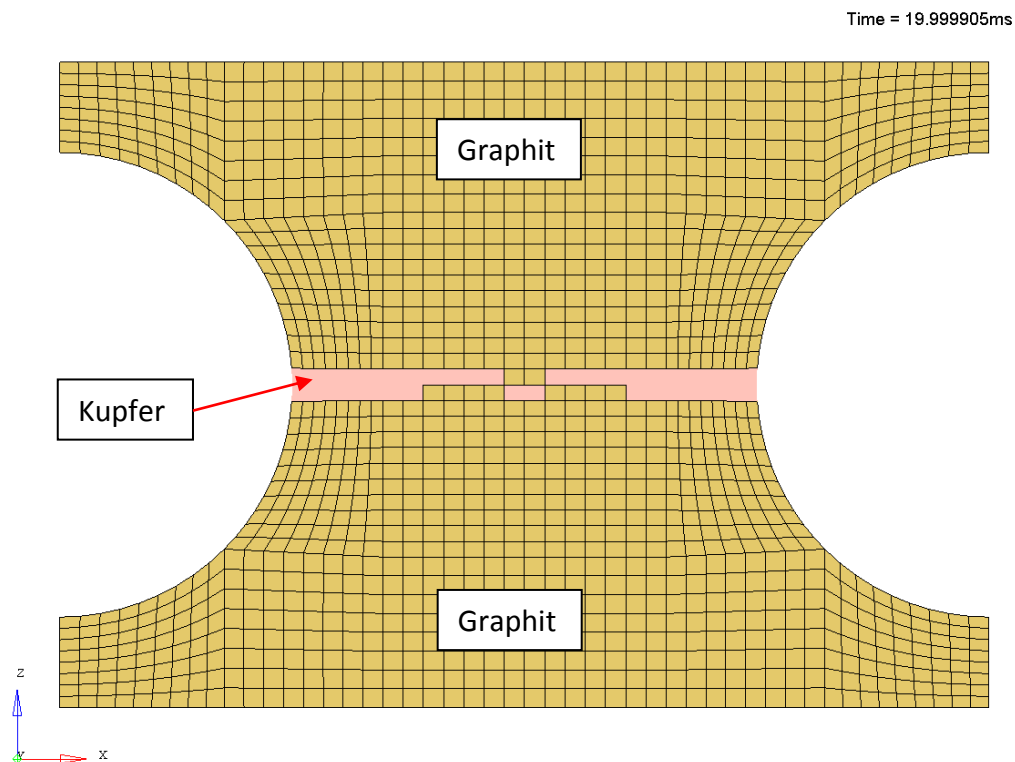


Abbildung 5-7 Versagen des Aktivmaterials Graphit

Die gelben Elemente stellen die Graphitbeschichtung dar. Darunter ist rosa das Trägermaterial Kupfer zu erkennen, welches im Zugversuch den Hauptteil der ertragbaren Zugkraft der Elektrode aufnimmt. Bei einer Rechenzeit von insgesamt 200ms kommt es nach ca. 0,025mm (siehe Abbildung 5-6) zum Versagen der Graphitschicht. Im Realversuch konnte das Versagen des Aktivmaterials optisch nicht festgestellt werden, doch auf Grund der Materialwerte des Graphits (Zugfestigkeit) aus der Literatur (12) ist es durchaus plausibel, dass ein solches Versagen der Beschichtung schon sehr früh eintritt. Zusätzlich kann davon ausgegangen werden, dass durch die festgestellte inhomogene Struktur des Aktivmaterials (Abbildung 4-16) die Zugfestigkeit der Beschichtung deutlich geringer ist, als jene aus der Literatur (12). Dadurch kann auch die Theorie für das sehr frühe Versagen des

Aktivmaterials bestätigt werden. Das Rissbild der Simulation im Vergleich mit dem Realversuch nach Bruch der gesamten Probe wird in der nächsten Abbildung dargestellt:

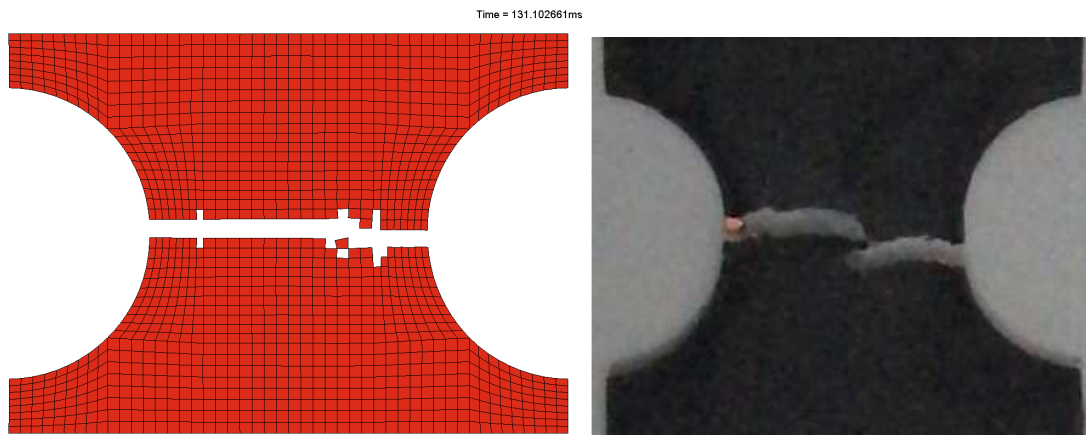


Abbildung 5-8 Rissbild Anode: Simulation (links), Versuch (rechts)

Der Bereich, in dem es zum Bruch der Probe kommt, konnte in der Simulation gut nachgestellt werden. Das Versagen der Probe in der Simulation trat bei ca. 0,37mm Verschiebung auf. Nach diesem Weg werden die einzelnen Elemente, wie in der oberen Abbildung erkennbar, gelöscht.

Ähnlich früh, wie bei der Anode, tritt auch das Versagen des Aktivmaterials der Kathode auf. Dieses Versagen ist in der Abbildung 5-9 dargestellt:

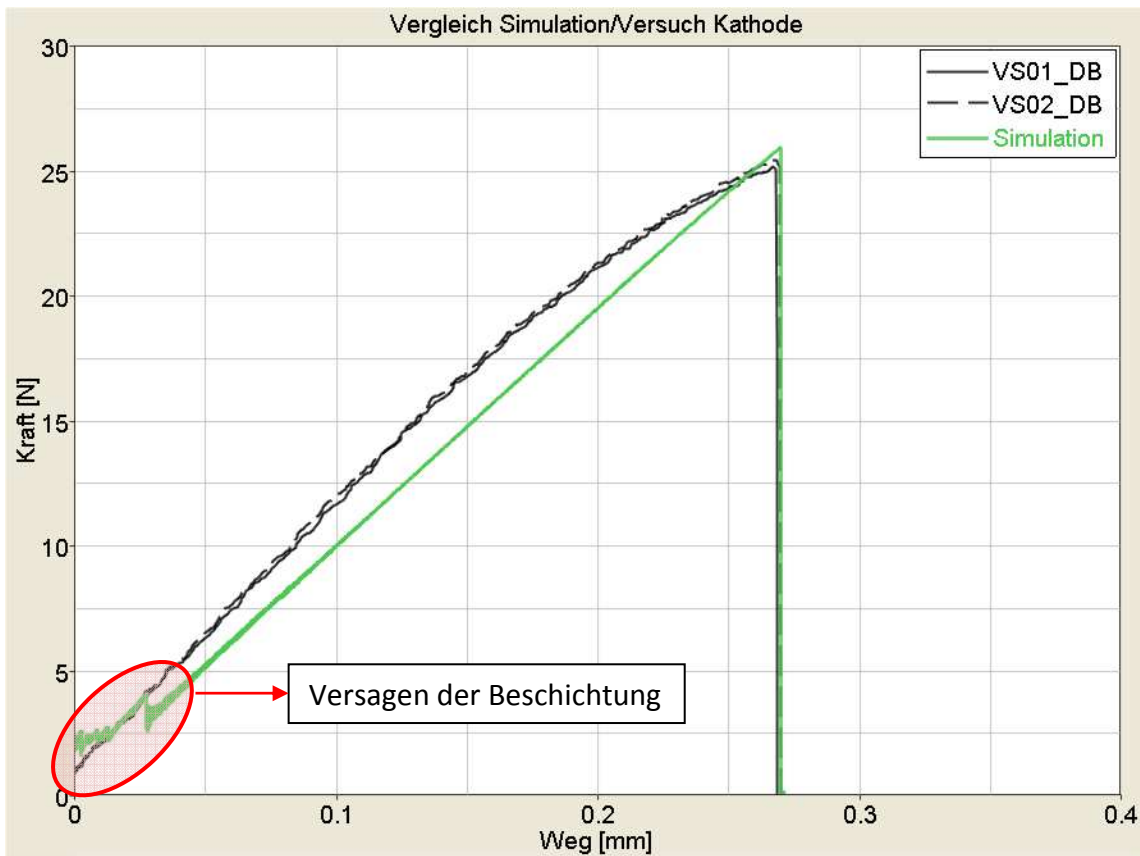


Abbildung 5-9 Vergleich Zugversuch/Simulation Kathode

Der Kraft-Weg-Verlauf der Simulation der Kathode kam dem des Realversuches sehr nahe. Das Versagen der Beschichtung während des Tests war auch bei dieser Komponente optisch nicht erkennbar.

Die Simulationsergebnisse des Separators sind in der folgenden Abbildung dargestellt:

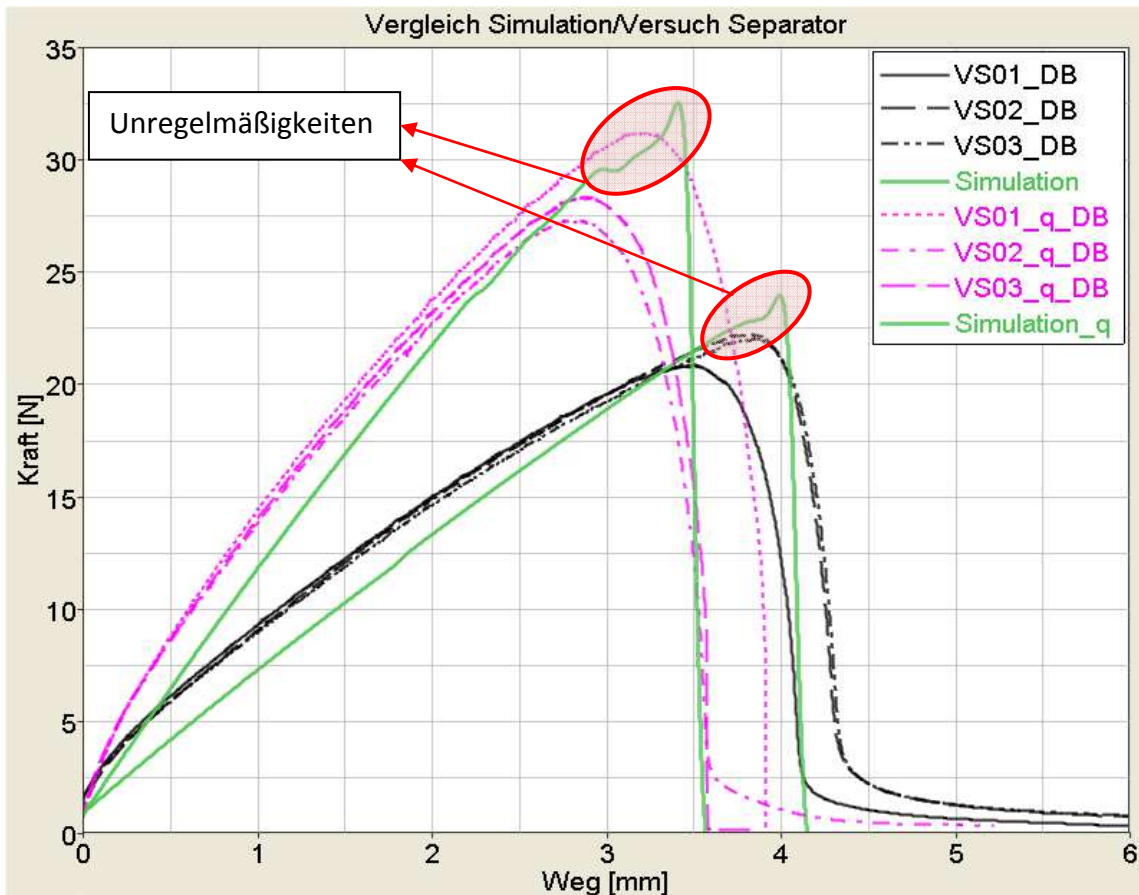


Abbildung 5-10 Vergleich Zugversuch/Simulation Separator

Sowohl in Längs- als auch in Querrichtung konnte eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Versuch erreicht werden. Die in der Abbildung eingezeichneten Unregelmäßigkeiten können auf Schwingungen in der numerischen Simulation zurückgeführt werden.

Die Pouch (Hülle) wurde, wie bereits erwähnt, durch zwei Shells abgebildet, um das Resttragverhalten der Kunststoffolie bestmöglich abbilden zu können. Die Kraft-Weg-Kurve des Modells, im Vergleich zum Realversuch, ist in der folgenden Abbildung dargestellt:

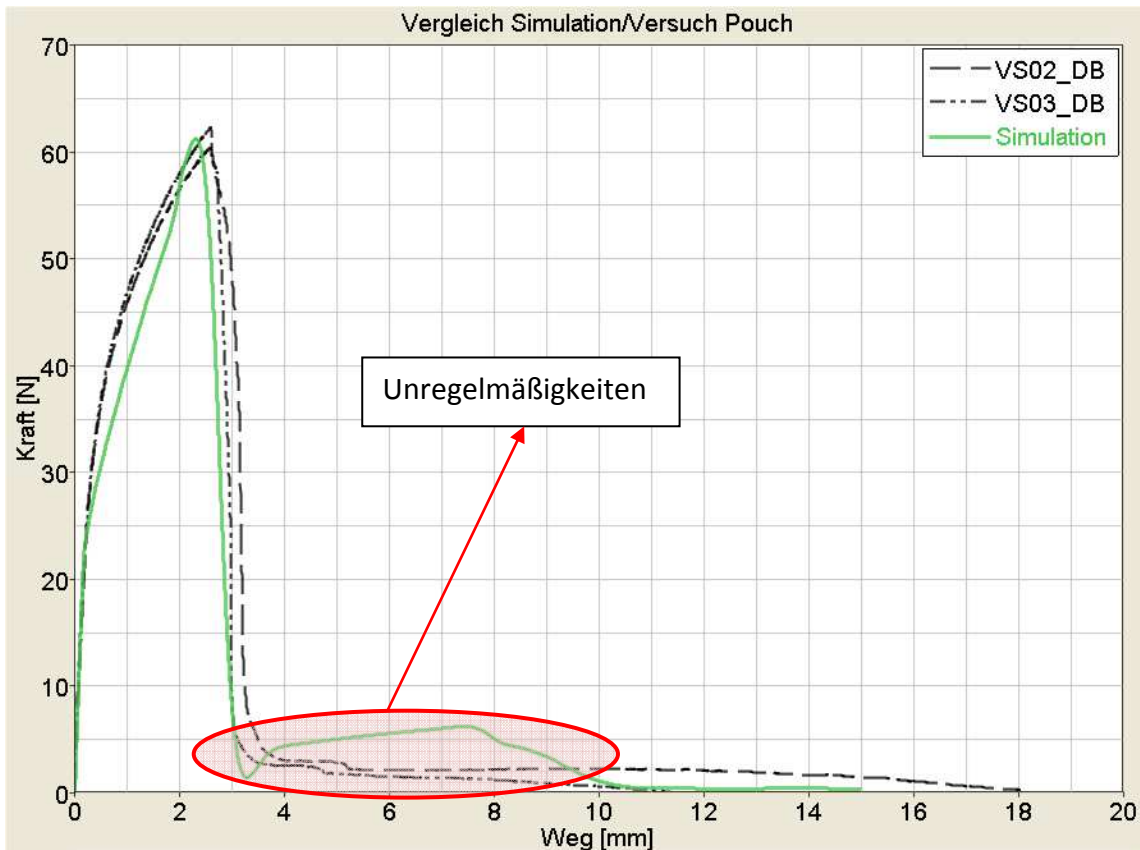


Abbildung 5-11 Vergleich Zugversuch/Simulation Pouch

Nach dem Versagen der Aluminiumfolie treten wiederum numerische Schwingungen auf, jedoch sind diese, bedingt durch die größere Dicke des Metalls und dem damit verbundenen Kraftniveau, stärker ausgeprägt. Im Diagramm sind die Unregelmäßigkeiten aus Darstellungsgründen geglättet dargestellt. Nach dem Riss der Aluminium-Schicht zeigt sich folgendes Verformungsbild an der Zugprobe:

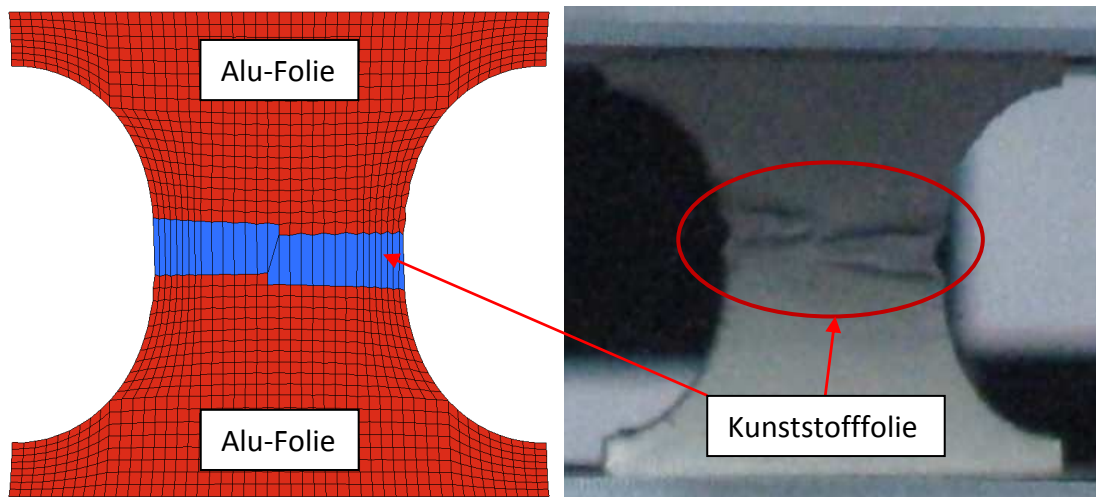


Abbildung 5-12 Resttragverhalten FE-Modell (links) und Realversuch (rechts)

Wie in der oberen Abbildung ersichtlich, konnte das Resttragverhalten des Realversuchs mit jenem des numerischen Modells gut nachgebildet werden. Im gekennzeichneten Bereich des rechten Bildes ist die, nach dem Versagen der Aluminiumfolie, zum Vorschein kommende Kunststofffolie gut erkennbar. Im linken Bild ist diese als blaues Shell-Element dargestellt. Zusammenfassend zur Simulation der Zugversuche kann festgehalten werden, dass eine gute Übereinstimmung der Versuche im Vergleich zur Simulation erzielt werden konnte, sowohl in den Verläufen der Kraft-Weg-Kurven als auch in der visuellen Modelldarstellung.

Durchbiegungsversuch:

Die numerische Simulation der Anode zur Nachbildung und Kontrolle der Biegesteifigkeit ist in der folgenden Abbildung dargestellt:

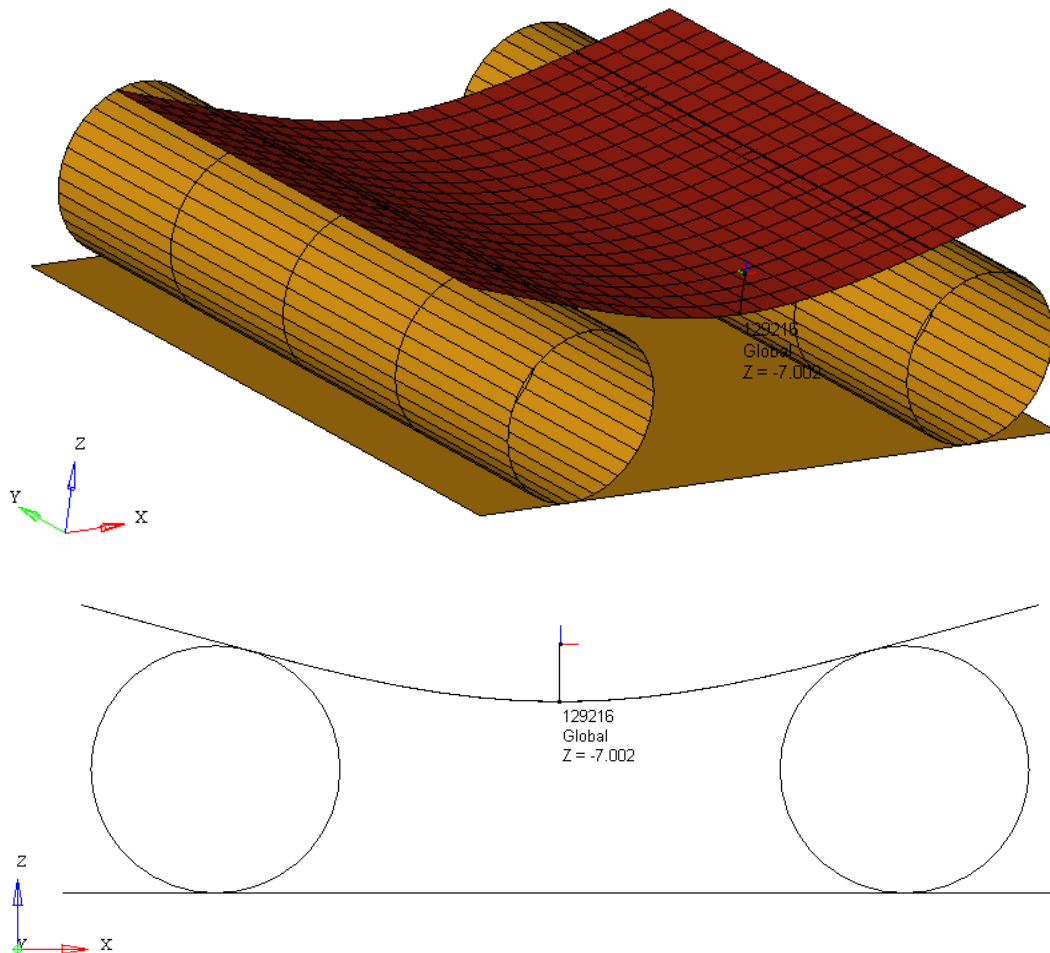


Abbildung 5-13 Durchbiegung der Anode in der Simulation

Zur Bestimmung der Verschiebung wurde ein Knoten (Nummer 129216) in der Mitte der Elektrode herangezogen. Die maximale Durchbiegung der negativen Elektrode beträgt laut Simulation (siehe Abbildung) ca. 7mm und passt somit gut mit dem Realversuch (Abbildung 4-27) überein.

