

Christoph Breitfuß

Fahrzeugsicherheit von Elektrobussen

Analyse der Crashesicherheit und der Implementierung einer Lithium-Ionen-Polymer-Batterie

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

Durchgeführt am Institut für Fahrzeugsicherheit
TU-Graz Dekanat für Maschinenbau

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

Betreuer: Dipl.-Ing. Dr. techn. Jürgen Gugler

Graz, Oktober 2010

Inhalt

Inhalt.....	2
Eidesstattliche Erklärung	5
Danksagung	6
Liste der verwendeten Abkürzungen, Formelzeichen und Einheiten	7
Abstrakt	9
Abstract	10
1 Einleitung.....	11
2 Lithium-Batterien.....	12
2.1 Allgemeines über Lithium-Ionen-Batterien.....	12
2.2 Bauarten von Lithium-Ionen-Batterien	13
2.3 Lithium-Polymer-Batterien	13
2.4 Lithium-Ionen-Polymer-Batterien	14
2.5 Funktionsweise und Aufbau von Lithium-Ionen-Batterien	14
2.6 Sicherheitsrisiken von Lithium-Ionen-Batterien	15
2.7 Löschen von brennenden Lithium-Ionen-Batterien	16
2.8 Testvorschriften und Sicherheitslinien für Lithium-Ionen-Batterien	17
2.9 FreedomCAR Electrical Energy Storage System Abuse Test Manual for Electric and Hybrid Electric Vehicle Applications.....	18
2.9.1 Versuchsbedingungen	18
2.9.2 Testbewertung	19
2.9.3 Übersicht über die Tests.....	20
2.9.4 Mechanische Tests:	20
2.10 Verwendete Lithium-Ionen-Zellen	23
2.10.1 Technische Daten	23
2.10.2 Abmessungen	24
2.10.3 Vom Hersteller durchgeführte Zellentests	25
3 Aufgabenstellung.....	27
4 Mögliche Crashesicherheitsmaßnahmen für Lithium-Ionen-Batterien	28
4.1 Zentrale Einbaulage	28
4.2 Stabil gekapselte Batterie	30
4.3 Adaptierungen im batterieumgebenden Raum	31
4.4 Crashesensoren für die Batteriekontaktunterbrechung.....	32
4.5 Hitzeschild	33
4.6 Zusammenfassung der Crashesicherheitsmaßnahmen	33
5 Konzeptfindung Batterieposition und Batteriewechselsystem	34
5.1 Batterieposition.....	34
5.1.1 Batterie im Fahrzeuginnenraum	34

5.1.2	Batterie am Fahrzeugdach	34
5.1.3	Batterie im Fahrzeugheck.....	35
5.1.4	Nachlaufbatterie	36
5.1.5	Batterie im ehemaligen Motorraum	36
5.1.6	Einbau unter dem Niederflurboden	37
5.1.7	Bewertung der Einbaumöglichkeiten	37
5.2	Batteriewechselsystem	38
5.2.1	Wechsel von der Unterseite.....	39
5.2.2	Wechsel von der Seite	40
5.2.3	Wechsel von schräg unten mittels Kipplade	41
5.2.4	Bewertung der Wechselsysteme.....	42
6	Prinzipanalyse Konzept 1 Batterie im ehemaligen Motorraum.....	43
6.1	Konzeptphase Batterie im ehemaligen Motorraum	43
6.1.1	3D-Scan des Iveco Fahrgestells	43
6.1.2	Ausmessen des Bauraums.....	44
6.1.3	Bau eines Batterie-Mock-Up	44
6.2	Geplante Lastfälle für die Simulationen des Gesamtmodells	45
6.2.1	Lastfall I: Frontal Impact.....	45
6.2.2	Lastfall II: Car to Car Crash	46
6.2.3	Lastfall III: Side Impact.....	47
6.3	Abstraktes Batteriemodell	47
6.3.1	Hauptbestandteile des FE-Modells	48
6.3.2	Details Modellierung Batteriemodell	50
6.4	Simulierte Lastfälle am Batteriemodell.....	53
6.4.1	Simulationsreihe I Mechanische Schocktests.....	53
6.4.2	Simulationsreihe II Drop Tests	54
6.5	Abstraktes Fahrzeugmodell	55
6.5.1	Hauptbestandteile des FE-Modells	57
6.5.2	Details Modellierung Fahrzeugmodell	58
6.6	Integration des Batteriemodells in das Fahrzeugmodell	61
6.7	Kontakte im Gesamtmodell	62
6.8	Simulierte Lastfälle am Gesamtmodell	63
6.8.1	Kriterien bei den Simulationsergebnissen für das Gesamtmodell	63
6.8.2	Simulationsergebnisse für das Gesamtmodell	63
6.9	Plausibilisierung der FE-Ergebnisse.....	64
6.10	Lösungsvorschläge aufgrund der FE-Ergebnisse	65
6.11	Bewertung der Einbaulage im Motorraum	66
7	Analyse Konzept 2 Batterie unter dem Niederflurboden	67
7.1	Abstraktes Batteriemodell	67