Das Simulationsergebnis der Kathode sieht wie folgt aus:

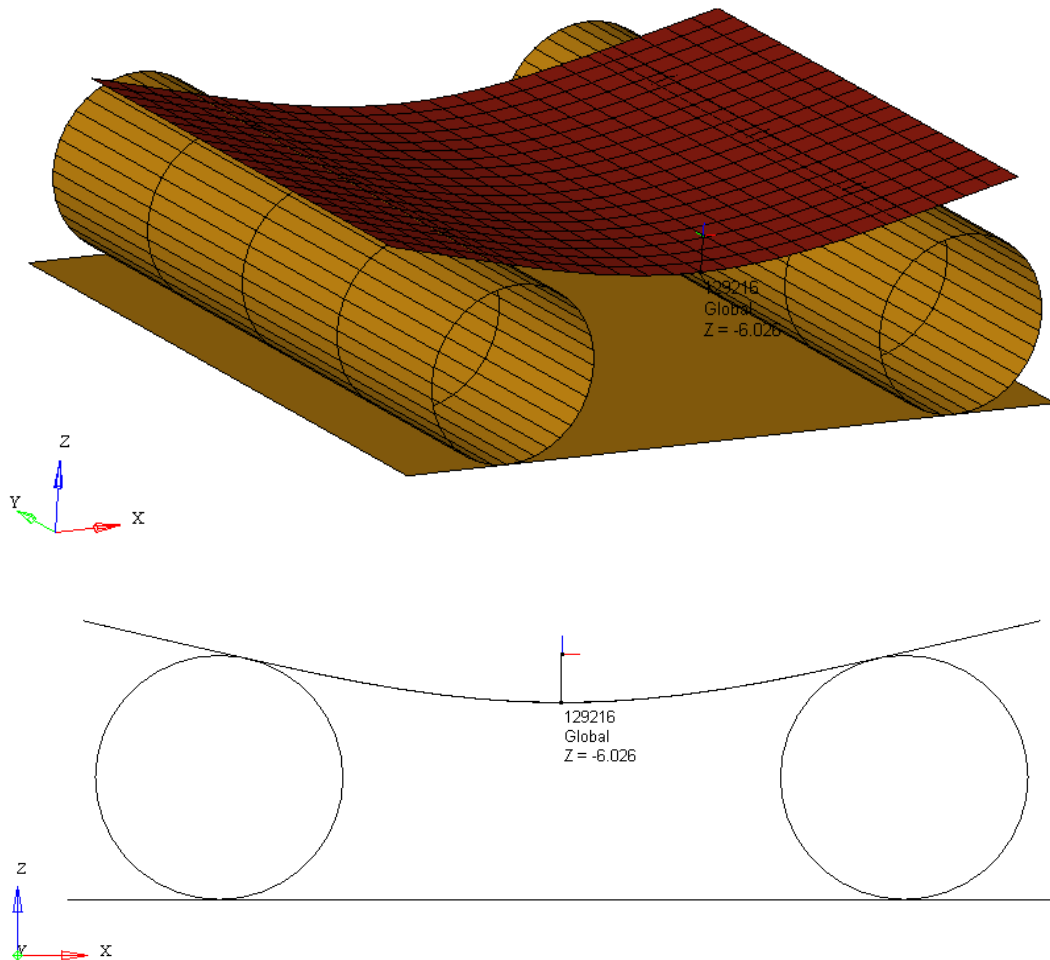


Abbildung 5-14 Durchbiegung der Kathode in der Simulation

Auch hier wurde derselbe Knoten zur Auswertung der Verschiebung verwendet. Die Durchbiegung von 6mm im Realversuch konnte auch in der Simulation (ca. 6mm) erreicht werden.

Abschließend zur numerischen Simulation der Durchbiegungsversuche kann gesagt werden, dass der Einfluss der unterschiedlichen Schichtdicken bzw. Gesamtdicken der Elektroden auf die Biegesteifigkeit gut in das Modell integriert und dem Realversuch entsprechend nachgebildet werden konnte.

6 Zusammenführen der Einzelkomponenten zu einem Gesamtmodell

Nach erfolgreicher Validierung der Simulationsmodelle der Einzelkomponenten anhand von Zug- bzw. Biegeversuchen, konnte mit den daraus abgeleiteten Parametern schrittweise ein Gesamtmodell der Zelle aufgebaut werden. Auf den Aufbau und die Art und Weise, wie die Vorgänge zwischen den einzelnen Lagen abgebildet wurden, wird im Folgenden näher eingegangen.

6.1 Aufbau Gesamtmodell

Gleich wie bei der Modellierung der Zugversuche wurde das Gesamtmodell aus Schalenelementen aufgebaut. Die notwendigen Abmessungen für die Shells konnten aus dem Protokoll der Batteriezerlegung (siehe Kapitel 4) entnommen werden.

Das Gesamtmodell, mit den in Kapitel 3.2 getroffenen Vereinfachungen, ist in der folgenden Abbildung dargestellt:

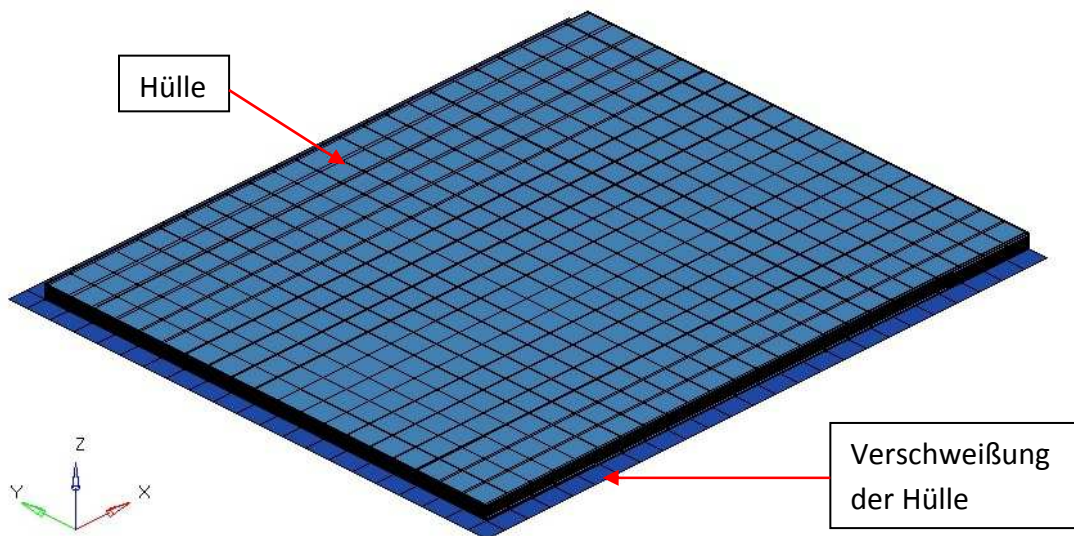


Abbildung 6-1 Gesamtmodell der Lithium-Polymer-Zelle

Unter der Hülle kommt der schichtweise Aufbau der Zelle zum Vorschein. Eine Bildfolge soll den Vorgang vom Aufbau einer Einzelkomponente bis hin zum Gesamtmodell verdeutlichen:

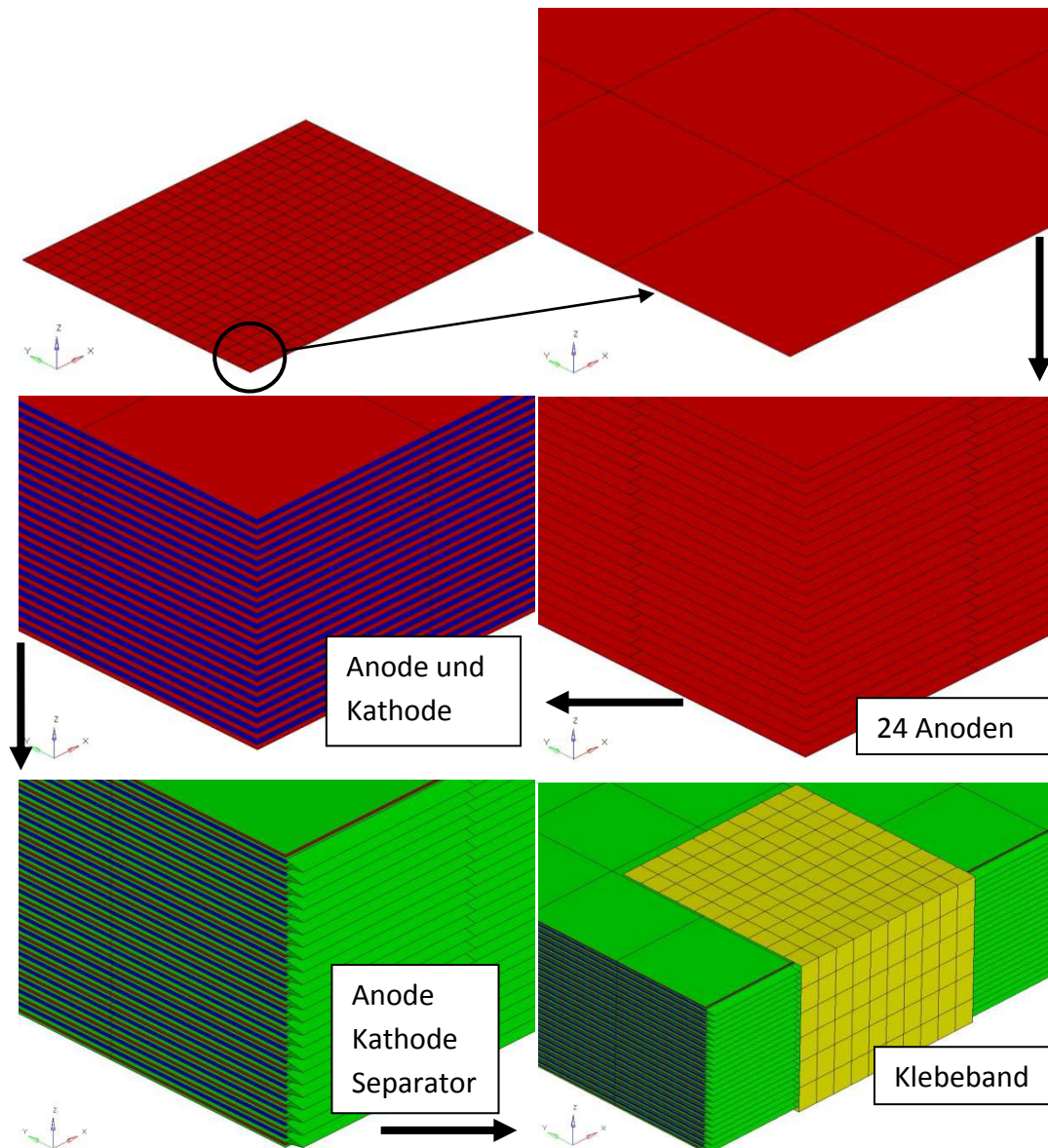


Abbildung 6-2 Schrittweiser Aufbau von der Einzelkomponente zum Gesamtmodell

Wie die ersten beiden Bilder zeigen, besteht das Modell zu Beginn aus einer Komponente (Anode- „rot“). Danach wurde, unter Berücksichtigung der Abstände zwischen den Lagen sowie der Anzahl der Einzelkomponenten (z.B.: 24 Anoden), das Modell weiter aufgebaut. Nach Einfügen der Kathode und des Separators galt es, das für das Zusammenhalten der einzelnen Schichten verantwortliche Klebeband, zu modellieren. Im nächsten Schritt wurde die Hülle mit den Verschweißungen an den Seitenflächen (siehe Abbildung 6-1) nachgebildet. Durch Aufbringen eines geringen Unterdruckes zwischen der Hülle und dem Separator wurde schließlich auch das in der Zelle herrschende Vakuum modelliert.

6.2 Interaktion zwischen den Lagen

Durch den Elektrolyt, der sich in der Zelle befindet, entstehen zwischen den einzelnen Schichten und der gelartigen Flüssigkeit Adhäsionskräfte, welche die Bewegungen zwischen den Lagen einschränken. Auf Grund der getroffenen Vereinfachungen wurde der Elektrolyt im numerischen Modell in erster Näherung nicht als Flüssigkeit abgebildet, sondern als Reibung (Coloumb'sche und viskose Reibung) zwischen den einzelnen Schichten. Grundsätzlich wurden in der vorliegenden Arbeit dazu zwei Ansätze zur bestmöglichen Modellierung der Interaktionen zwischen den Lagen verfolgt:

- Modellierung durch „Tied-Kontakte“
- Modellierung durch Verwendung eines „Cohesiv-Materials“

Im Folgenden werden die beiden Varianten einzeln erklärt und ihre Stärken und Einschränkungen aufgezeigt:

Modellierung durch „Tied-Kontakte“:

LS-Dyna® bietet die Möglichkeit, an den Berührflächen von zwei unterschiedlichen Materialien bzw. Komponenten individuelle Kontakte zu definieren. Dies wird durch das Hinzufügen von Kontaktkarten ermöglicht. Beim vorliegenden numerischen Modell wurde die Kontaktkarte *CONTACT_AUTOMATIC_ONE_WAY_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK verwendet. In der folgenden Abbildung sind der Lagenaufbau der Lithium-Polymer-Zelle (linkes Bild) und die Funktionsweise der Kontaktkarte (rechtes Bild) dargestellt:

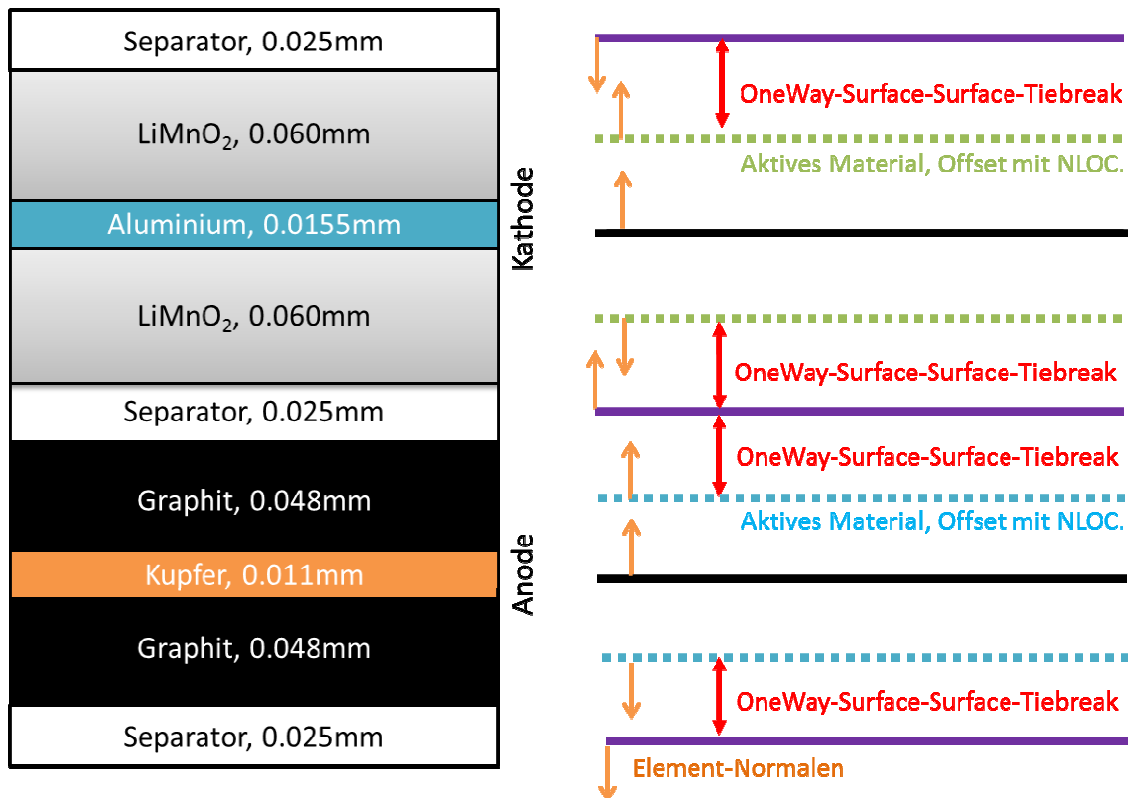


Abbildung 6-3 Lageraufbau der Zelle (linkes Bild) und Funktionsweise der „Tied-Kontaktkarte“ (rechtes Bild)

Alle Komponenten der Batterie wurden, wie bereits in Kapitel 5.2 erwähnt, als Schalenelemente (Shells) modelliert. Die beiden Elektroden (Anode, Kathode) bestehen aus drei Shells, die dieselben Knoten besitzen. Durch den Parameter „NLOC“ wird der zugehörige Abstand (Offset) von der Mittelebene des Trägermaterials (Kupfer, Aluminium) zur Mittelebene des Aktivmaterials (Lithiummangan, Graphit) festgelegt (siehe Abbildung 6-3, rechtes Bild). Der Kontakt zwischen den Elektroden und dem Separator wurde als „Tiebreak“-Kontakt definiert, mit welchem eine Steifigkeit in Normalrichtung (in der Kontaktkarte als „NFLS“ Parameter deklariert) und in Querrichtung (in der Kontaktkarte als „SFLS“ Parameter deklariert) angegeben werden kann. Ebenso waren die anfänglich erwähnten Reibungskoeffizienten für die Coulomb'sche und viskose Reibung zwischen den Lagen implementier- und nachstellbar. Mit dieser „Art“ der Kontaktmodellierung ergeben sich zusammengefasst folgende Vor- und Nachteile:

Vorteile:

- Für die beispielsweise beim Biegeversuch auftretenden Bewegungen (Scherung, Zug, Druck) sind die Steifigkeiten in Quer- und Längsrichtung („NFLS“, „SFLS“) einzeln definierbar

- Durch die Kontaktkarte muss kein zusätzliches Bauteil („PART“), wie beispielsweise bei der Verwendung eines „Cohesiv-Materials“, erstellt werden
- Die Rechenzeit des Modells durch die Kontaktmodellierung verlängert sich wesentlich weniger als bei Anwendung eines „Cohesiv-Materials“, da sich die Geometrie (kleinere Elementgröße) stärker auf die Rechenzeit des Gesamtmodells auswirkt, als eine Kontaktdefinierung

Nachteile:

- In Abhängigkeit von Solver-Versionen (LS-Dyna® 4.2.1, 5.0, 5.1 und 5.1.1), sowie von Betriebssystemen (Windows, Linux) kommt es zu etwas voneinander abweichenden Lösungen. Bei der Lösung des 3-Punkt-Biegeversuchs ohne Pouch (siehe Kapitel 7.5) ist der Unterschied am Gravierendsten. Auf Grund dieser Tatsache wurde die Validierung des Modells mit LS-Dyna® 5.1 unter Windows festgelegt.
- Abruptes Versagen der Kontakte im Simulationsmodell (siehe Abbildung 7-21)

Modellierung durch Verwendung eines „Cohesiv-Materials“:

Eine weitere Möglichkeit zur Abbildung adhäsiver bzw. kohäsiver Vorgänge ist die Anwendung von den dazu vorgesehenen Materialkarten in LS-Dyna®. Ein möglicher Ansatz dazu, dieses Verhalten in der Simulation darstellen zu können, bietet beispielsweise die Materialkarte *MAT_COHESIVE_MIXED_MODE (*MAT_138). Dafür ist die Erstellung einer zusätzlichen Komponente für das numerische Batteriemodell notwendig. Diese Komponente kann jedoch nicht als Shell, sondern nur als Solid abgebildet werden. In der folgenden Abbildung ist der Lagenaufbau mit dem „neuen“ Bauteil des Batteriemodells dargestellt:

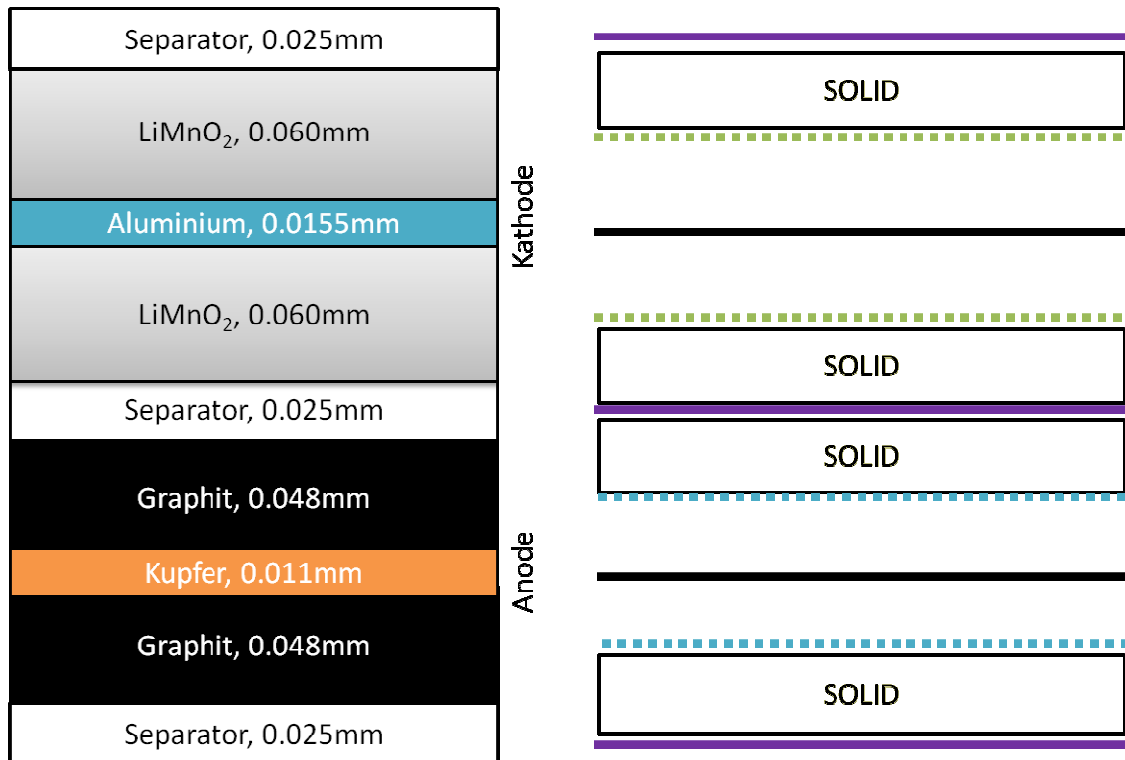


Abbildung 6-4 Lagenaufbau der Zelle (linkes Bild) und Einbaulage der Solidkomponente (rechtes Bild)

Die Anordnung des Solids erfolgte jeweils zwischen Kathode/Separator und Anode/Separator (siehe Abbildung 6-4). Dabei besaß die oberste bzw. unterste Knotenreihe des Solids dieselben Knoten wie die Elektroden bzw. der Separator. In der zugehörigen Materialkarte (*MAT_138) des Solids können dem Bauteil beispielsweise neben der Dichte des Materials (in diesem Fall des Elektrolyts) auch Steifigkeiten in Längs- und Querrichtung zugewiesen werden. Zusätzlich ist jedoch die Definierung von sogenannten „Automatic-Kontakten“(*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE) im Falle des Versagens des „Cohesive-Materials“ erforderlich, da das numerische Modell ansonsten in sich „zusammenfallen“ würde. Aus diesen Gründen ergeben sich folgende Vor- und Nachteile für die Verwendung dieser Modellierungsmöglichkeit:

Vorteile:

- Dichte des Materials (Elektrolyts) individuell parametrisierbar
- Bei der Verwendung von LS-Dyna® sind konsistente Ergebnisse auf allen Plattformen (Windows, Linux) erreichbar
- „Kontinuierlicheres“ Versagen im Vergleich zu den „Tied-Kontakten“ abbildbar

Nachteile:

- Zusätzliches Part erforderlich (Solid)
- Durch den sehr geringen Abstand zwischen den einzelnen Lagen ist die Elementhöhe des Solids dementsprechend klein → Rechenzeit steigt rapide an
- Zusätzliche Kontaktdefinitionen zwischen den einzelnen Komponenten sind nach Versagen des Solids notwendig („Automatic-Kontakte“)

Abschließend zu den beiden beschriebenen Möglichkeiten kann festgehalten werden, dass es sowohl Vor- und Nachteile auf beiden Seiten gibt. In dieser Arbeit werden in weiterer Folge jedoch nur die Ergebnisse, die durch die Modellierung durch „Tied-Kontakte“ erreicht wurden, dargestellt. Für die Weiterentwicklung des numerischen Modells kann eine Abbildung der Interaktionen zwischen den Lagen durch ein „Cohesiv-Material“ als sinnvolle Alternative angesehen werden.

Um eine bestmögliche Nachbildung von Simulation und Realversuch zu gewährleisten, erfolgte eine schrittweise Anpassung der unterschiedlichen beschriebenen Parameter. Die Gegenüberstellung der Simulations- und Versuchsdaten wird in Kapitel 7.5 ausgeführt. Zusätzlich zur Definierung der Reibkoeffizienten zwischen den Schichten waren, bedingt durch die Versuchskonfigurationen (siehe Kapitel 7.1), Kontaktdefinitionen zwischen Hülle und beispielsweise Auflager des 3-Punkt-Biegeversuchs notwendig. Diese wurden ebenfalls durch Angabe von Reibbeiwerten, ähnlich wie bei den Durchbiegungsversuchen, dem Realversuch angepasst.

7 Zellenversuche

Das eigentliche Ziel der vorliegenden Arbeit ist die bestmögliche Abbildung der mechanischen Eigenschaften der Lithium-Polymer-Zelle. Um dieses Ziel zu erreichen, galt es vorab eine geeignete Prüfmatrix zu finden. Aus diesen Überlegungen heraus konnten dann im Zuge einer weiteren Diplomarbeit (1), geeignete Prüfgeräte für die Durchführung der notwendigen Prinzipversuche entwickelt werden. Die gewonnenen Ergebnisse konnten wiederum für die Kontrolle bzw. Validierung der Simulationsmodelle herangezogen werden. Auf die erwähnten notwendigen Schritte und Ergebnisse wird in den folgenden Teilkapiteln näher eingegangen.

7.1 *Erstellung einer Prüfmatrix für die Gesamtzellenversuche*

In Anlehnung an einzelne Quellen aus der durchgeführten Literaturrecherche, wie beispielsweise (16), konnte eine zweckmäßige Versuchskonfiguration abgeleitet werden. Auf die Versuchsbedingungen und Abbruchkriterien, die sich für das Prüfgerät (z.B.: Verfahrensgeschwindigkeit) aus der Prüfmatrix ergeben, wird im Kapitel 7.4 näher eingegangen.

7.1.1 *Prüfmatrix für die ungeladenen Zellenversuche*

Um mögliche Einflüsse des Ladungszustandes auf die mechanischen Eigenschaften der Zelle ableiten zu können, wurde sowohl für ungeladene als auch für geladene Batterien eine Prüfmatrix erstellt. Unter „ungeladen“ versteht man in diesem Zusammenhang Zellen, die mit einem Leistungswiderstand tiefentladen wurden, wodurch auch ein Öffnen der Zelle für die Analyse der Einzelkomponenten (siehe Kapitel 4) und der Batterieveruche ohne Hülle (siehe Abbildung 7-18) gefahrlos möglich war. Diese Versuche ohne die Hülle der Zelle wurden auch deshalb durchgeführt, weil dadurch Rückschlüsse auf die Höhe der Biegesteifigkeit der Gesamtzelle mit und ohne Pouch getroffen werden konnten.

In der folgenden Abbildung sind die ungeladenen Zellentests übersichtlich zusammengefasst:

Auflager	Randbedingung	Wiederholungen	weitere Angaben	Belastungsrichtung
3-Pkt Biegeversuch	mit Pouch	3	Frei Länge=Längste Abmessung	Y
3-Pkt Biegeversuch	ohne Pouch	3	Frei Länge=Längste Abmessung	Y
3-Pkt Biegeversuch	mit Pouch	3	Frei Länge=Breite	Y
3-Pkt Biegeversuch	ohne Pouch	3	Frei Länge=Breite	Y
Eindrückversuch - Impaktor	mit Pouch	3	Impaktor \varnothing 30mm	X
Eindrückversuch - Impaktor	mit Pouch	3	Impaktor \varnothing 30mm	Z
Knicktest	mit Pouch	3	Frei Länge=Längste Abmessung	Z
Knicktest	mit Pouch	3	Frei Länge=Breite	X
Testanzahl TOTAL:		24		

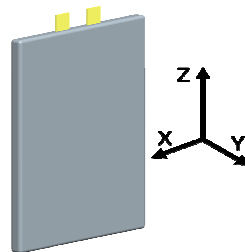


Abbildung 7-1 Prüfmatrix ungeladen

Beim 3-Punkt-Biegeversuch wurden zwei Auflager und der, für den Eindrückversuch verwendete, Impaktor (siehe Kapitel 7.4) mit einem Durchmesser von 30mm verwendet. Der Abstand zwischen den Auflagern richtete sich nach der Anordnung beziehungsweise der „Prüfrichtung“ der Zelle (siehe weitere Angaben und Kapitel 7.4). Die Versuche ohne Hülle wurden, auf Grund der Gefahr eines Kurzschlusses im geladenen Zustand, nur ungeladen durchgeführt. Daraus konnten Rückschlüsse auf das Tragverhalten der Hülle gezogen werden (siehe Abbildung 7-17). Die Anzahl der Wiederholungen der Versuche wurde in der Matrix mit drei geplant. Bei einer guten Übereinstimmung der Messergebnisse wurden jedoch lediglich zwei Versuche pro Konfiguration durchgeführt, wodurch ein paar Lithium-Polymer-Zellen, die nur begrenzt verfügbar waren, eingespart werden konnten.

7.1.2 Prüfmatrix für die geladenen Zellenversuche

Die Prüfmatrix der geladenen Versuche ist nahezu ident mit jener für die ungeladenen Zellen. Unterschiede ergaben sich nur durch die Tatsache, dass aus Sicherheitsgründen keine Versuche ohne Hülle gemacht werden konnten. Stattdessen wurde ein zusätzlicher Eindrückversuch mit einer Hemisphäre durchgeführt.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Versuchsmatrix der geladenen Zellen:

Auflager	Randbedingung	Wiederholungen	weitere Angaben	Belastungsrichtung
3-Pkt Biegeversuch	mit Pouch	3	Frei Länge=Längste Abmessung	Y
3-Pkt Biegeversuch	mit Pouch	3	Frei Länge=Breite	Y
Eindrückversuch - Hemisphäre	mit Pouch	3		Y
Eindrückversuch - Impaktor	mit Pouch	3	Impaktor \varnothing 30mm	X
Eindrückversuch - Impaktor	mit Pouch	3	Impaktor \varnothing 30mm	Z
Knicktest	mit Pouch	3	Frei Länge=Längste Abmessung	Z
Knicktest	mit Pouch	3	Frei Länge=Breite	X
	Testanzahl TOTAL:	21		

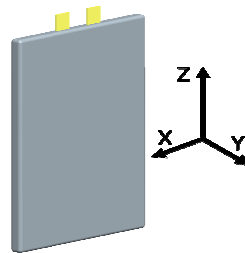


Abbildung 7-2 Prüfmatrix geladen

Der Ladezustand aller Versuchszellen betrug 100%. Die Anzahl der Wiederholungen richtete sich ebenfalls nach der Reproduzierbarkeit der erhaltenen Versuchsergebnisse.

7.2 Prinzipversuche am Prüfstand Werkstattpresse ERBA 5

Um erste Erkenntnisse gewinnen zu können, wurde, ausgehend von den zusammengestellten Versuchskonfigurationen für den geladenen und ungeladenen Zustand der Batterie, eine handelsübliche Werkstattpresse adaptiert. In diesem Kapitel soll nicht auf die konstruktiven Details, sondern auf die Versuchsergebnisse, die aus den ersten Prinzipversuchen gewonnen werden konnten, eingegangen werden. Genauere Informationen zur Adaption der Werkstattpresse können aus (1) entnommen werden. Um Aussagen über die mechanischen Eigenschaften der Lithium-Polymer-Zelle treffen zu können, wurden bei den ersten Versuchen folgende Messwerte erfasst:

- Kraft (Kraftmessdose 5kN)
- Weg (Linearpotentiometer 150mm)

Die adaptierte Werkstattpresse mit der eingesetzten Messtechnik ist in der folgenden Abbildung dargestellt:

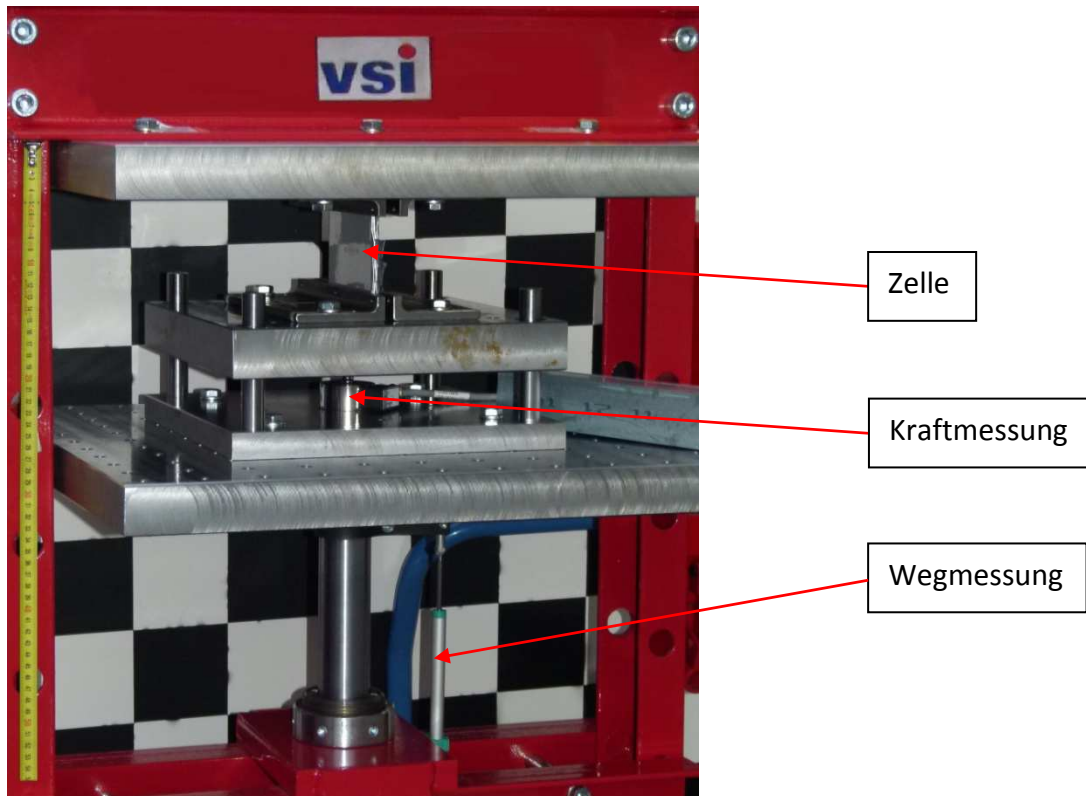


Abbildung 7-3 Prüfstand Werkstattpresse ERBA 5 mit der verwendeten Messtechnik

Als Versuchskonfiguration wurde, entsprechend der zuvor erstellten Prüfmatrix, der Knicktest mit Pouch (Belastungsrichtung X) einer geladenen Zelle (Abbildung 7-2) gewählt. Dieser Versuch ist auch im oberen Bild (Abbildung 7-3) dargestellt. Zur besseren Veranschaulichung des Versuchs dient die nachfolgende Abbildung 7-4:

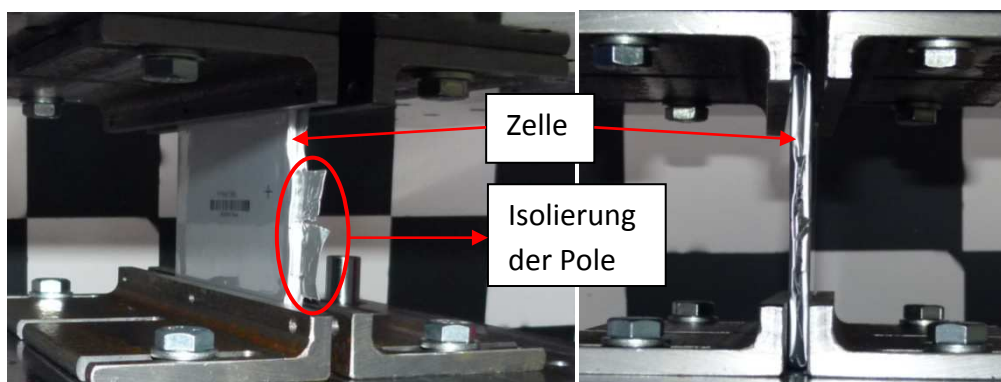


Abbildung 7-4 Prinzipversuch Knicktest X-Achse

Um einen möglichen Kurzschluss der Pole zu verhindern, wurden diese vor dem Versuch mit Klebeband isoliert. Das Abbruchkriterium des Versuchs war ein eventuell auftretender Kurzschluss der Zelle oder das Erreichen der Maximalkraft des Hydraulikzylinders (5kN).

Prinzipversuchsergebnisse:

Trotz der sehr starken Deformierung der Zelle konnte bei diesem Versuch bis zum Erreichen der max. Druckkraft kein Kurzschluss der Batterie festgestellt werden (Abbildung 7-5):

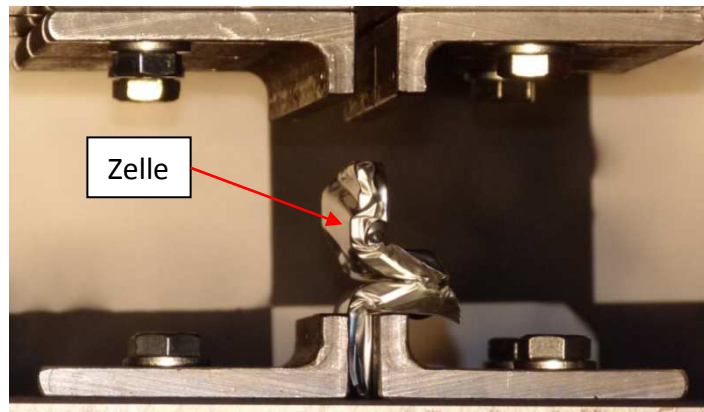


Abbildung 7-5 Deformierung der Zelle nach dem Knicktest X-Achse

Die aus dem Test erhaltenen Daten sind in der Abbildung 7-6 abgebildet:

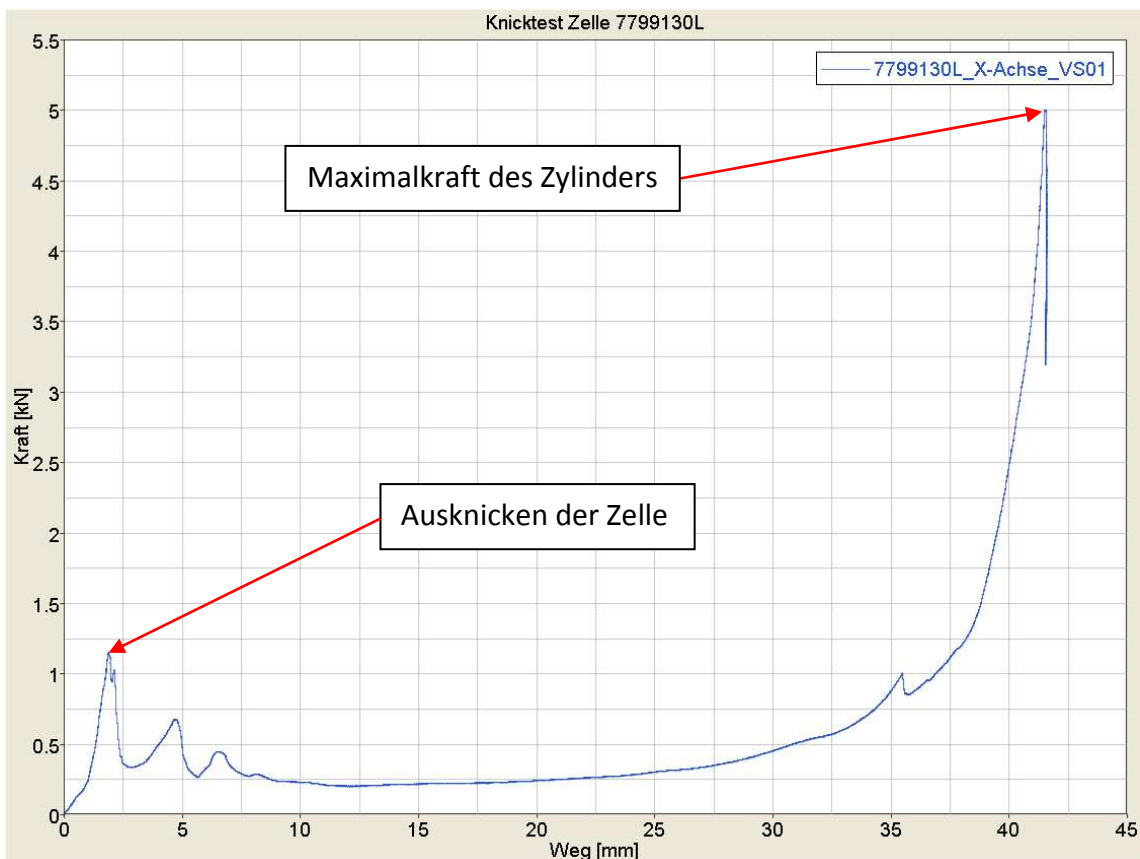


Abbildung 7-6 Kraft-Weg-Verlauf Knicktest X-Achse

Aus dem Diagramm ist der anfängliche Anstieg der Kraft bis zum Ausknicken der Zelle gut erkennbar. Die Spitzen im Kraftniveau vor und nach 2,5mm Verschiebung sind optisch nicht erklärbar, aber man kann davon ausgehen, dass sich das auf das Knick- bzw. Zusammenfaltverhalten der Lagen zurückführen lässt. Ab einem Weg von ca. 15mm stieg die Kraft so lange an, bis die Maximalkraft des Zylinders (5kN) erreicht wurde.

Aus den ersten Prinzipversuchen konnten folgende wesentliche Erkenntnisse gewonnen werden:

- Trotz starker Deformierung der geladenen Zelle trat kein Kurzschluss auf
- Maximalkraft als Abbruchkriterium wenig sinnvoll (nur die ersten 20mm sind interessant für das Knickverhalten) → Zukünftig wird der Weg als Abbruchkriterium für alle Lastfälle herangezogen
- Die Batteriespannung als weitere Messgröße wäre interessant, um Prognosen abgeben zu können, bei welchem Kraftniveau ein Kurzschluss auftritt

7.3 Prüfstand PRESTO 420

Nach der erfolgreichen Durchführung der Prinzipversuche wurde mit den daraus gewonnen Erkenntnissen im Zuge einer weiteren Diplomarbeit (1) ein neuer, in vielen Punkten verbesserter Prüfstand PRESTO 420 (**PRE**ss for Battery **Sys**TEms and **O**thers **420**kN), gebaut (Abbildung 7-7).



Abbildung 7-7 Prüfstand PRESTO 420

Die wichtigsten Eckdaten des Prüfstandes sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

Höhe	1700mm
Breite	1300mm
Tiefe	770mm
Gewicht	ca. 800kg
Maximalkraft des Zylinders	420kN
Maximaler Verfahrweg des Zylinders	400mm
Ausfahrgeschwindigkeit des Zylinders	0,1 - 5,6mm/s

Tabelle 7-1 Eckdaten Prüfstand PRESTO 420

Auf genauere Daten des Prüfstandes und Details zur Konstruktion wird hier auf (1) verwiesen.

In puncto Messtechnik konnten mit dem neu entwickelten Prüfstand folgende Daten ermittelt werden:

- Kraft (Kraftmessdose 5kN, 10kN, 50kN, 500kN)
- Weg (Seilzugsensor)
- Spannung

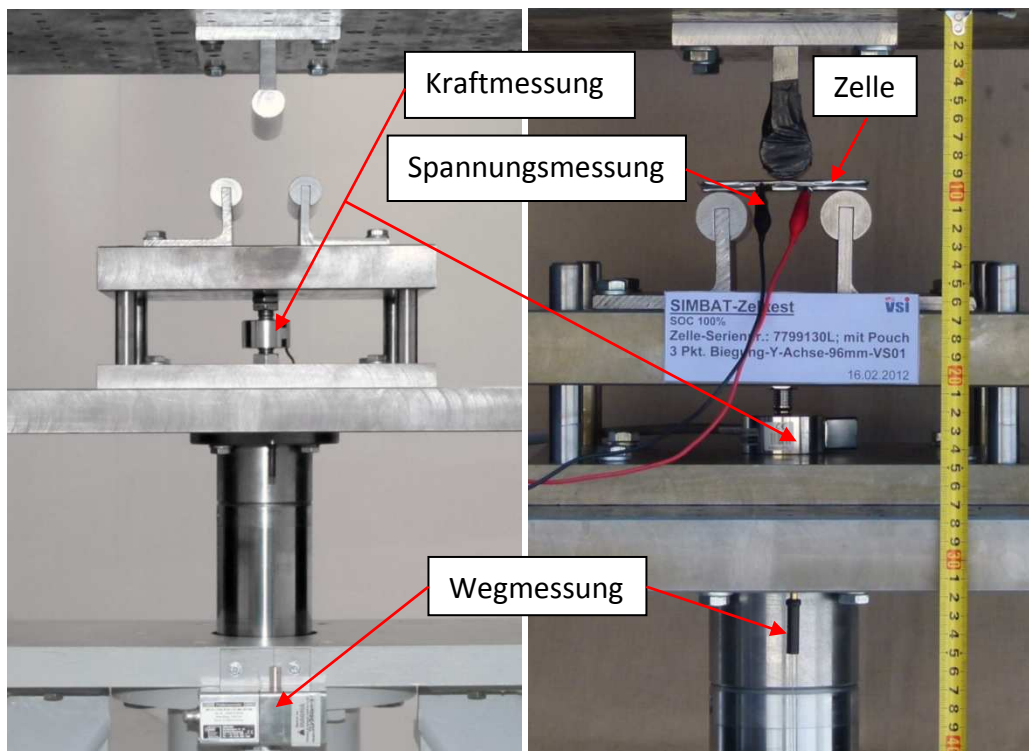


Abbildung 7-8 Messtechnik PRESTO 420

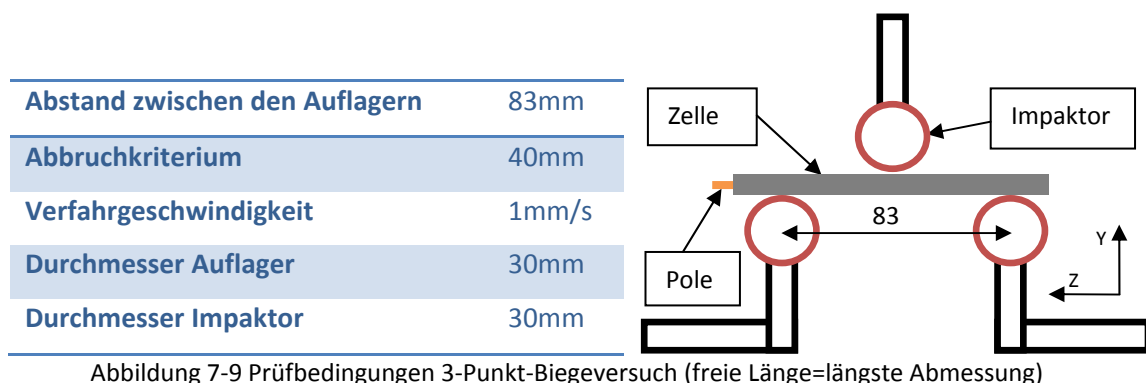
Die Abbildung 7-8 zeigt die eingesetzte Messtechnik des neuen Prüfstandes zur Ermittlung der simulationsrelevanten Parameter. Im rechten Bild ist exemplarisch ein 3-Punkt-Biegeversuch mit den angebrachten Klemmen zur Spannungsmessung samt Weg- und Kraftmessung dargestellt.