7.1.1	Hauptbestandteile des FE-Batteriemodells.....	68
7.1.2	Details Modellierung	69
7.2	Abstrakte Batteriehalterungen	82
7.2.1	Hauptbestandteile des FE-Modells der Krafteinleitungen	83
7.2.2	Details Modellierung der Krafteinleitungen.....	83
7.3	Kontakte.....	86
7.4	Simulationen der Niederflurbodenbatterie	87
7.4.1	Beschreibung des gewählten Pulses	87
7.4.2	Simulationsmatrix	89
7.4.3	Nötige Verbesserungen in der Konstruktion.....	89
7.4.4	Simulationsergebnisse Beschleunigungspuls Niederflurbatterie.....	91
7.4.5	Simulationsergebnisse Ausgasen der Module	96
8	Zellenversuche - Mechanischer Schock	98
8.1	Vorbereitungen	99
8.2	Durchgeführte Versuche	100
8.2.1	Einzelzelle Längsrichtung	101
8.2.2	Einzelzelle Querrichtung	102
8.2.3	Zwölferpaket Längsrichtung.....	103
8.2.4	Zwölferpaket Querrichtung.....	104
8.2.5	Modul Längsrichtung.....	105
8.2.6	Modul Querrichtung.....	106
9	Weiterer Versuch und Verfassen einer Publikation	107
9.1	Penetration einer Zelle.....	107
9.2	Verfassen einer Publikation	107
10	Zusammenfassung der Ergebnisse	108
10.1	Frontinstallation der Batterie.....	108
10.2	Installation unter dem Niederflurboden	108
10.3	Experimentelles Testen.....	109
10.4	Resume	109
11	Ausblick.....	110
12	Abbildungsverzeichnis	111
13	Tabellenverzeichnis	115
14	Literaturverzeichnis	116
Anhang:		117
Verwendete Software und Hardware		118
Publikation für die ICRASH Konferenz		119
Aufbau eines Batteriemoduls.....		131

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

Ich bedanke mich bei meinem Betreuer Dr. Jürgen Gugler für die vielen Hilfestellungen, richtungsweisenden Ratschläge und die Unterstützung vor und während der Durchführung meiner Diplomarbeit.

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

Weiters danke ich allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Fahrzeugsicherheit für die gute Zusammenarbeit und das angenehme Arbeitsklima. Ganz besonders danke ich hier Dr. Wolfgang Sinz, der mir die Anwendung der Softwareprogramme Ls-Dyna und HyperWorks beigebracht hat, und mir bei weiterführenden Fragen zur Verfügung stand.

Danke an Dr. Jürgen Gugler, Dr. Wolfgang Sinz., Kathi und Petra für das Korrekturlesen meiner Arbeit.

Nicht zuletzt danke ich meinen Eltern dafür, dass sie mir ein Studium ermöglicht haben und mich dabei immer unterstützt haben.

Liste der verwendeten Abkürzungen, Formelzeichen und Einheiten

Acc	Acceleration (Beschleunigung)
Ah	Amperestunde (elektrische Ladung)
AIT	Austrian Institute of Technology
BEV	Battery Electric Vehicle
CAD	Computer Added Design
cm/s	Zentimeter pro Sekunde
cm	Zentimeter
Co	Kobalt
DOD	Depth of Discharge
DSD	Dr. Steffan Datentechnik
ECE	Economic Commission for Europe
EESS	Electrical Energy Storage System
EIG	Energy Innovation Group
EUCAR	European Council for Automotive Research & Development
FE	Finite Elemente
FMVSS	Federal Motor Vehicle Safety Standard
g	Gramm (Masse)
$G = 9.81 \text{ m/s}^2$	Fallbeschleunigung an der Erdoberfläche
h	Höhe
HEV	Hybrid Electric Vehicle
K	Kelvin (Temperatur)
KERI	Korea Elektrotechnology Research Institute
kg	Kilogramm (Masse)
kHz	Kilohertz (Frequenz)
kN	Kilonewton (Kraft)
Li^+	Lithiumkationen
LiMO_2	Lithium-M-Oxid; das M steht für Co, Ni oder Ma
m/s	Meter pro Sekunde (Geschwindigkeit)
m/s^2	Meter pro Sekundenquadrat (Beschleunigung)
m	Masse
m	Meter (Länge)
m^3	Kubikmeter (Volumen)
Ma	Mangan
mL/Ah	Milliliter pro Amperestunde (Austretendes Normvolumen pro elektrischer Ladung)
mm	Millimeter (Länge)
mm^2	Quadratmillimeter Fläche
mm^3	Kubikmillimeter (Volumen)
MMP	Massively Parallel Processing