Für die weiteren Versuche bzw. für die Abarbeitung der Prüfmatrix wurde nur mehr der Prüfstand PRESTO 420 verwendet. In den folgenden Teilkapiteln werden daher ausschließlich die Ergebnisse, die durch den Einsatz des neuen Prüfstandes ermittelt wurden, abgebildet.

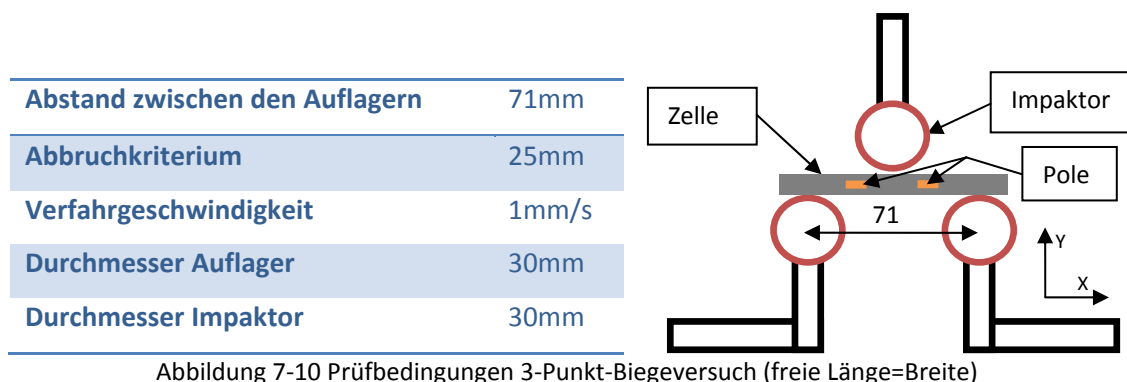
7.4 Durchführung der Zelltests und Ergebnisse

In diesem Teilkapitel werden zunächst die notwendigen Maßnahmen erläutert, um einen einheitlichen Prüfablauf für die verschiedenen Versuchskonfigurationen sicherzustellen. Anschließend folgt die Abbildung und Diskussion der daraus gewonnenen Versuchsdaten. Vor Durchführung der Versuche, war die Definition einheitlicher Prüfbedingungen notwendig.

Für den 3-Punkt-Biegeversuch der geladenen und ungeladenen Zelle mit der Konfiguration „freie Länge=längste Abmessung“ (siehe Kapitel 7.1) wurden folgende Randbedingungen festgelegt (Abbildung 7-9):



Der optimale Abstand zwischen den beiden Auflagern wurde derart ermittelt, dass es bei den Versuchen zu einem geringen „Durchrutschen“ (siehe Abbildung 7-18) beziehungsweise „Verklemmen“ (siehe Abbildung 7-16) kommt. Fast idente Randbedingungen ergaben sich für den 3-Punkt-Biegeversuch der geladenen und ungeladenen Zelle mit der Konfiguration „freie Länge=Breite“ (siehe Kapitel 7.1):



Der Unterschied zwischen den beiden genannten Prüfbedingungen ergibt sich, bedingt durch die Ausrichtung der Zelle, in den Abständen der Auflager (würde sonst durchrutschen, siehe Abbildung 7-18) und dem Abbruchkriterium im Weg.

Bei der Durchführung des Impaktortests in Z-Richtung wurden folgende Randbedingungen definiert:

Abbruchkriterium	70mm
Verfahrgeschwindigkeit	1mm/s
Durchmesser Impaktor	30mm

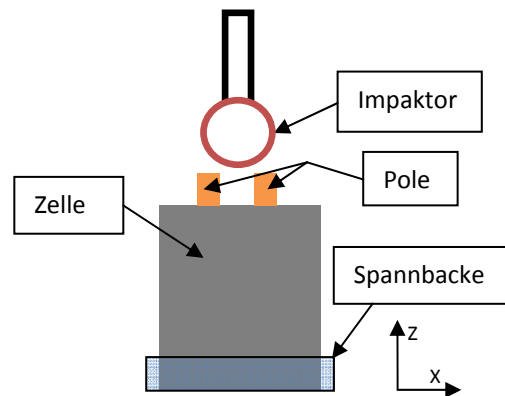


Abbildung 7-11 Prüfbedingungen Impaktortest Z-Achse

Nach Anbringung der Spannungsmessung wurden sowohl die Pole als auch der Impaktor isoliert, um einen möglichen Kurzschluss durch Berühren der leitenden Komponenten zu vermeiden. Die Lagerung der Zelle erfolgte durch das Anbringen von Spannbacken. Dabei wurde die Zelle nicht geklemmt, sondern in X-Richtung verschiebbar angeordnet, um einen möglichen Einfluss der Spannkraft auf die Zelle minimieren zu können.

Für den Impaktortest in X-Richtung ergaben sich folgende Versuchsbedingungen:

Abbruchkriterium	50mm
Verfahrgeschwindigkeit	1mm/s
Durchmesser Impaktor	30mm

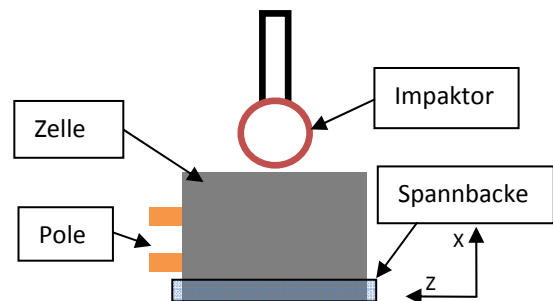


Abbildung 7-12 Prüfbedingungen Impaktortest X-Achse

Bei den beiden Impaktortests variierten die Anordnung der Zelle und der Weg beim Abbruchkriterium. Bei gleichem Verfahrensweg der beiden Konfigurationen würde es ansonsten beim Impaktortest in X-Richtung zur Kollision zwischen Impaktor und Spannbacke kommen. Für den, bereits in der Abbildung 7-4 dargestellten, Knicktest in X-Achse wurde bei gleicher Verfahrgeschwindigkeit (1mm/s) ein Abbruchkriterium von 30mm, in der Z-Achse von 40mm, gewählt.

Die folgende Abbildung zeigt nochmals eine übersichtliche Darstellung der beiden Versuchskonfigurationen:

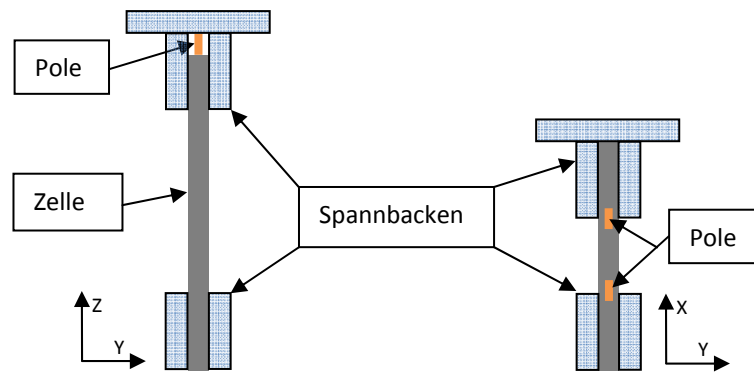


Abbildung 7-13 Prüfbedingungen Knicktest Z-Achse (linkes Bild) und X-Achse (rechtes Bild)

Bei den beiden Knicktests wurden jeweils oben und unten Spannbacken zur Stabilisierung der Zelle angeordnet, wodurch die Batterie verschiebbar blieb. Auch hier würde es, ähnlich wie beim Impaktortest, bei gleichem Verfahrensweg zur Kollision zwischen den Spannbacken kommen, weshalb unterschiedliche Abbruchkriterien im Weg gewählt wurden.

Für den Test mit der Hemisphäre wurden folgende Randbedingungen definiert:

Abbruchkriterium	KS
Verfahrgeschwindigkeit	1mm/s
Hemisphärendurchmesser	30mm

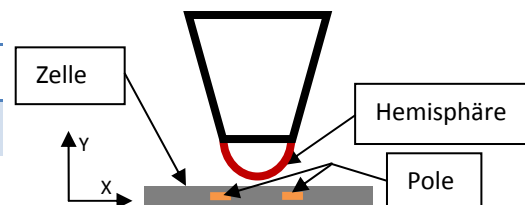


Abbildung 7-14 Prüfbedingungen Hemisphärentest

Bei allen durchgeführten Versuchen kam ein Abbruchkriterium auf Grund des Weges zum Tragen, lediglich der Test mit der Hemisphäre wurde nach Eintreten des Kurzschlusses (KS) abgebrochen. Das Ziel dieses Versuchs war das Erzwingen eines Kurzschlusses der Zelle, um herauszufinden, bei welchem Kraftniveau ein Kurzschluss der Batterie durch eine lokale Penetration der Hemisphäre eintritt.

Auf Grund der großen Versuchsanzahl werden exemplarisch nur folgende Versuchskonfigurationen miteinander verglichen und detaillierter beschrieben:

- 3-Punkt-Biegung ohne Pouch ungeladen (freie Länge=längste Abmessung vs. freie Länge=Breite)
- 3-Punkt-Biegung mit und ohne Pouch ungeladen (freie Länge=längste Abmessung)
- 3-Punkt-Biegung mit Pouch geladen/ungeladen (freie Länge=längste Abmessung)

Die Ergebnisse der anderen Versuchskonfigurationen können dem Anhang (Kapitel 10) entnommen werden.

Auf Grund der Tatsache, dass es bei keinem der Versuche, außer beim Test mit der Hemisphäre, zu einem Kurzschluss der Zelle kam, werden in den nächsten Diagrammen nur die Kraft-Weg-Kurven erklärt und diskutiert.

Die folgende Abbildung zeigt den Vergleich 3-Punkt-Biegung ohne Pouch ungeladen (freie Länge=längste Abmessung vs. freie Länge=Breite)

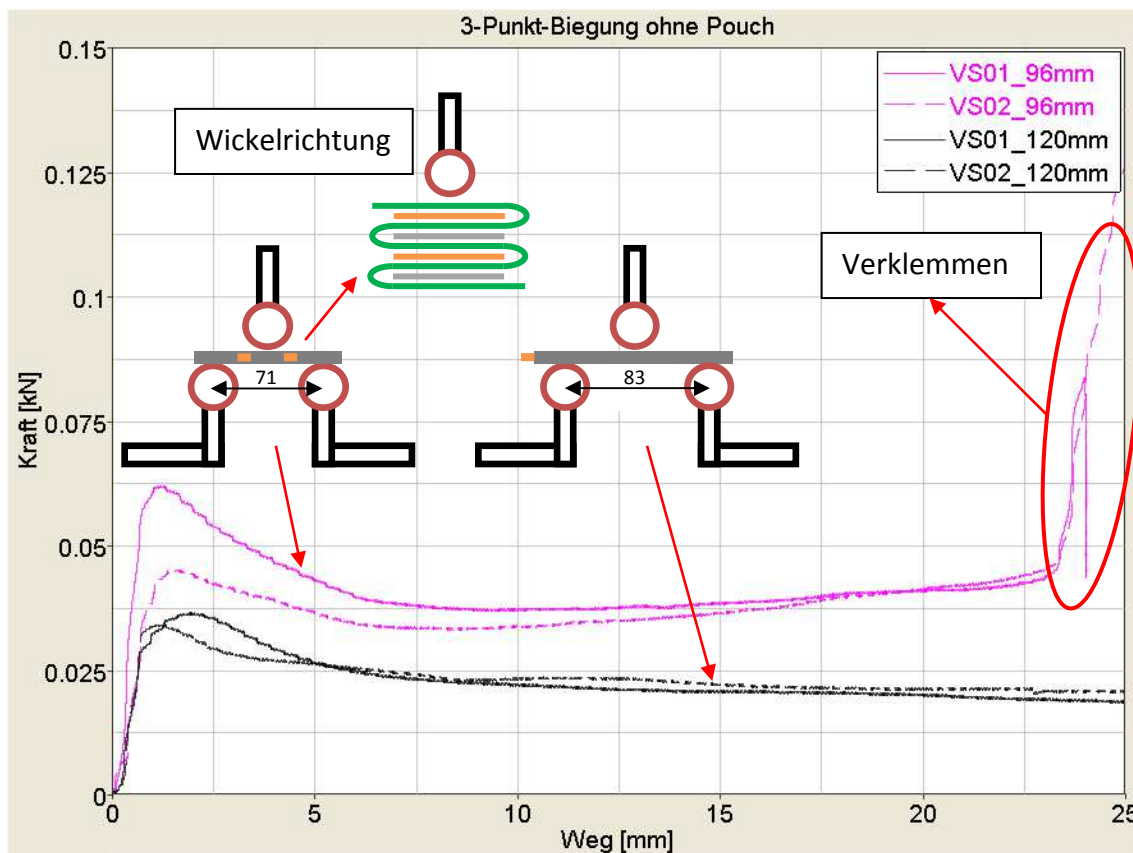


Abbildung 7-15 3-Punkt-Biegeversuch ohne Pouch (freie Länge=längste Abmessung vs. freie Länge= Breite)

Im Diagramm entsprechen die Versuchskurven mit „_120mm“ jenen mit der Bezeichnung „freie Länge=längste Abmessung“ und die „_96mm“ beziehen sich auf die Versuche „freie Länge=Breite“. Ein Vergleich dieser Tests wurde deshalb angestellt, weil daraus ein möglicher Einfluss der Wickelrichtung des Separators ersichtlich sein könnte, wobei die Konfiguration „_96mm“ jener in Wickelrichtung (siehe Prinzipskizze Abbildung 7-15) und die Versuchsanordnung „_120mm“ jener quer zur Wickelrichtung entspricht. Durch die Gegebenheit, dass die Auflager auf Grund der unterschiedlichen Breite und Länge der Zelle, nicht mit gleichem Abstand zueinander platziert werden konnten, ist ein solcher Einfluss in

den Versuchskurven jedoch nicht direkt zu erkennen. Das stärkere Absinken des Kraftniveaus der Versuchskurven „VS01_96mm“ und „VS02_96mm“ im Vergleich zu den Kurven „_120mm“ nach Erreichen der maximalen Kraft, deutet jedoch auf einen Einfluss der Wicklung des Separators hin, da dieser gegen die eintretende Deformierung länger Widerstand leistet und nach Erreichen der maximal erträglichen Kraft abrupt nachgibt als in der anderen Versuchskonfiguration.

Ab einem Weg von ca. 7,5mm steigt das Kraftniveau der Versuchskurven „_96mm“, was auf ein Verkleben der Zelle zwischen den beiden Auflagern zurückzuführen ist (siehe Abbildung 7-16). Nach ca. 23mm nimmt dieses Verkleben stark zu, wodurch die Kraft sprunghaft ansteigt.

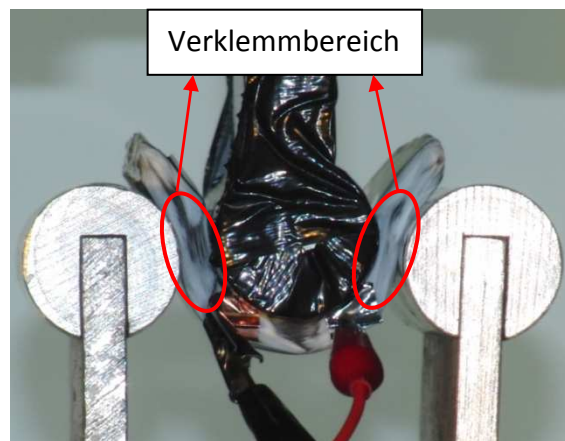


Abbildung 7-16 3-Punkt-Biegeversuch ohne Pouch (freie Länge=Breite)

Im oberen Bild ist jener Bereich hervorgehoben, in dem es zum Verkleben der Zelle zwischen den Auflagern kommt. Dieses Verhalten ist für die mechanischen Eigenschaften der Zelle nicht von Bedeutung und wurde nicht weiter berücksichtigt.

Folgende Schlüsse können aus diesen Daten für die Simulation gezogen werden:

- Wickelrichtung muss im Simulationsmodell berücksichtigt werden
- Das Verkleben der Zelle zwischen den beiden Auflagern wird in der Simulation nicht nachgebildet

In der Abbildung 7-17 werden die Versuchsergebnisse mit Pouch, jenen ohne Pouch gegenübergestellt:

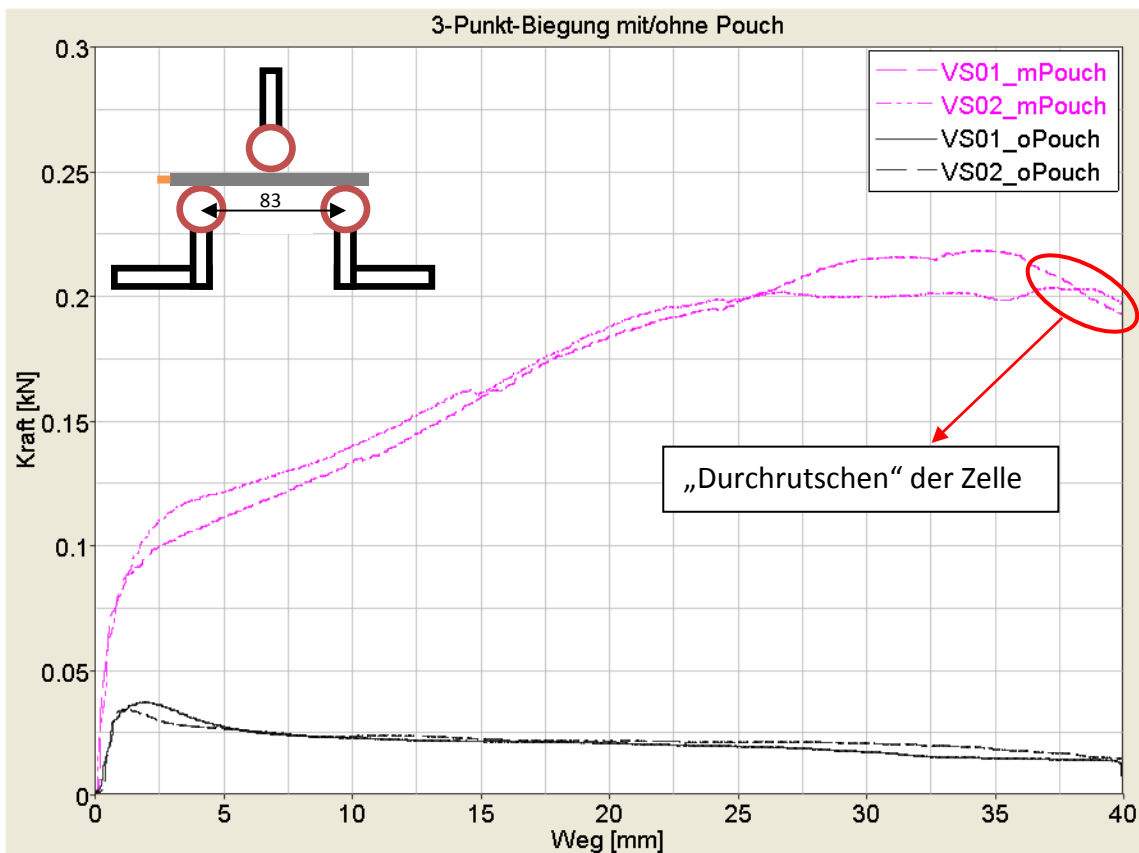


Abbildung 7-17 Vergleich 3-Punkt-Biegeversuch mit und ohne Pouch (freie Länge=längste Abmessung)

Grundsätzlich konnte, wie aus der oberen Abbildung ersichtlich, eine ansprechende Reproduzierbarkeit der Versuche erreicht werden. Starke Unterschiede ergaben sich in den beiden Kraftniveaus, mit und ohne Pouch. Bei den Versuchskurven mit Pouch („_mPouch“) ist bis 0,1kN ein sehr rascher Anstieg der Kraft erkennbar, danach steigt das Kraftniveau stetig weiter an bis es zu einem „Durchrutschen“ der Zelle zwischen den beiden Auflagern kommt (siehe Abbildung 7-18), woraus das Abfallen des Kraftniveaus resultiert.

Der Versuch ohne Pouch besitzt einen vergleichbaren Kraftanstieg zu Beginn des Tests, danach erfolgt eine Ablösung bzw. Auffaltung der einzelnen Schichten untereinander, da die Adhäsionskräfte, die durch den Elektrolyt hervorgerufen werden, kontinuierlich geringer werden. Durch diesen Effekt kann das stetige Sinken des Kraftniveaus ab einem Weg von ca. 2mm begründet werden.

Nach Versuchsende ergeben sich zwischen den beiden Testkonfigurationen folgende Unterschiede in den Endlagen:

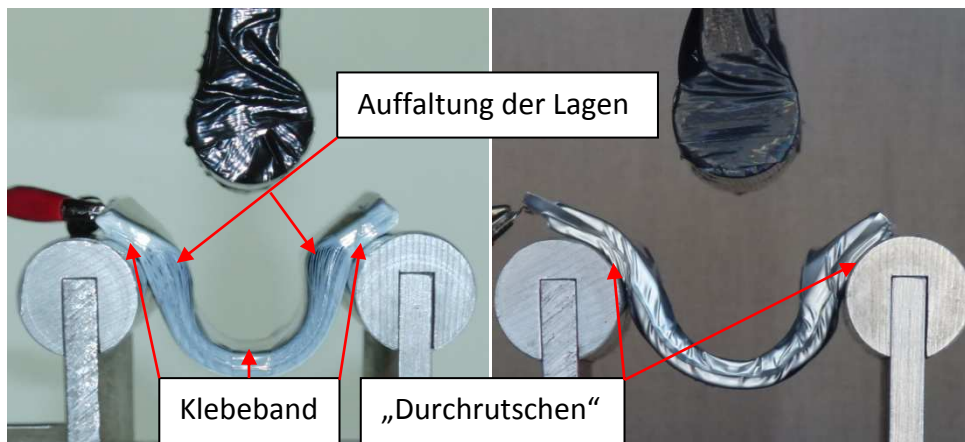


Abbildung 7-18 Realversuch 3-Punkt-Biegung mit und ohne Pouch (freie Länge=längste Abmessung)

Im linken Bild ist die auftretende Auffaltung der Lagen auf Grund der Biegebelastung ersichtlich. Im Gegensatz dazu zeigt sich, dass die Pouch diese Auffaltung verhindert oder zumindest abschwächt, was zu der Versteifung der Zelle unter Biegebelastung führt, die auch in den Messdaten erkennbar ist. Der Effekt des „Durchrutschens“ der Zelle an den Auflagern trat beim Versuch ohne Pouch in etwa gleichem Ausmaß auf. Eine Verstärkung („schmieren“) bzw. eine Abschwächung („haften“) dieses Vorganges durch den Elektrolyt konnte bei der Durchführung dieser Versuche nicht festgestellt werden. Ab dem Zeitpunkt des Auftretens dieses Effektes spiegeln die Messwerte nicht mehr ausschließlich das Materialverhalten wider und werden daher nicht weiter berücksichtigt.

Wesentlich für die Stabilität der Lithium-Polymer-Batterie sind die Klebebänder, speziell beim Versuch ohne Hülle (siehe Abbildung 7-18 linkes Bild). An den Stellen, an denen das Klebeband angebracht ist, (siehe obere Abbildung und Abbildung 4-3) wird die Auffaltung der einzelnen Lagen verhindert.

Zusammenfassend zu den Versuchen mit/ohne Pouch kann festgestellt werden, dass die Hülle maßgeblich für die Biegesteifigkeit der Zelle verantwortlich ist, da sie eine Ablösung bzw. Auffaltung der einzelnen Komponenten untereinander verhindert. Diese Ablösung bzw. Auffaltung wird zusätzlich durch das in der Zelle herrschende Vakuum unterdrückt. Der Unterdruck in der Batterie führt dazu, dass die einzelnen Lagen der Zelle stärker gegeneinander „gepresst“ werden. Darüber hinaus wirken die, durch den Elektrolyt verursachten Adhäsionskräfte, wodurch die Scherbewegungen beim Biegeversuch

„erschwert“ werden. Dieser Effekt trägt infolgedessen ebenso zum höheren Kraftniveau gegenüber dem Versuch ohne Pouch bei.

Folgende Schlüsse können aus diesen Daten für die Simulation gezogen werden:

- Verhalten ohne bzw. mit Pouch soll auch in der Simulation nachgebildet werden können
- Auffaltung (Aufdehnung) der Lagen soll bestmöglich validiert werden können, wobei Hauptaugenmerk auf das beim Versuch auftretende Kraftniveau gelegt wird
- Kontakt zwischen Auflager/Hülle bzw. Auflager/ohne Hülle wird ident modelliert, da ein Einfluss des Elektrolyts („schmieren“/„haften“) im Versuch nicht eindeutig erkennbar war
- „Durchrutschen“ der Zelle wird in der Simulation nicht nachgebildet

Im Folgenden wird der 3-Punkt-Biegeversuch mit Pouch geladen/ungeladen (freie Länge=längste Abmessung) dargestellt:

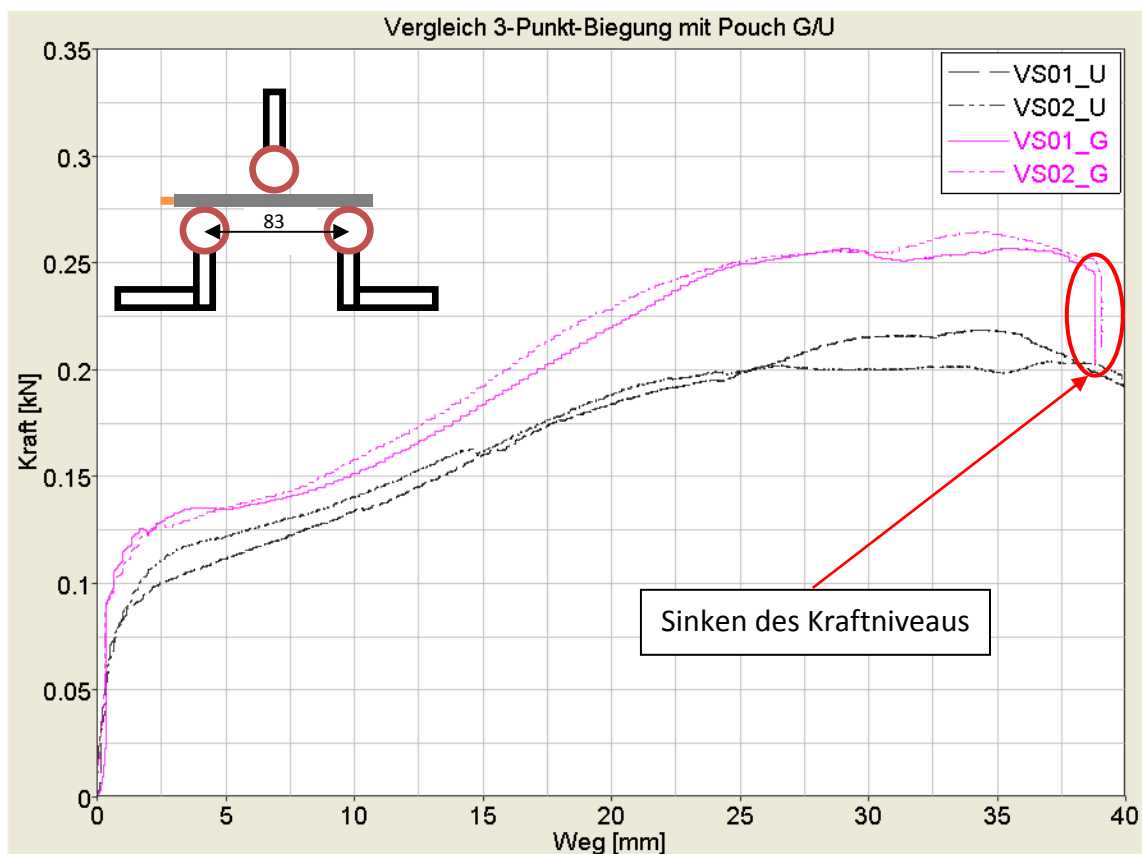


Abbildung 7-19 Vergleich 3-Punkt-Biegung mit Pouch geladen/ungeladen (freie Länge=längste Abmessung)

In der oberen Abbildung ist das höhere Kraftniveau der Versuchskurven von der geladenen Batterie („G“) gut erkennbar. Dies kann durch die Auswirkung auf die volumetrischen Eigenschaften der Zelle (sie wird etwas dicker), die beim Laden auftreten, begründet werden, wobei dieser Effekt auch durch Messungen vor und nach dem Ladevorgang bestätigt werden konnte. Dabei wurde an mehreren Stellen der Batterie die Dicke der Zelle bestimmt und der Mittelwert gebildet. Als Ergebnis konnte ein Unterschied in den Dicken der Zelle von ca. 0,1mm festgestellt werden. Durch diesen Vorgang wird die Biegesteifigkeit erhöht, da die Höhe der Zelle mit der dritten Potenz in das Flächenträgheitsmoment eingeht, wodurch das höhere Kraftniveau im Diagramm zu Stande kommt. Das plötzliche Absinken im Kraftverlauf der beiden Versuchskurven für die geladene Zelle bei ca. 40mm Verfahrweg resultiert daraus, dass durch den manuellen Betrieb des Prüfstandes das Abbruchkriterium nicht immer exakt eingehalten werden konnte.

Folgende Schlüsse können aus diesen Daten für die Simulation gezogen werden:

- Das höhere Kraftniveau durch den Ladevorgang der Zelle müsste eigentlich abgebildet werden, wird aber im Zuge dieser Arbeit nicht berücksichtigt
- Für zukünftige FE-Modelle sollte es aber auch möglich sein, in Abhängigkeit des State of Charge (SOC), die zugehörigen unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften der Zelle abbilden zu können (siehe Ausblick Kapitel 9)

Abschließend zu allen vorliegenden Ergebnissen können folgende Aspekte festgehalten werden:

- Die Pouch trägt am meisten zur Biegesteifigkeit bei
- Ohne die Zellhülle sind die Klebebänder maßgeblich für die Stabilität der Batterie verantwortlich
- Das Kraftniveau der geladenen Zelle war bei allen Versuchen höher als bei der ungeladenen Zelle
- Trotz starken Deformierungen der Energiespeicher trat kein Kurzschluss auf (außer beim Test mit der Hemisphäre siehe Anhang Kapitel 10)

7.5 Validierung Simulation/Zelltests

Nach erfolgreicher Absolvierung der Zelltests wurden die Resultate der Simulation den Daten, die aus den Versuchen gewonnen werden konnten, gegenübergestellt. Auf die Ergebnisse wird in diesem Teilkapitel näher eingegangen. Folgende Versuchskonfigurationen wurden mit dem Simulationsmodell verglichen:

- 3-Punkt-Biegung ohne Pouch (freie Länge=längste Abmessung)
- 3-Punkt-Biegung mit Pouch (freie Länge=längste Abmessung)
- Knicktest X-Achse
- Impaktortest X-Achse

Durch die Gegebenheit, dass in dieser Arbeit der Einfluss des Ladezustandes auf die mechanischen Eigenschaften des numerischen Modells nicht berücksichtigt wird (siehe Kapitel 3.2), werden die Simulationsdaten ausschließlich den ungeladenen Versuchskurven gegenübergestellt. In Bezug auf den Zeitschritt in der Simulation kann festgehalten werden, dass dieser bei allen berechneten Versuchskonfigurationen in der Größenordnung einer Gesamtfahrzeugsimulation (ca. 10^{-7} s) liegt.

3-Punkt-Biegung ohne Pouch (freie Länge=längste Abmessung):

Die folgenden Abbildungen zeigen das numerische Modell der Zelle im Vergleich zum Realversuch bei verschiedenen Durchbiegungen:

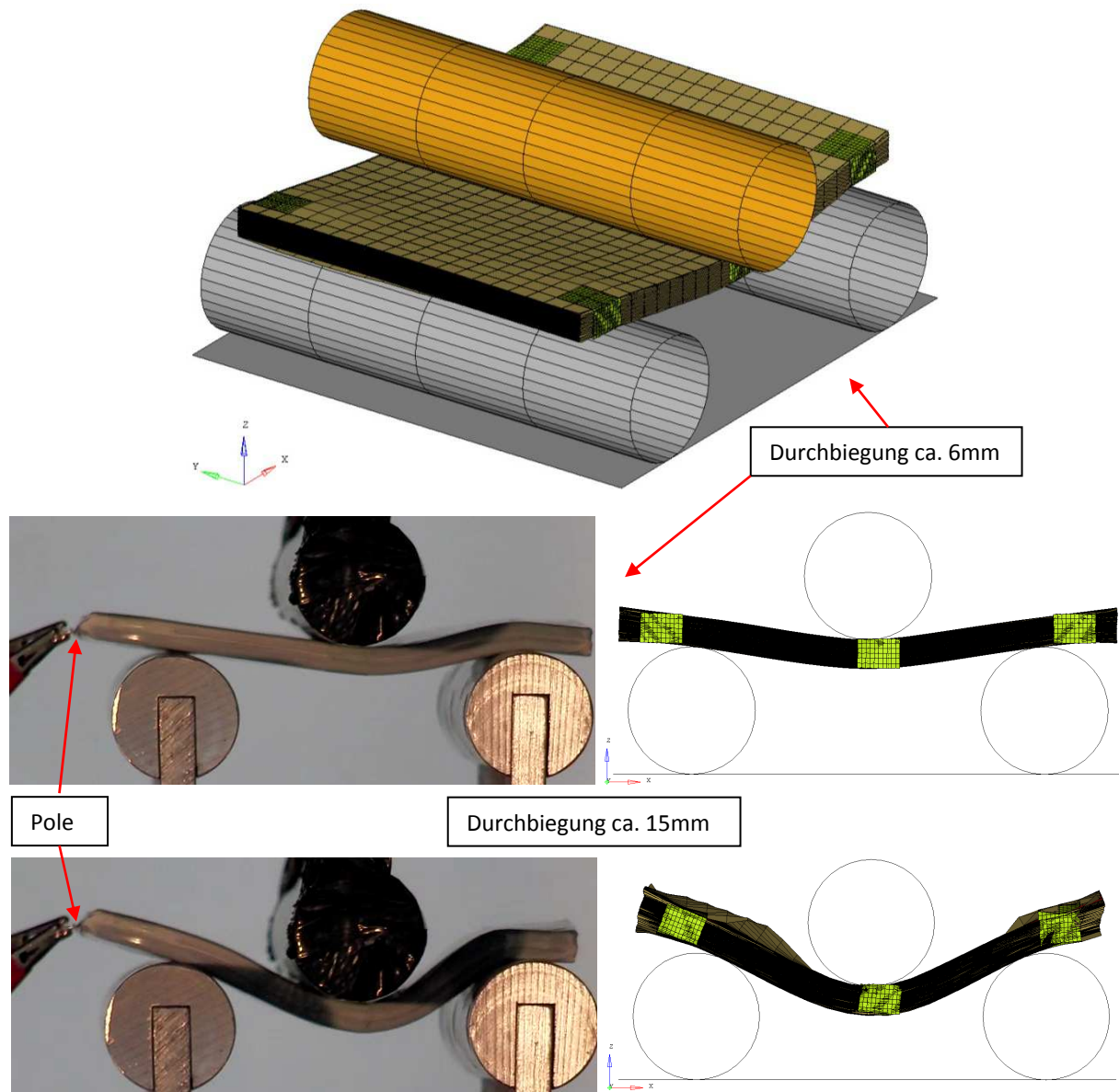


Abbildung 7-20 Vergleich Realversuch 3-Punkt-Biegung ohne Pouch (freie Länge=längste Abmessung)/Simulation (rechts)

In den rechten Bildern der oberen Abbildung (Simulation) kann im Gegensatz zu den Realversuchen (linke Bilder) ein symmetrischer Verlauf der Durchbiegung festgestellt werden. Dies kann auf ein mögliches nicht mittiges Auflegen der Zelle beim Versuch zurückgeführt werden. Ein weiterer denkbarer Effekt wäre die, durch die Zusammenführung der Pole (Plus- und Minuspol), erhöhte Biegesteifigkeit der Zelle. Diese Zusammenführung

wurde jedoch auf Grund der vorab getroffenen Vereinfachungen im Simulationsmodell nicht abgebildet (siehe Kapitel 3.2). Die im Kapitel 7.4 beschriebene Auffaltung der Zelle in den Endlagen (siehe Abbildung 7-18) konnte in der Simulation nicht exakt nachgebildet werden, jedoch wurde, wie bereits erwähnt, der Fokus auf die bestmögliche Abbildung der Kraft-Weg-Kurven gelegt.

Die Versuchs- bzw. Simulationsdaten zur beschriebenen Versuchskonfiguration sind in der Abbildung 7-21 dargestellt:

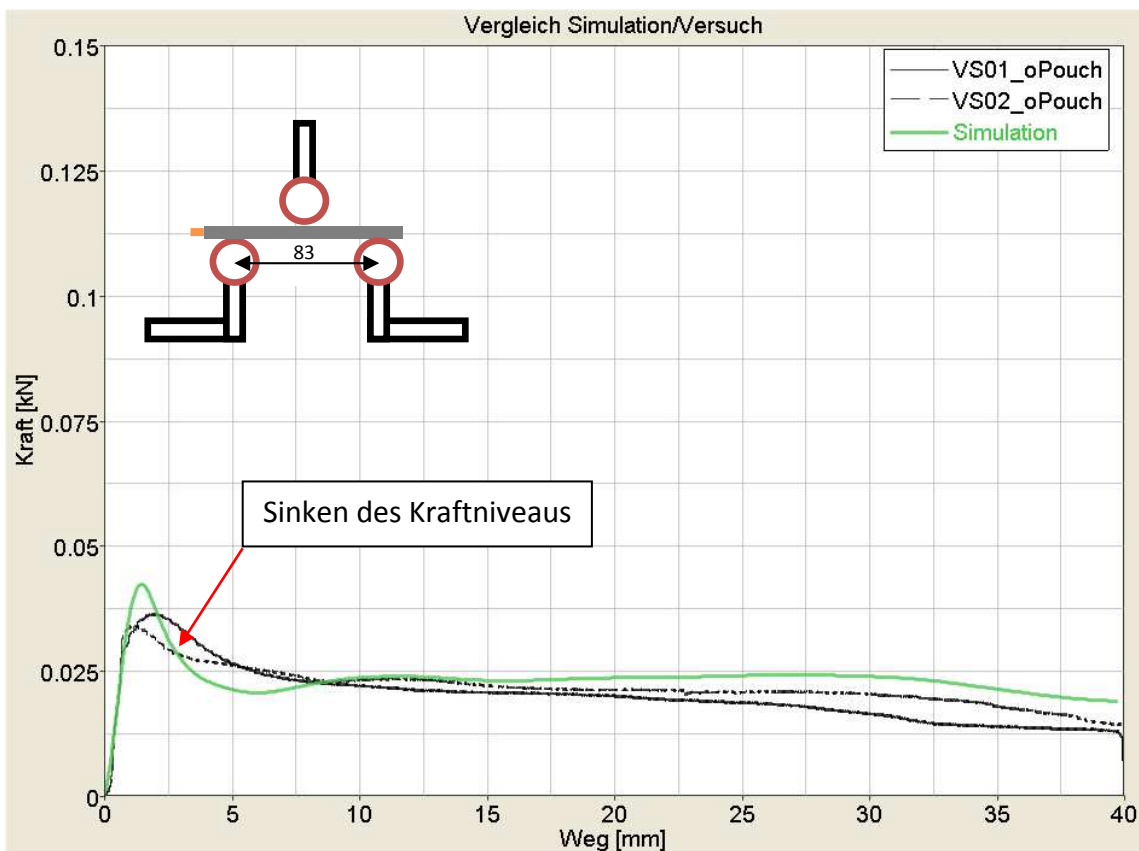


Abbildung 7-21 Gegenüberstellung Versuchskurven 3-Punkt-Biegung ohne Pouch (freie Länge=längste Abmessung)/Simulationsdaten

Der anfängliche Anstieg des Kraftniveaus der Realversuchskurve konnte, wie die obere Abbildung zeigt, auch in der Simulation gut nachgebildet werden. Die dargestellte Simulationskurve sowie die nachfolgenden Simulationsdaten der einzelnen Versuchskonfigurationen werden gefiltert abgebildet. Das im Diagramm eingezeichnete Absinken des Kraftniveaus trat in der ungefilterten Kurve stärker auf als in der abgebildeten. Dies kann durch das abrupte Versagen der „Tied-Kontakte“ zwischen den Lagen begründet werden (siehe Kapitel 6.2).

3-Punkt-Biegung mit Pouch (freie Länge=längste Abmessung):

Die Abbildung 7-22 zeigt das numerische Simulationsmodell bei unterschiedlichen Durchbiegungen im Vergleich zum Realversuch:

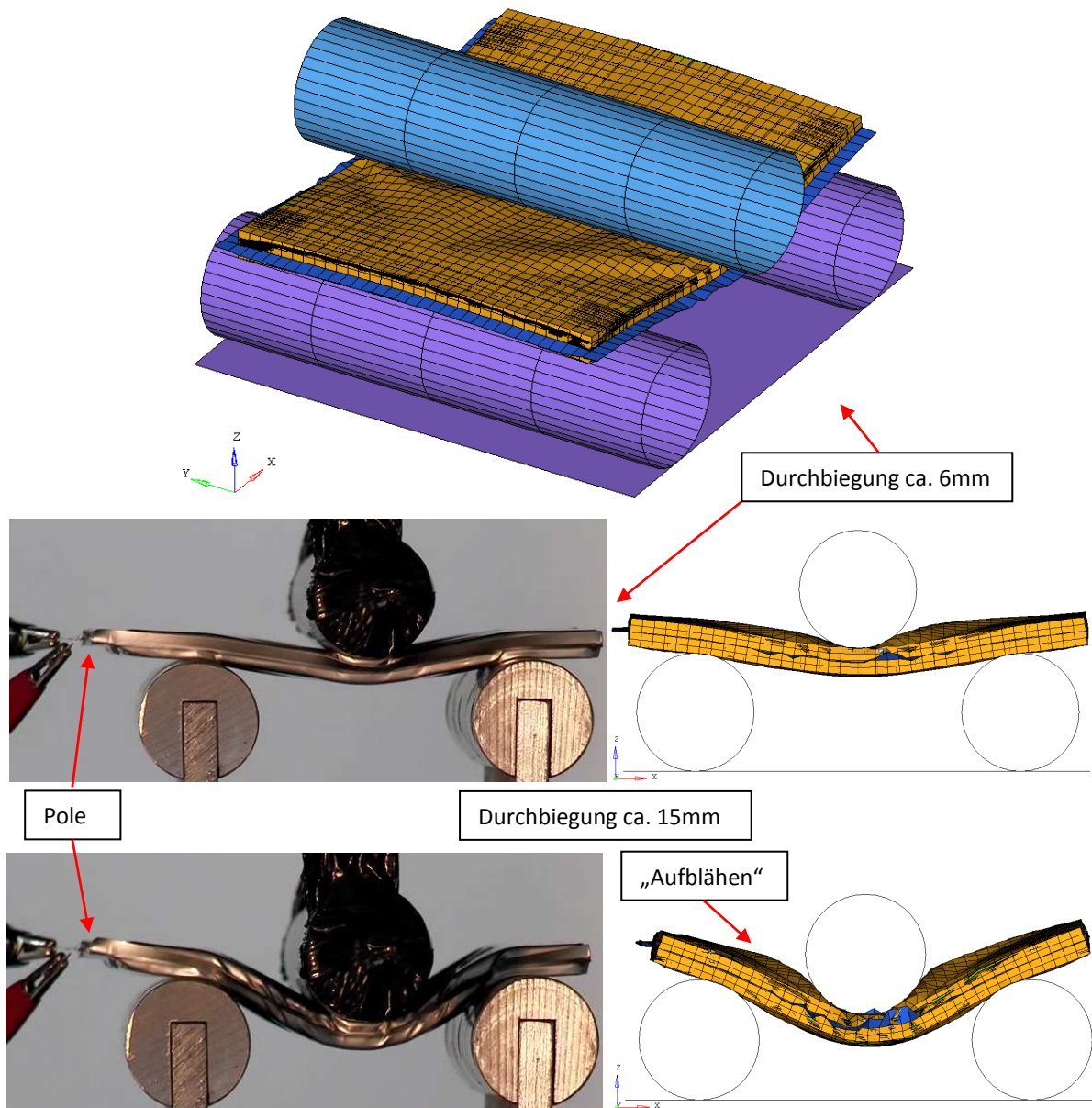


Abbildung 7-22 Vergleich Realversuch 3-Punkt-Biegung mit Pouch (freie Länge=längste Abmessung)/Simulation

Der Effekt der nichtsymmetrischen Durchbiegung im Realversuch (siehe linke Bilder) ist deutlich weniger stark ausgeprägt, als im zuvor beschriebenen Versuch ohne Pouch (Abbildung 7-20). Dies kann auf den Einfluss der Hülle auf die Verschiebbewegungen der Lagen in der Zelle (werden durch die Hülle eingeschränkt) und auf das mittige Auflegen der Lithium-Polymer-Batterie erklärt werden. Das „Aufblähen“ der Zelle mit zunehmender Verschiebung in vertikaler Richtung trat im numerischen Modell in größerem Ausmaß als im

Realversuch auf. Begründet werden kann dies durch die in den Kontaktkarten („Tied-Kontakte“) definierten Parameter (Steifigkeit in Längs- und Querrichtung, Reibkoeffizienten) zwischen Hülle und Separator bzw. Hülle und Klebeband. Bei dieser, wie auch bei allen anderen Versuchskonfigurationen, wurde auf die Nachbildung der Versuchskurven größerer Wert gelegt, als auf die korrekte visuelle Abbildung der Tests in der Simulation.

Die Simulationsergebnisse des 3-Punkt-Biegeversuchs mit Pouch im Vergleich zum Realversuch zeigt die folgende Abbildung:

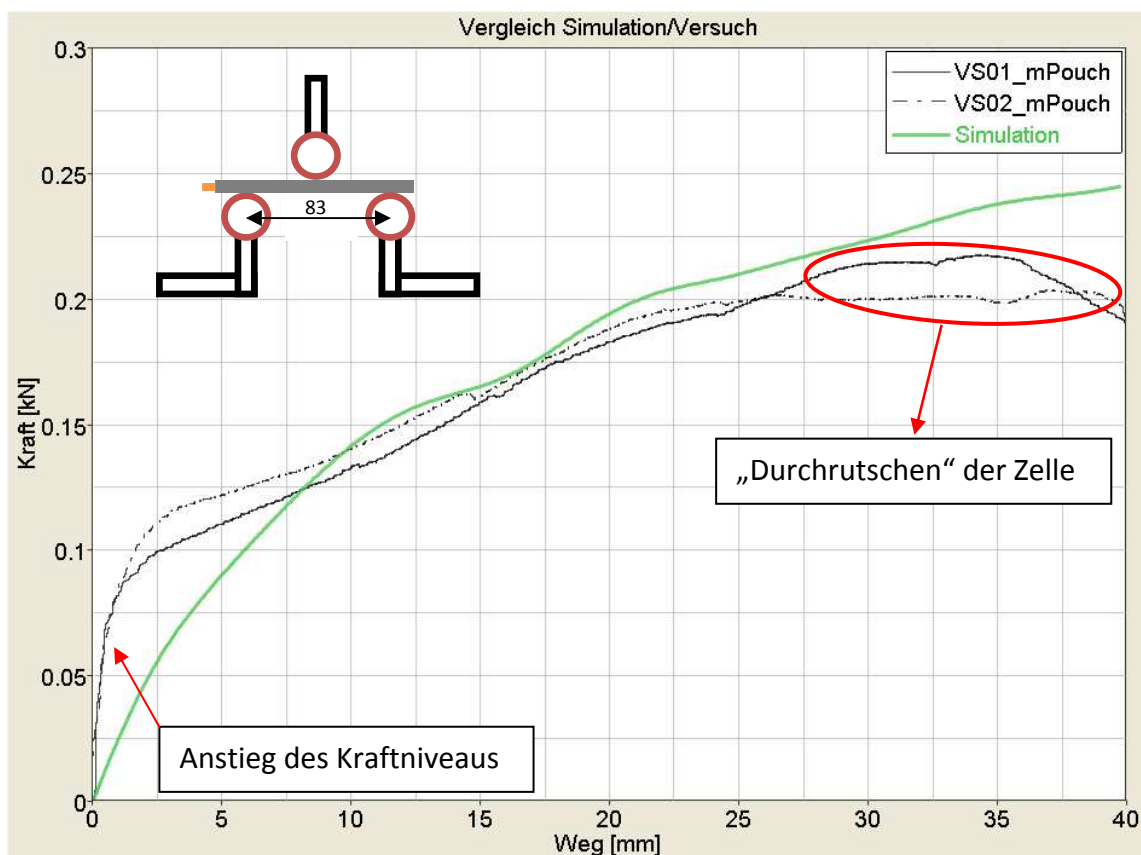


Abbildung 7-23 Gegenüberstellung Versuchskurven 3-Punkt-Biegung mit Pouch (freie Länge=längste Abmessung)/Simulationsdaten

Wie das obere Diagramm zeigt, konnte grundsätzlich eine ansprechende Nachbildung der Versuchskurven in der Simulation erzielt werden. Der anfängliche Anstieg des Kraftniveaus des Realversuchs konnte im numerischen Modell nicht genau abgebildet werden. Gründe dafür wären möglicherweise die bereits erwähnten Kontaktdefinitionen (am Anfang des Versuchs zu wenig „steif“) sowie das Wirken von Adhäsionskräften im Realversuch (zuerst wirken diese stärker, nach zunehmenden Verschieben der Lagen nehmen sie ab), die in der Simulation mit der gewählten Modellierungsart in dieser Form nicht nachgebildet wurden.

Der Effekt des „Durchrutschens“ trat im numerischen Modell weniger stark auf, wobei dieser in der Simulation auch nicht explizit nachgebildet wurde (siehe Kapitel 7.4).

Knicktest X-Achse:

Die folgende Abbildung stellt den Knicktest im Vergleich zum numerischen Modell bei unterschiedlichen Verschiebungen dar:

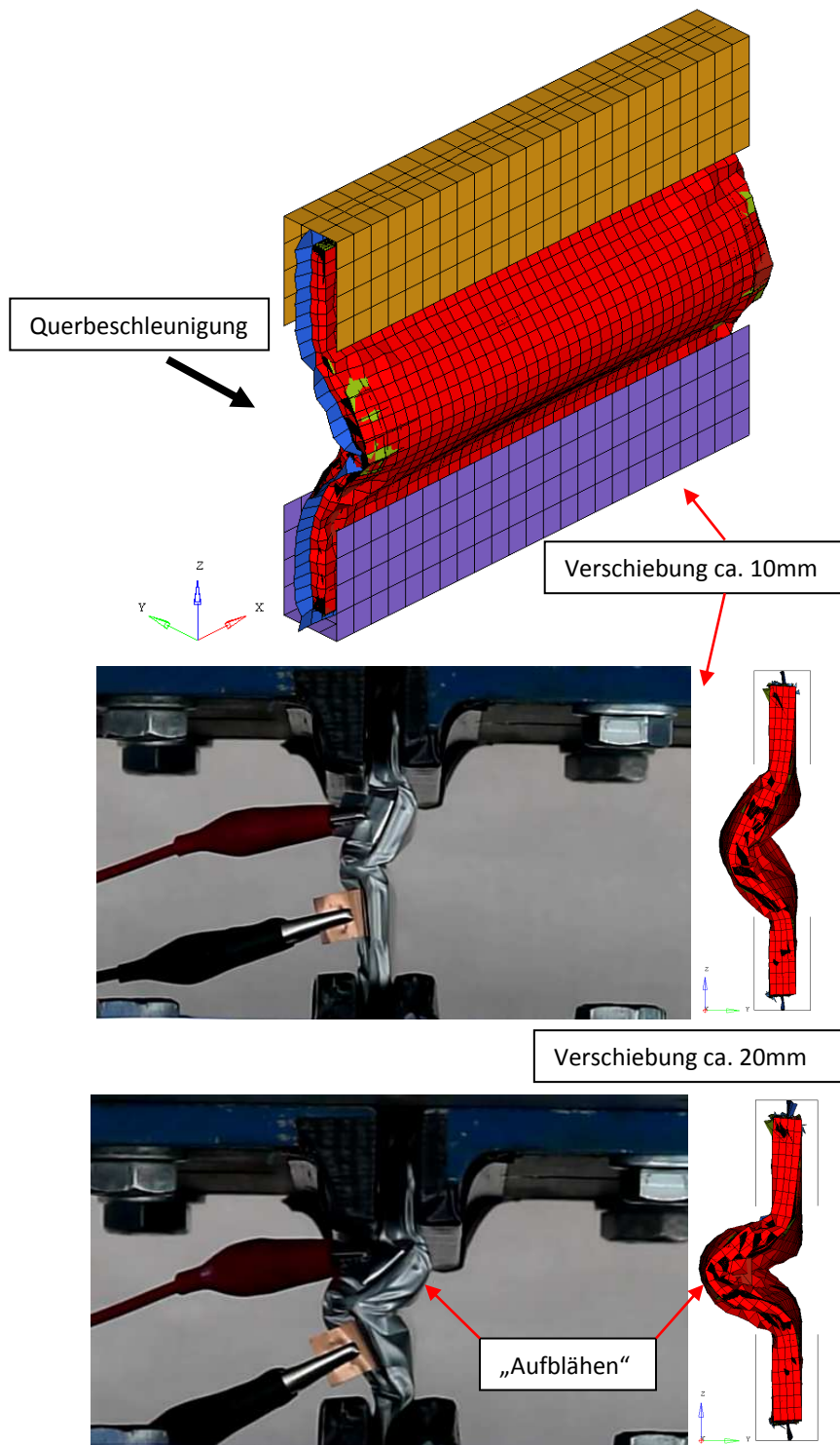


Abbildung 7-24 Vergleich Realversuch Knicktest X-Achse/Simulation

In den oberen drei Bildern der Abbildung ist der Knicktest bei einer Verschiebung von 10mm dargestellt. Um den eher undefinierten Effekt des Ausknickens in der numerischen Simulation zu „provozieren“, wurde das Modell bis zu einer Verschiebung von ca. 3mm (6ms) zusätzlich mit einer Beschleunigung quer zur Druckrichtung beaufschlagt. Ähnliche Ansätze um eine Imperfektion herbeizuführen sind in der Literatur (17) zu finden. Ein zunehmendes „Aufblähen“ bzw. Auffalten der Zelle konnte mit steigender Verformung, sowohl in der Simulation als auch im Versuch, festgestellt werden. Zur Nachbildung des Versuchs in der Simulation kann noch ergänzt werden, dass die Spannbacken als Shells modelliert wurden, wobei deren Dicke jenen des Realversuchs entsprachen (8mm).

Im folgenden Diagramm werden die Versuchsdaten den Simulationsergebnissen gegenübergestellt:

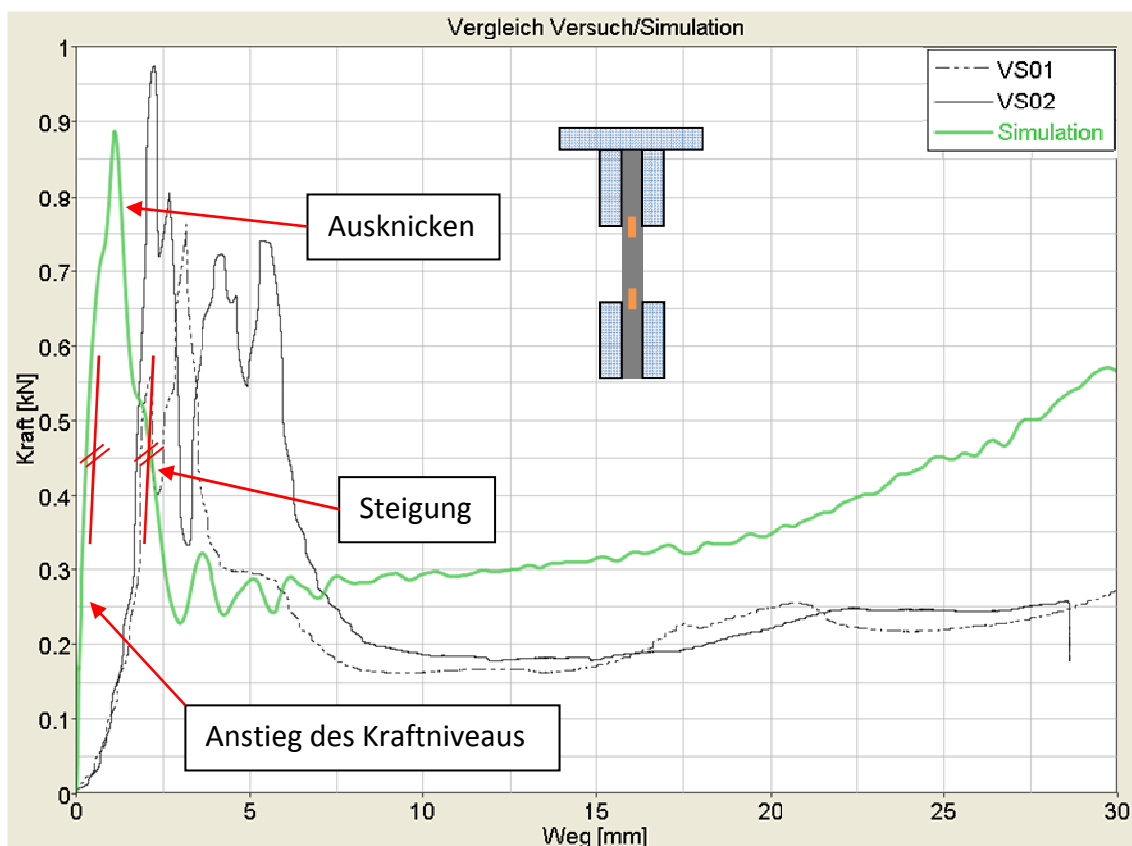


Abbildung 7-25 Gegenüberstellung Versuchskurven Knicktest X-Achse/Simulationsdaten

Generell kann man sagen, dass eine gute Reproduzierbarkeit eines Knicktests im Realversuch sowie in der Simulation eher schwierig zu realisieren ist. Es können lediglich Tendenzen, wie beispielsweise das maximale Kraftniveau, in den Versuchskurven erkannt werden. Im vorliegenden Diagramm erfolgte der Kraftanstieg in der Simulation rascher als in den

Realversuchen, wobei die Steigung ab ca. 2mm Weg in den Versuchskurven gut mit den Simulationsergebnissen übereinstimmte. Ein möglicher Grund für das spätere Ansteigen des Kraftniveaus im Versuch könnte durch die Verschweißung der Hülle verursacht werden, die im Versuch länger braucht um sich „zusammenzufalten“. Das höhere Kraftniveau nach Ausknicken der Zelle ergab sich durch die vorab definierten Parameter (z.B. Steifigkeiten zwischen Pouch und Separator) im 3-Punkt-Biegeversuch.

Impaktortest X-Achse:

Die nachfolgende Abbildung zeigt den Impaktortest in der Simulation im Vergleich zum Realversuch bei verschiedenen Verschiebungen:

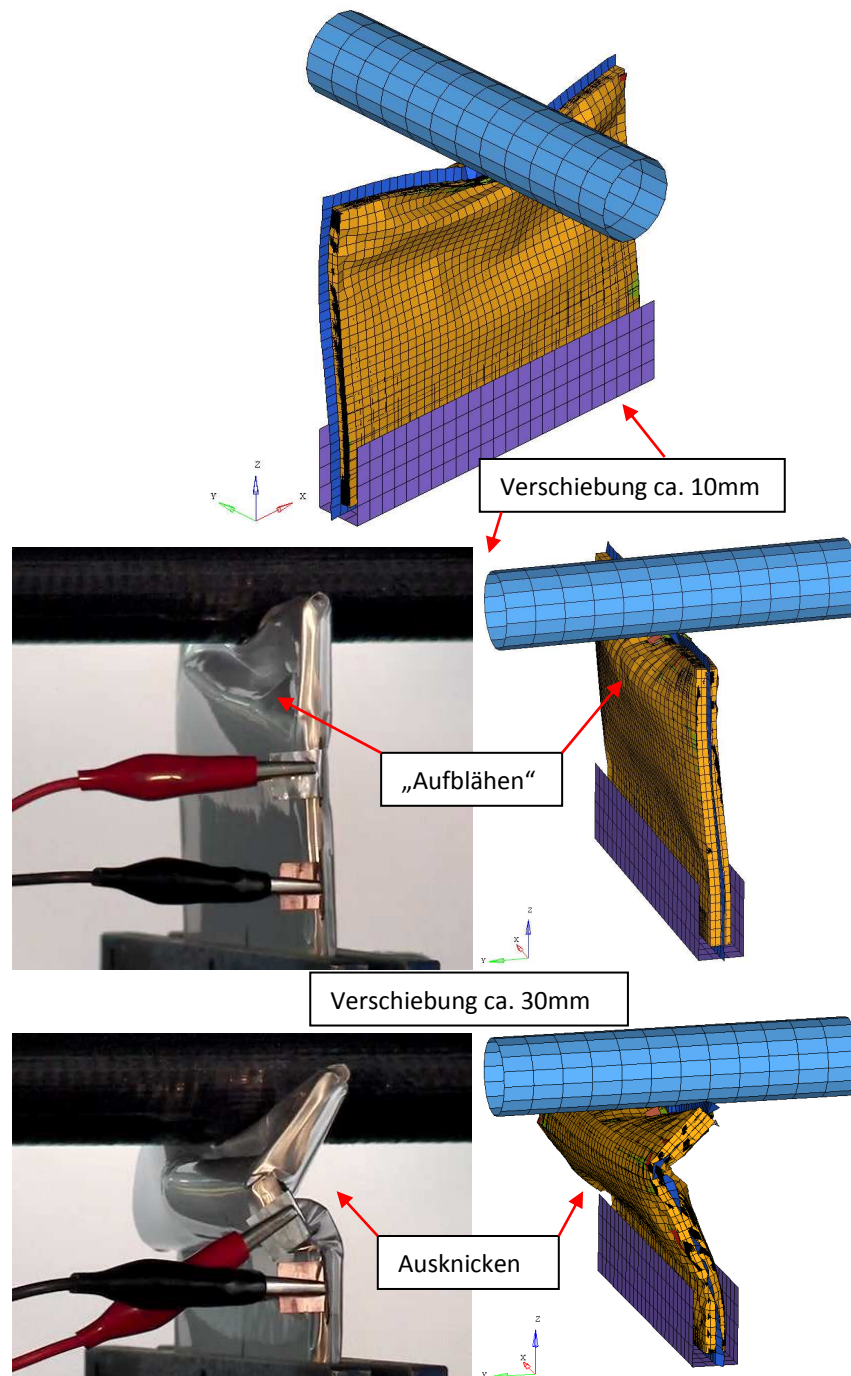


Abbildung 7-26 Vergleich Realversuch Impaktortest X-Achse/Simulation

Auch beim Impaktortest konnten die mit zunehmender Verschiebung auftretenden Effekte (Ausknicken, „Aufblähen“ bzw. Auffalten) in der Simulation dem Realversuch entsprechend nachgebildet werden. Gleich wie beim Knicktest, wurden die Komponenten für die Nachstellung des Versuchs in der Simulation (Spannbacke, Impaktor) als Shells modelliert.

Die Versuchs- bzw. Simulationsergebnisse sind in der Abbildung 7-27 dargestellt:

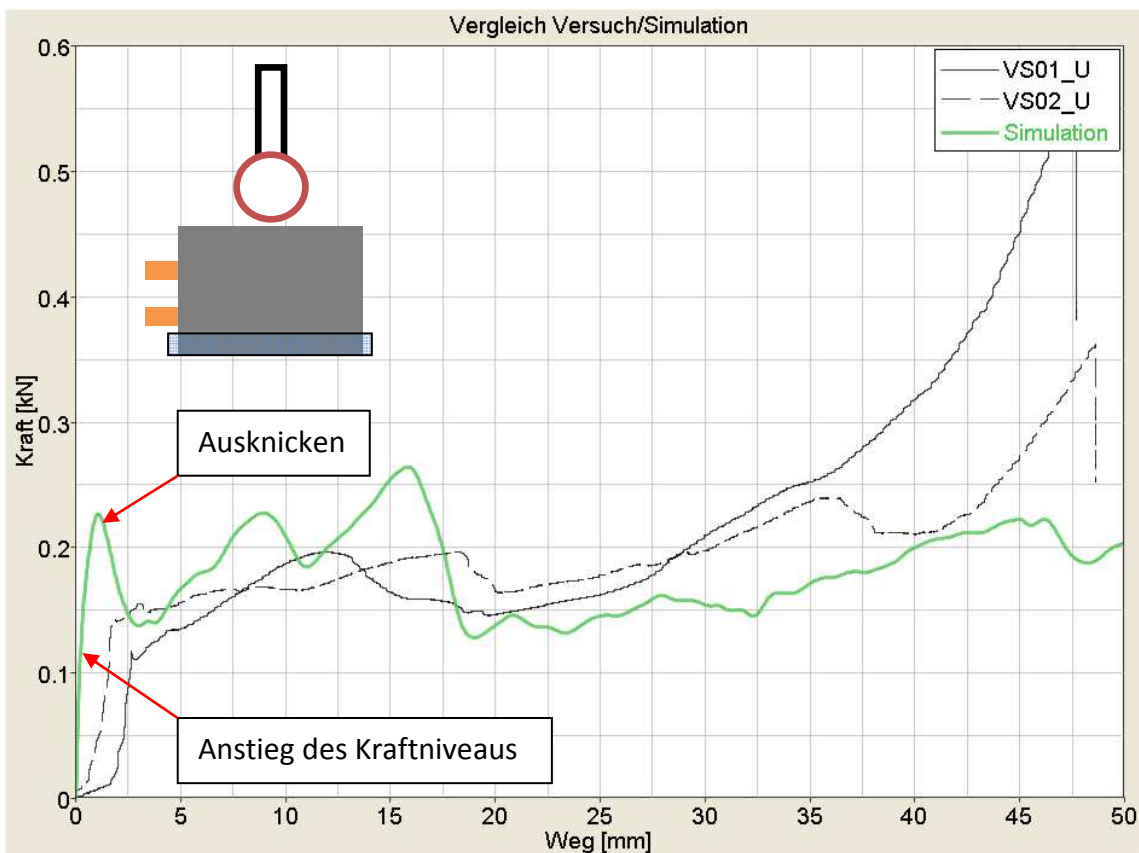


Abbildung 7-27 Gegenüberstellung Versuchskurven Impaktortest X-Achse/Simulationsdaten

Ähnlich wie beim zuvor beschriebenen Knicktest, kann derselbe Grund für das auftretende Phänomen des späteren Ansteigens des Kraftniveaus im Versuch genannt werden. Unterschiede ergeben sich beim Effekt des Ausknickens bzw. beim Zusammenfallen der Zelle, der in der numerischen Simulation wesentlich stärker auftrat als im Realversuch. Zusammenfassend kann man sagen, dass auch beim Impaktortest ein vergleichbares Kraftniveau in der Simulation im Vergleich zum Realversuch erzielt werden konnte.

Das vorliegende Simulationsmodell wurde anhand einer Reihe unterschiedlicher ungeladener Versuchskonfigurationen validiert und liefert gut übereinstimmende Ergebnisse. Es kann also davon ausgegangen werden, dass die Belastungssituation der Einzelkomponenten im Inneren der Zelle gut nachgebildet wird.

8 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Nachbildung einer Lithium-Polymer-Zelle in der FE-Simulation, wobei der Schwerpunkt der Modellierung auf der bestmöglichen Abbildung der mechanischen Eigenschaften lag. Zu diesem Zweck wurden Realversuche in unterschiedlichen Versuchskonfigurationen durchgeführt und anschließend in der numerischen Simulation nachgebildet.

Als Ergebnis der Arbeit kann ein funktionierendes FE-Modell einer lithiumbasierenden Batterie genannt werden, mit welchem Aussagen über mechanische Belastungen getroffen werden können.

Vor der Auswahl geeigneter Verfahren zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften erfolgte eine Untersuchung der Zelle. Dazu wurde der Energiespeicher im ungeladenen Zustand geöffnet und eine Material- sowie eine Schichtdickenbestimmung durchgeführt.

Die durchgeführten Zugversuche lieferten wichtige Inputparameter für die Bestimmung von notwendigen Materialdaten. Dabei konnte eine gute Überstimmung von Versuch und FE-Simulation erreicht und somit der Grundstein für den Aufbau eines Gesamtmodells der Zelle gelegt werden.

Nach Definierung einer Prüfmatrix für die geladenen und ungeladenen Zellenversuche, konnten die Tests für die Generierung von Validierungsdaten durchgeführt werden. Dabei wurde eine zufriedenstellende Reproduzierbarkeit der durchgeführten Versuche erreicht. Nach Abbildung der einzelnen Versuchskonfigurationen in der Simulation wurden diese Daten anschließend zur Validierung des Modells herangezogen mit welchem eine akzeptable Nachbildung der durchgeführten Tests in der Simulation erzielt werden konnte. Die aufgetretenen Abweichungen von Simulation und Versuch können größtenteils dem Einfluss der Steifigkeit und den Reibparametern zwischen den einzelnen Lagen zugerechnet werden. Darin liegt auch das größte Verbesserungspotenzial des Modells, wobei durchaus ein anderer Ansatz, wie beispielsweise das Ersetzen der Kontaktkarten durch das in der Arbeit beschriebene „Cohesiv-Material“, verfolgt werden könnte.

9 Ausblick

Mit dem entwickelten numerischen Modell der Lithium-Polymer-Zelle lassen sich Belastungen im quasistatischen Bereich gut abbilden. Die gewonnenen Erkenntnisse gelten jedoch speziell nur für den untersuchten Zelltyp, wodurch eine Übertragung auf andere Zelltypen nicht überprüft werden konnte.

Wie anfangs erwähnt, gelten die Untersuchungen nur für quasistatische Belastungen. Deshalb wäre es sinnvoll, mit der verwendeten Zelle zukünftig auch dynamische Tests mit deutlich höherer Belastungsgeschwindigkeit durchzuführen, um in weiterer Folge ein Modell für beide Beanspruchungsarten (quasistatisch, dynamisch) zu erhalten.

Die Abbildung unterschiedlicher Ladezustände der Zelle in der Simulation könnte in erster Näherung durch eine Anpassung der, in der vorliegenden Arbeit beschriebenen, volumetrischen Eigenschaften (Zelle wird etwas dicker mit zunehmenden SOC) relativ einfach umsetzbar sein. Durch die Gegebenheit, dass der SOC die Zelle nicht nur volumetrisch, sondern auch chemisch verändert, und in weiterer Folge die mechanischen Eigenschaften des Energiespeichers beeinflusst, wird zukünftig ein multiphysikalisches Simulationsmodell notwendig sein, um eine bestmögliche Abbildung der Batterie im Einzelnen bzw. im Gesamtfahrzeug gewährleisten zu können. Mit dem, in dieser Arbeit, verwendeten Solver (LS-Dyna®) kann eine multiphysikalische Abbildung der Zelle derzeit nicht realisiert werden. Eine sinnvolle Alternative dazu wäre beispielsweise das Softwareprogramm COMSOL Multiphysics®.

In den durchgeführten Versuchen konnte, außer beim Test mit der Hemisphäre, kein Kurzschluss der Zelle festgestellt werden. Kurzschlüsse in der Batterie infolge mechanischer Belastungen könnten zukünftig dahingehend detektiert werden, in dem ein durch die Krafteinwirkung hervorgerufenen Löcher von einzelnen Elementen des Separators im numerischen Modell, als „Kurzschlusskriterium“ herangezogen werden. Diesbezüglich gibt es noch großen Forschungsbedarf wobei die gesamte Thematik der Elektromobilität auch in Zukunft ein spannendes Feld ist und bleibt.

10 Anhang

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Versuchskonfigurationen, auf die in der Arbeit nicht genauer eingegangen wurde, dargestellt.

Ungeladene Versuche:

Zunächst werden die Daten, die aus den ungeladenen Versuchen gewonnen werden konnten, abgebildet. Dabei wird nachfolgend nur der Vergleich zwischen den Tests mit und ohne Pouch angestellt. Die weiteren Versuchskurven der ungeladenen Tests werden anschließend direkt jenen der geladenen Versuche gegenübergestellt.

3-Punkt-Biegeversuch mit und ohne Pouch (freie Länge=Breite):

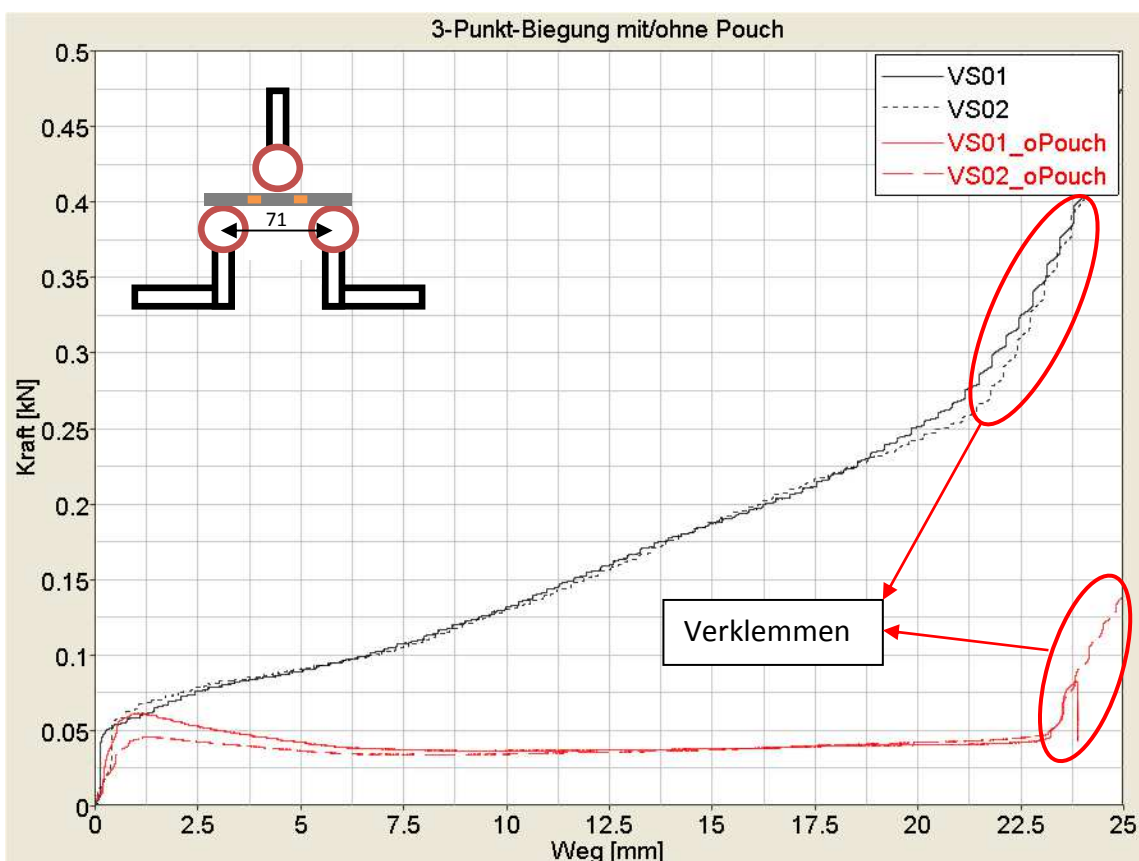


Abbildung 10-1 Vergleich 3-Punkt-Biegeversuch mit und ohne Pouch (freie Länge=Breite)

In der oberen Abbildung erkennt man nach kurzem, ähnlichem Anstieg des Kraftniveaus (bis ca. 1mm Weg) den starken Unterschied zwischen den Versuchen mit und ohne Pouch. Die Gründe für die Unterschiede können auf dieselben, die in Kapitel 7.4 genannt wurden, zurückgeführt werden (vgl. Abbildung 7-15).

Vergleich geladene/ungeladene Versuche:

Generell kann gesagt werden, dass das Kraftniveau der Versuchskurven der geladenen Zellen etwas höher liegt als jenes der ungeladenen Zellen. Ein Grund dafür ist, wie bereits in Kapitel 7.4 erwähnt, die volumetrische Änderung der Batterie, die durch das Laden hervorgerufen wird. Aus Gründen der Übersicht werden in den folgenden Abbildungen nur die repräsentativsten Kurvenverläufe der geladenen („G“) und ungeladenen („U“) Tests dargestellt.

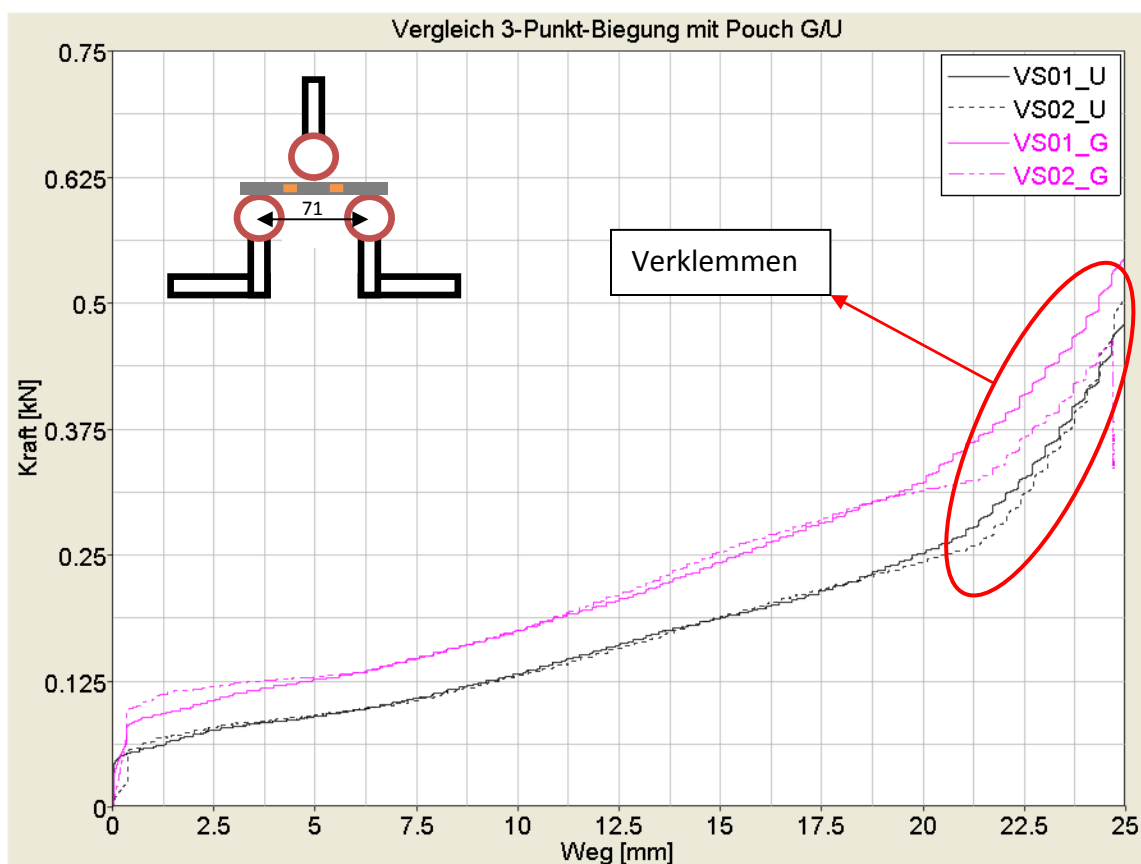
3-Punkt-Biegeverlauf mit Pouch geladen/ungeladen (freie Länge=Breite):

Abbildung 10-2 Vergleich 3-Punkt-Biegeversuch mit Pouch geladen/ungeladen (freie Länge=Breite)

In der Abbildung oben ist das etwas höhere Kraftniveau, ähnlich wie beim Versuch „3 Punkt-Biegung mit Pouch geladen/ungeladen (freie Länge=längste Abmessung)“, erkennbar. Ab einer Verschiebung von ca. 20mm tritt das bereits in Kapitel 7.4 beschriebene Verklebmen der Zelle zwischen den beiden Auflagern auf.

Impaktortest X-Achse geladen/ungeladen:

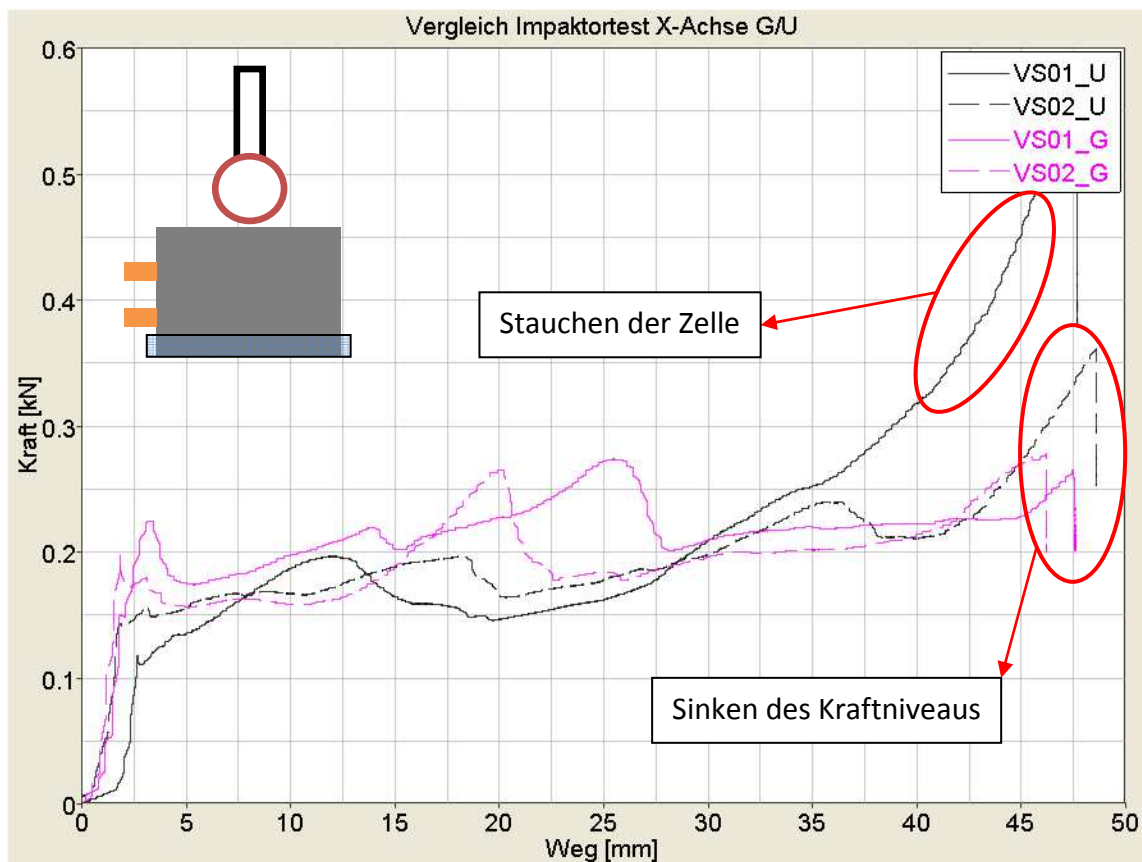


Abbildung 10-3 Vergleich Impaktortest X-Achse geladen/ungeladen

Beim Impaktortest in X-Richtung konnte eine gute Reproduzierbarkeit der Versuche erreicht werden. Schwankungen im Verlauf ergeben sich durch das teils unterschiedliche „Ein- bzw. Ausknicken“ der Zelle. Für den Bereich bis ca. 40mm Verschiebung ist das mechanische Verhalten der Zelle interessant, da es ab diesem Weg zu einem Stauchen der Zelle zwischen Impaktor und Einspannung kommt. Dieser Effekt erklärt auch den großen Kraftanstieg am Ende der Tests. Das plötzliche Absinken der Kraftniveaus am Schluss der beiden Kraftverläufe kommt daher, dass durch den manuellen Betrieb des Prüfstandes das Abbruchkriterium nicht immer exakt eingehalten werden konnte (siehe auch Abbildung 7-19, Abbildung 10-1, Abbildung 10-4, Abbildung 10-5, Abbildung 10-6).

Impaktortest Z-Achse geladen/ungeladen:

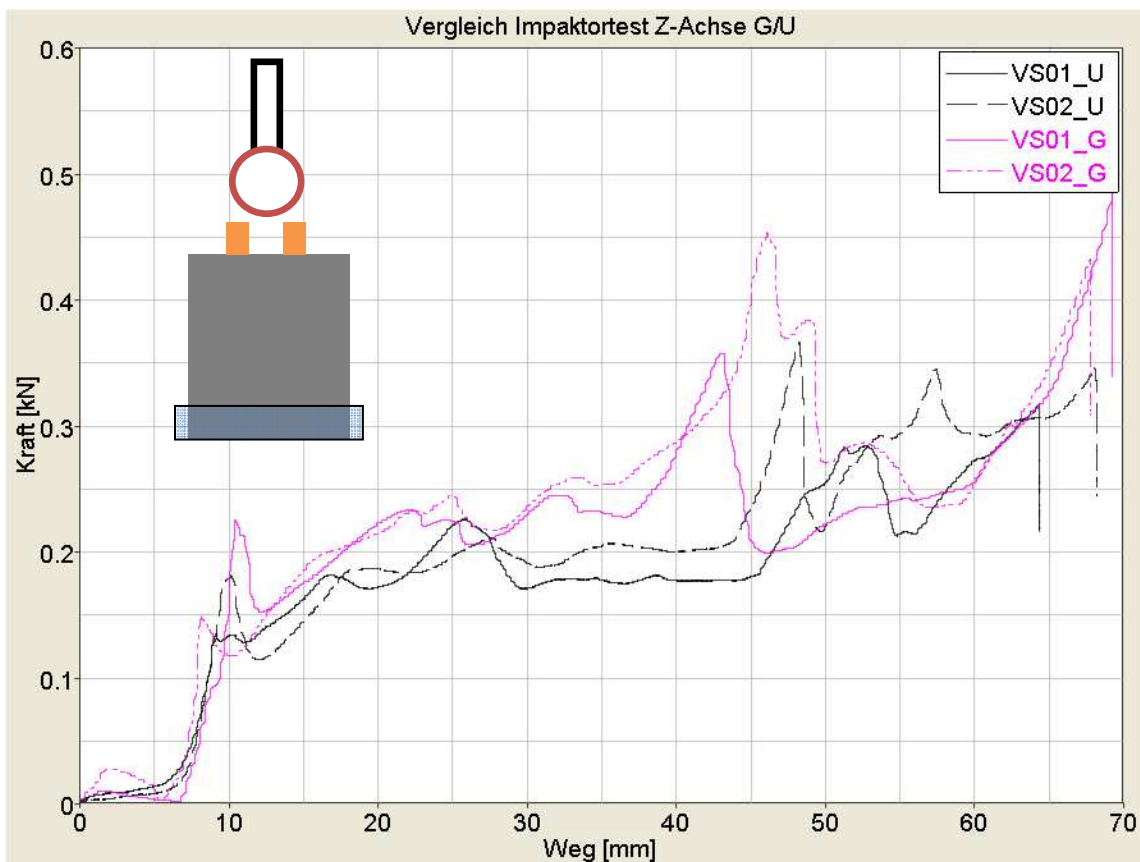


Abbildung 10-4 Vergleich Impaktortest Z-Achse geladen/ungeladen

Für die Impaktortests in Z-Richtung konnte eine vergleichbar gute Reproduzierbarkeit der Versuchskurven, gegenüber den Tests in X-Richtung, erreicht werden. Die Unregelmäßigkeiten in den Verläufen lassen sich auf dieselben Gründe wie bei den Versuchskurven in X-Richtung zurückführen.

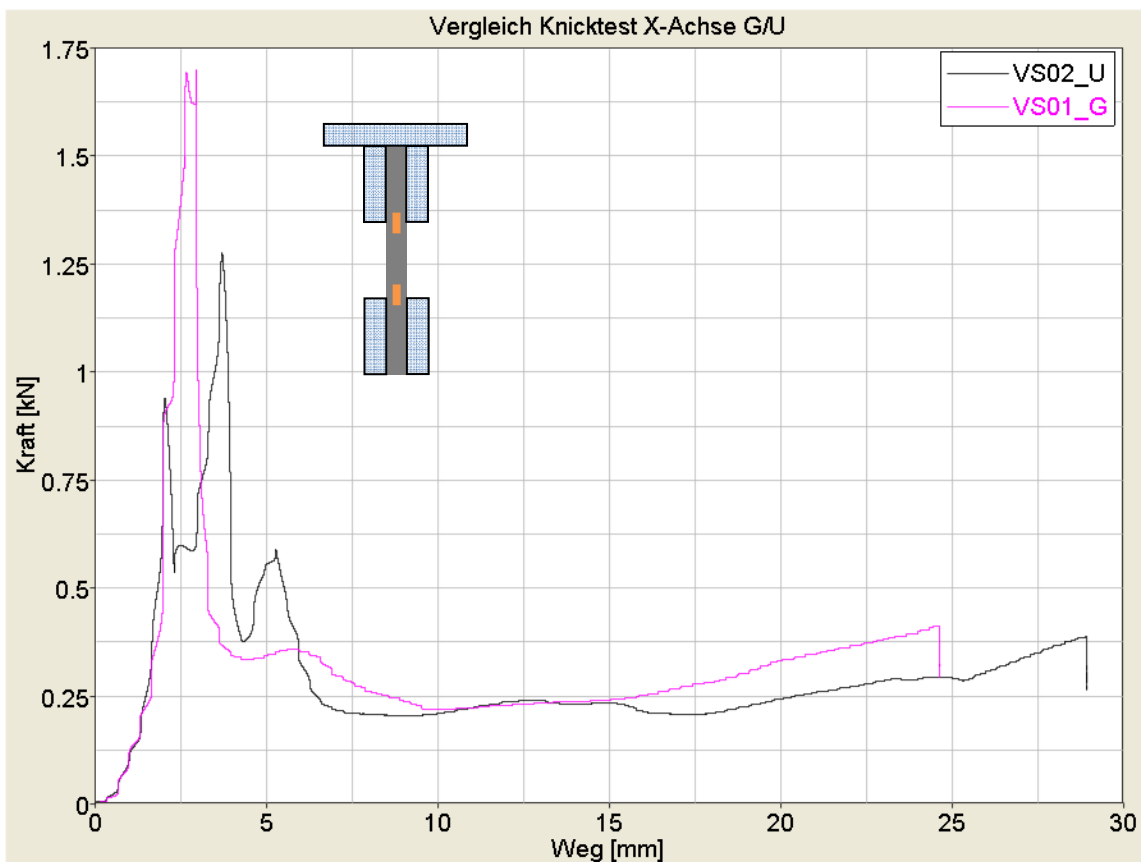
Knicktest X-Achse geladen/ungeladen:

Abbildung 10-5 Vergleich Knicktest X-Achse geladen/ungeladen

Das Anstiegsverhalten der Versuchskurven ist am Anfang des Kraft-Weg-Verlaufs nahezu ident (bis ca. 2,5mm Weg). Danach ergeben sich, bedingt durch das ungleiche Ausknicken der Zelle, unterschiedliche Kraft-Weg-Kurven, die erst ab einer Verschiebung von ca. 10mm wieder vergleichbaren Verlaufscharakter annehmen.

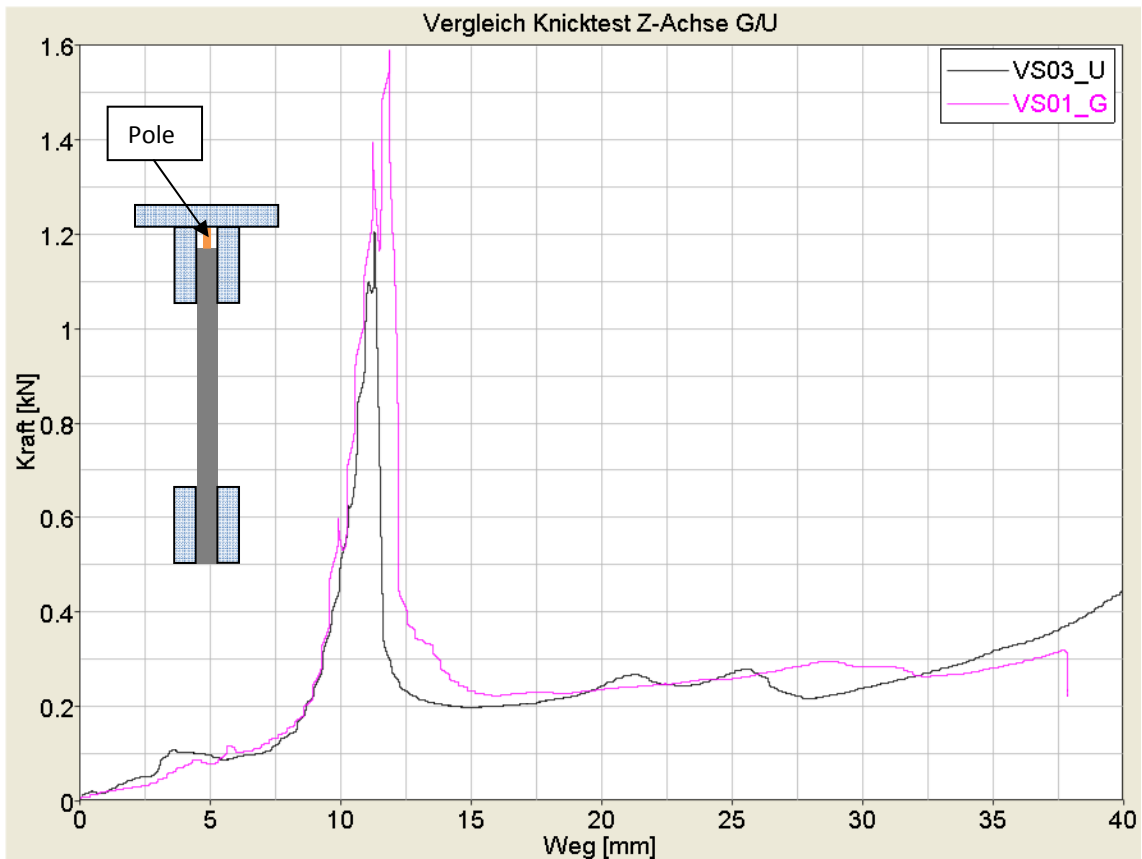
Knicktest Z-Achse geladen/ungeladen:

Abbildung 10-6 Vergleich Knicktest Z-Achse geladen/ungeladen

Beim Knicktest in Z-Richtung fällt sofort die gute Reproduzierbarkeit der Versuche auf. Der längere Weg bis zum Ausknicken der Zelle (fast 10mm) im Vergleich zu den Tests in X-Richtung kann durch den Umstand, dass die Pole vor Beginn des Versuchs nicht beschädigt werden sollten (verhindern eines frühzeitigen Kontakts der Pole mit der Gegenplatte), erklärt werden. Im Gegensatz zu den Ergebnissen der Tests in X-Richtung sind die Unregelmäßigkeiten beim Ausknicken der Batterie nicht so stark ausgeprägt.

Eindrückversuch Hemisphäre Y-Achse:

Abschließend zu den Versuchen wird im Folgenden auf den Test, bei dem ein Kurzschluss der Zelle aufgetreten ist, näher eingegangen. Der Versuchsaufbau sah wie folgt aus:

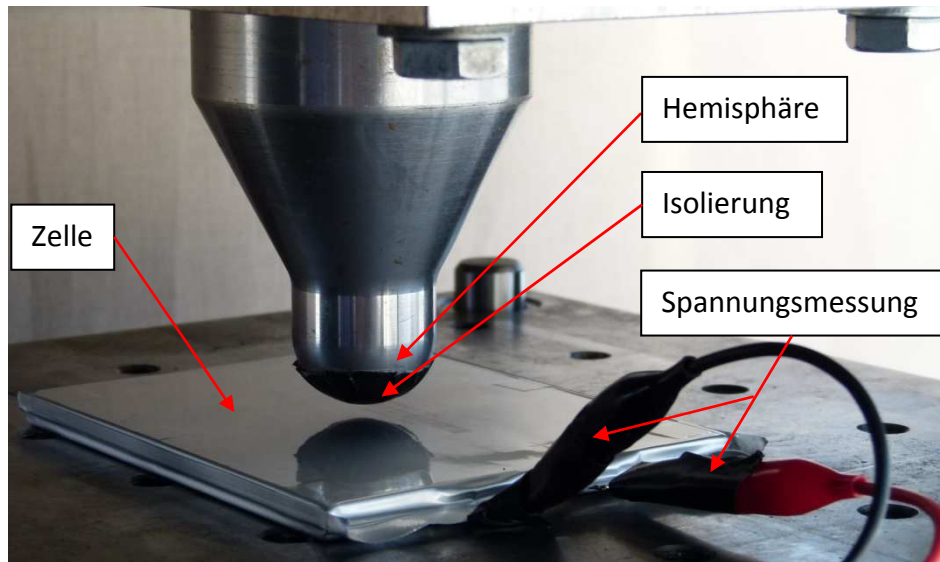


Abbildung 10-7 Hemisphärentest Y-Achse geladen

Die oben dargestellte Abbildung zeigt den Ausgangszustand vor dem Versuchsstart. Die Zelle wurde flach auf die Auflageplatte gelegt und mittig ausgerichtet. Um einen vorzeitigen Kurzschluss zwischen Hemisphäre und Zelle zu verhindern, wurde gleich wie bei den Impaktortests eine Isolierung angebracht. Auch die Pole, mit der in der Abbildung 10-7 eingezeichneten Spannungsmessung, wurden gegen einen verfrühten Spannungsabfall, der durch den Kontakt zwischen den Polen und der Auflageplatte eintreten könnte, geschützt. Die folgende Abbildung zeigt die Zelle nach dem Versuch:



Abbildung 10-8 Hemisphärentest Y-Achse geladen nach dem Versuch

Der Kurzschluss wurde durch die lokale Penetration der Stahlhalbkugel verursacht. Kurz nach Eintreten des Kurzschlusses „blähte“ sich die Zelle auf und gaste an einer Seite aus. Der zugehörige Kraft-Weg-Verlauf samt Spannungs-Weg-Verlauf ist in der Abbildung 10-9 dargestellt:

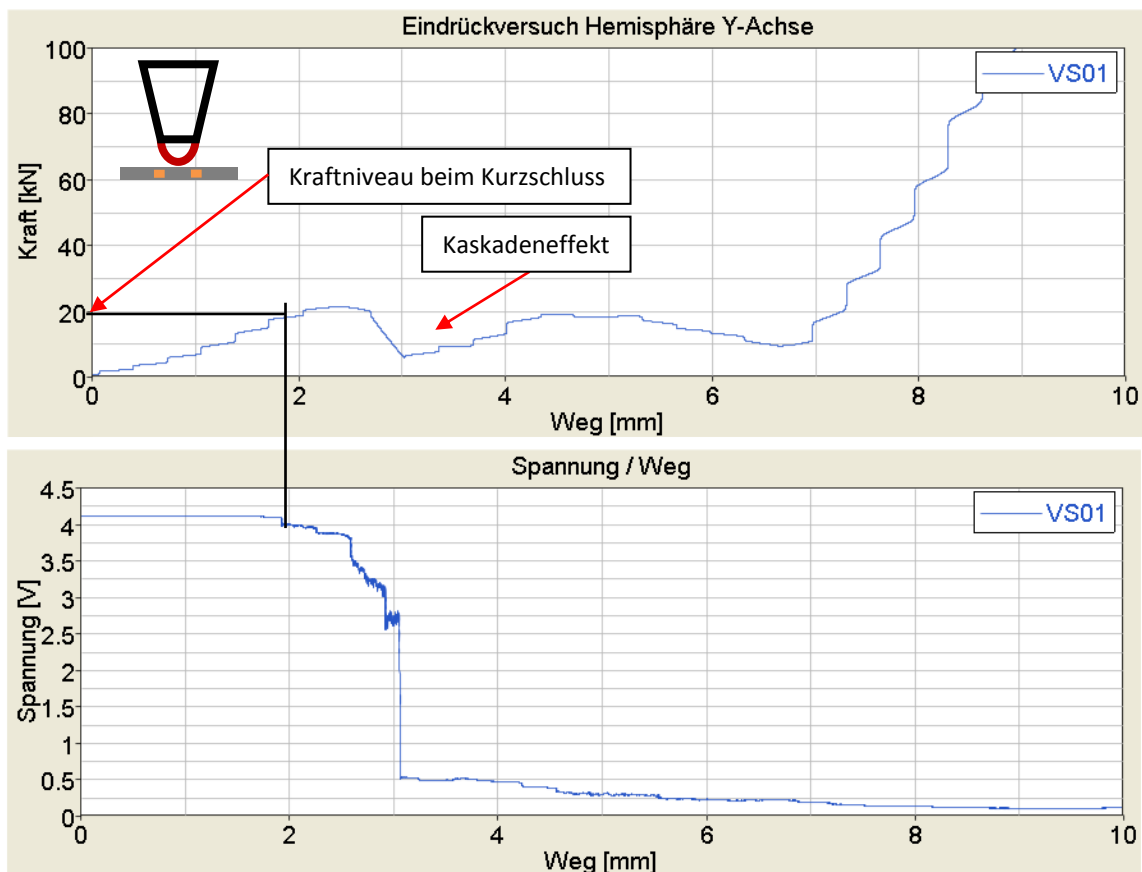


Abbildung 10-9 Versuchsdaten Hemisphärentest Y-Achse

In dieser Abbildung ist das Kraftniveau (ca. 20kN), bei dem der Kurzschluss auftritt, eingezeichnet. Ab diesem Zeitpunkt erfolgt ein „schleichender“ Kurzschluss der Zelle bis die Spannung nach ca. 3mm Verschiebung erneut drastisch sinkt und schließlich bis nahezu 0V abfällt. Die sinkende und folglich wieder steigende Kraft im Bereich von ca. 2 bis 7mm kann durch das Auftreten des Kaskadeneffektes begründet werden. Dieser Effekt konnte auch bei einem vergleichbaren Versuchsaufbau in der Literatur (16) vorgefunden werden.

11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1 Aufbau, Lade- und Entladereaktion einer Lithium-Ionen-Zelle (5)	5
Abbildung 2-2 Potenzielle Anodenmaterialien (8)	9
Abbildung 3-1 Elektrochemisches Modell eines Batteriemoduls (9)	12
Abbildung 3-2 Mikroskopischer Aufbau der Lithium-Polymer-Batterie.....	14
Abbildung 3-3 Vergleich: Vereinfachtes Simulationsmodell (links) mit Realzelle (rechts).....	16
Abbildung 4-1 Foto der untersuchten Zelle	18
Abbildung 4-2 Öffnen der Lithium-Ionen-Batterie	19
Abbildung 4-3 Aufbau der Zelle	20
Abbildung 4-4 Anordnung des Separators in der Zelle	20
Abbildung 4-5 Sortierung der Zelle nach Bestandteilen	21
Abbildung 4-6 Mikroskopie der Kathode	23
Abbildung 4-7 Mikroskopie der Anode	24
Abbildung 4-8 Mikroskopie des Separators	25
Abbildung 4-9 Mikroskopie der Hülle	26
Abbildung 4-10 Vergleich einer genormten Zugprobenform (links) und der verwendeten Geometrie (rechts)..	28
Abbildung 4-11 Pneumatisches Spannelement mit den verwendeten Spannbacken (10).....	29
Abbildung 4-12 Verwendete Zugprüfmaschine (11).....	30
Abbildung 4-13 Prüfaufbau Zugversuch.....	31
Abbildung 4-14 Probenherstellung durch Wasserstrahlschneiden.....	32
Abbildung 4-15 Schnittbild der Lithium-Polymer-Zelle	33
Abbildung 4-16 Mikroskopisches Schnittbild der Anode	33
Abbildung 4-17 Vergleich Zugversuch Anode längs/quer „trocken“	36
Abbildung 4-18 Vergleich Zugversuch Anode längs/quer „feucht“	37
Abbildung 4-19 Vergleich Zugversuch Anode „trocken“/„feucht“	38
Abbildung 4-20 Vergleich Anode Gummibacken/diamantbeschichtete Spannbacken	39
Abbildung 4-21 Vergleich Zugversuch Kathode längs/quer „feucht“	40
Abbildung 4-22 Vergleich Zugversuch Separator längs/quer „feucht“	41
Abbildung 4-23 Mikroskopische Aufnahme eines PP-Separators (14).....	42
Abbildung 4-24 Vergleich Zugversuch Pouch längs/quer diamantbeschichtete Spannbacken	43
Abbildung 4-25 Zugversuch Pouch: Resttragverhalten der Kunststoffolie	43
Abbildung 4-26 Versuchsanordnung Durchbiegung	45
Abbildung 4-27 Durchbiegungsversuch Anode	45
Abbildung 4-28 Durchbiegungsversuch Kathode.....	46
Abbildung 5-1 Keywordcard eines elastisch-plastischen Materials	48
Abbildung 5-2 Einfluss der Materialparameter auf den Kraft-Weg-Verlauf in der Simulation	49
Abbildung 5-3 Aufbau eines Faserverbundwerkstoffes in LS-Dyna (15).....	50
Abbildung 5-4 Simulationsmodell Zugversuch mit Randbedingungen	53

Abbildung 5-5 FE-Modell für die Abbildung der Durchbiegungsversuche	54
Abbildung 5-6 Vergleich Zugversuch/Simulation Anode	55
Abbildung 5-7 Versagen des Aktivmaterials Graphit	56
Abbildung 5-8 Rissbild Anode: Simulation (links), Versuch (rechts)	57
Abbildung 5-9 Vergleich Zugversuch/Simulation Kathode.....	58
Abbildung 5-10 Vergleich Zugversuch/Simulation Separator	59
Abbildung 5-11 Vergleich Zugversuch/Simulation Pouch	60
Abbildung 5-12 Resttrageverhalten FE-Modell (links) und Realversuch (rechts)	61
Abbildung 5-13 Durchbiegung der Anode in der Simulation	62
Abbildung 5-14 Durchbiegung der Kathode in der Simulation	63
Abbildung 6-1 Gesamtmodell der Lithium-Polymer-Zelle.....	64
Abbildung 6-2 Schrittweiser Aufbau von der Einzelkomponente zum Gesamtmodell.....	65
Abbildung 6-3 Lagenaufbau der Zelle (linkes Bild) und Funktionsweise der „Tied-Kontaktkarte“ (rechtes Bild) .	67
Abbildung 6-4 Lagenaufbau der Zelle (linkes Bild) und Einbaulage der Solidkomponente (rechtes Bild)	69
Abbildung 7-1 Prüfmatrix ungeladen	72
Abbildung 7-2 Prüfmatrix geladen	73
Abbildung 7-3 Prüfstand Werkstattpresse ERBA 5 mit der verwendeten Messtechnik	74
Abbildung 7-4 Prinzipversuch Knicktest X-Achse	74
Abbildung 7-5 Deformierung der Zelle nach dem Knicktest X-Achse	75
Abbildung 7-6 Kraft-Weg-Verlauf Knicktest X-Achse	75
Abbildung 7-7 Prüfstand PRESTO 420	77
Abbildung 7-8 Messtechnik PRESTO 420	78
Abbildung 7-9 Prüfbedingungen 3-Punkt-Biegeversuch (freie Länge=längste Abmessung).....	79
Abbildung 7-10 Prüfbedingungen 3-Punkt-Biegeversuch (freie Länge=Breite)	79
Abbildung 7-11 Prüfbedingungen Impaktortest Z-Achse.....	80
Abbildung 7-12 Prüfbedingungen Impaktortest X-Achse	80
Abbildung 7-13 Prüfbedingungen Knicktest Z-Achse (linkes Bild) und X-Achse (rechtes Bild)	81
Abbildung 7-14 Prüfbedingungen Hemisphärentest	81
Abbildung 7-15 3-Punkt-Biegeversuch ohne Pouch (freie Länge=längste Abmessung vs. freie Länge= Breite)...	82
Abbildung 7-16 3-Punkt-Biegeversuch ohne Pouch (freie Länge=Breite).....	83
Abbildung 7-17 Vergleich 3-Punkt-Biegeversuch mit und ohne Pouch (freie Länge=längste Abmessung)	84
Abbildung 7-18 Realversuch 3-Punkt-Biegung mit und ohne Pouch (freie Länge=längste Abmessung)	85
Abbildung 7-19 Vergleich 3-Punkt-Biegung mit Pouch geladen/ungeladen (freie Länge=längste Abmessung)...	86
Abbildung 7-20 Vergleich Realversuch 3-Punkt-Biegung ohne Pouch (freie Länge=längste Abmessung)/Simulation (rechts)	89
Abbildung 7-21 Gegenüberstellung Versuchskurven 3-Punkt-Biegung ohne Pouch (freie Länge=längste Abmessung)/Simulationsdaten.....	90
Abbildung 7-22 Vergleich Realversuch 3-Punkt-Biegung mit Pouch (freie Länge=längste Abmessung)/Simulation	91

Abbildung 7-23 Gegenüberstellung Versuchskurven 3-Punkt-Biegung mit Pouch (freie Länge=längste Abmessung)/Simulationsdaten.....	92
Abbildung 7-24 Vergleich Realversuch Knicktest X-Achse/Simulation	93
Abbildung 7-25 Gegenüberstellung Versuchskurven Knicktest X-Achse/Simulationsdaten.....	94
Abbildung 7-26 Vergleich Realversuch Impaktortest X-Achse/Simulation	96
Abbildung 7-27 Gegenüberstellung Versuchskurven Impaktortest X-Achse/Simulationsdaten	97
Abbildung 10-1 Vergleich 3-Punkt-Biegeversuch mit und ohne Pouch (freie Länge=Breite)	100
Abbildung 10-2 Vergleich 3-Punkt-Biegeversuch mit Pouch geladen/ungeladen (freie Länge=Breite).....	101
Abbildung 10-3 Vergleich Impaktortest X-Achse geladen/ungeladen	102
Abbildung 10-4 Vergleich Impaktortest Z-Achse geladen/ungeladen	103
Abbildung 10-5 Vergleich Knicktest X-Achse geladen/ungeladen	104
Abbildung 10-6 Vergleich Knicktest Z-Achse geladen/ungeladen.....	105
Abbildung 10-7 Hemisphärentest Y-Achse geladen.....	106
Abbildung 10-8 Hemisphärentest Y-Achse geladen nach dem Versuch	106
Abbildung 10-9 Versuchsdaten Hemisphärentest Y-Achse.....	107

12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1 Speichersysteme (2)	3
Tabelle 4-1 Datenblatt der verwendeten Zelle (6).....	18
Tabelle 4-2 Ergebnisse der Batteriezurlegung	21
Tabelle 4-3 Vermessungsprotokoll Kathode	23
Tabelle 4-4 Vermessungsprotokoll Anode	24
Tabelle 4-5 Prüfbedingungen Zugversuch.....	34
Tabelle 5-1 Verwendete Materialkarten für die Simulation der Einzelkomponenten.....	52
Tabelle 7-1 Eckdaten Prüfstand PRESTO 420	77

13 Literaturverzeichnis

1. **Knauder, Christoph.** *Entwicklung einer Prüfumgebung zur Untersuchung der mechanischen Eigenschaften von lithiumbasierenden Batterien.* Graz : Technische Universität Graz, 2012.
2. **Henning Wallentowitz, Arndt Freialdenhoven, Ingo Olschewski.** *Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges.* Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 2010. S. 71-114.
3. <http://www.elektroauto-fahren.com/saft-batteries.html>. [Online] [Zitat vom: 17. 03 2012.]
4. **Crastan, Valentin.** *Elektrische Energieversorgung 2.* Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2012. S. 467-487.
5. http://www.tvt.uni-karlsruhe.de/21_984.php. [Online] [Zitat vom: 27. 02 2012.]
6. <http://www.amitatech.com/product-Li-Polymer.htm>. [Online] [Zitat vom: 02. 03 2012.]
7. **BaSyTec GmbH, Andreas Jossen, René Groß.** *Sicherheitsaspekte beim Testen von Lithium-Ionen Batterien.* 2010. Beitrag auf dem Entwicklerforum Batterien und Ladekonzept am 24. Februar 2010 in München.
8. **B. Ketterer, U. Karl, D. Möst, S.Ulrich.** *Lithium-Ionen-Batterien: Stand der Technik und Anwendungspotenzial in Hybrid-, Plug-In Hybrid- und Elektrofahrzeugen.* Karlsruhe : Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 2009.
9. <http://www.comsol.de/press/news/article/765/>. [Online] [Zitat vom: 06. 03 2012.]
10. <http://www.grip.de/>. [Online] [Zitat vom: 08. 03 2012.]
11. <http://www.testmatic.de/>. [Online] [Zitat vom: 08. 03 2012.]
12. **Feist, Florian.** *Safety of Electric Traction Vehicles.* Institut für Fahrzeugsicherheit. 2011.
13. **Sheidaei, Azadeh, et al.** *Mechanical Characterization of a Lithium Ion Battery Separator using a Dynamic Mechanical Analyzer.* s.l. : SAE International, 2011.
14. <http://www.celgard.com/monolayer-pp.aspx>. [Online] [Zitat vom: 09. 03 2012.]
15. **Graf, Tobias und Hartmann, Stefan.** *Modeling Composite Materials in LS-Dyna.* Stuttgart : s.n., 2010.
16. **Elham Sahraei, Rich Hill, Tomasz Wierzbicki.** *Calibration and finite element simulation of pouch lithium-ion batteries for mechanical integrity.* Massachusetts : Massachusetts Institute of Technology, 2011.

17. **Xue, Liang, Zhongqin, Lin und Zhengxu, Jiang.** *Effects of Initial Geometrical Imperfection on Square Tube Collapse.* 2000. Proceedings of the 6th International LS-DYNA user's conference, June 2000, Detroit, MI, USA.