Abkürzungen und Einheiten

ms	Millisekunden (Zeit)
mΩ	Megaohm (elektrischer Widerstand)
N/mm ²	Newton pro Quadratmillimeter (Spannung, E-Modul)
N	Newton (Kraft)
NCAP	New Car Assessment Program
Ni	Nickel
PC	Polykarbonat
PHEV	Plug-In Hybrid Electric Vehicle
PTC	Positive Temperature Coefficient
R _{p0,2}	0,2%-Dehngrenze
SOC	State of Charge
t/mm ³	Tonnen pro Kubikmillimeter (Dichte) entspricht 10 ¹² kg/m ³
t	Tonnen (Masse)
UN	United Nations
V	Volt (elektrische Spannung)
V	Volumen
VSI	Vehicle Safety Institute
Wh/kg	Wattstunde pro Kilogramm (Energiedichte)
Wh/L	Wattstunde pro Liter (Energiedichte)

Abstrakt

Ausgehend von Hybridfahrzeugen wandert der Fokus in den letzten Jahren immer mehr auf reine Elektrofahrzeuge. Dadurch wird die Forschung im Bereich der Sicherheit von rein elektrisch betriebenen Fahrzeugen immer wichtiger. Die vorliegende Diplomarbeit behandelt ein neuartiges Konzept für einen Elektro-Bus mit besonderer Betrachtung der crashsicheren Integration von wechselbaren Batterien.

Der Elektro-Bus wird zu Erprobungszwecken im regulären Linienverkehr eingesetzt. Ein Fahrprofil wurde ausgewertet und Szenarien für Crashrisiken wurden definiert. Unter Beachtung der relevanten Sicherheitsmaßnahmen und der existierenden Testvorschläge für Fahrzeugbatterien wurden die Hauptfaktoren für eine crashsichere Integration der Lithium-Ionen-Polymer-Batterie abgeleitet.

Der ganztägige Einsatz eines Stadtbusses und der Zielkonflikt zwischen Batteriegewicht und möglicher Nutzlast erfordern ein Batteriewechselsystem. Bis zu drei Ladezyklen sind nötig, um die Energie für einen gesamten Tag bereit zu stellen.

Die Batterie muss an einer sicheren und dennoch einfach erreichbaren Stelle platziert werden. Zusätzlich ist bei Niederflurfahrzeugen die Bodenfreiheit zu gewährleisten, damit ein barrierefreier Zugang weiterhin bestehen bleibt.

Aus diesen Gründen wurden zwei Ansätze genauer analysiert: Im ersten Ansatz wird die Batterie im ehemaligen Motorraum untergebracht, im zweiten wird die Batterie im Unterboden der Niederflurkonstruktion positioniert.

Die Analyse des ersten Ansatzes (Batterieplatzierung im Frontbereich) zeigte die Notwendigkeit der Verstärkung des Frontbereichs, um genügend Sicherheit für Frontunfälle zu garantieren. Das Konzept des zweiten Ansatzes (Batterieplatzierung im Unterboden) ist zwar sicherheitstechnisch weniger bedenklich, benötigt aber eine flache Batterie. Für den letzteren Ansatz wurde dafür ein Gehäuse konstruiert und Crashanalysen durchgeführt.

Bei experimentellen Tests wurde die Stabilität der verwendeten Lithium-Ionen-Zellen und ganzer Module unter Crashbedingungen überprüft.

Die crashsichere Batterie findet in zwei Elektro-Bussen unterschiedlicher Größe Anwendung. Die Fahrzeuge werden im Feldtest einer zweijährigen Testperiode unterzogen.

Abstract

Research on the safety of fully electric vehicles becomes more and more important in recent years. Starting from the safety aspects of hybrid vehicles, more and more focus is placed on fully electric vehicles. This diploma thesis focuses on a novel concept for a fully electric city bus and in particular on the crashworthy integration of changeable batteries.

The fully electric city bus under study is operated in regular service. The driving profile was evaluated and scenarios for crash hazards were defined. Considering most recent safety measures and draft test procedures the main issues for a crashworthy integration of the battery were derived.

The steady operation of the city buses all over the day requires a changeable battery system as well as a trade-off between battery weight and payload. Up to three reloading cycles are used to provide the energy for the all day operation.

The changeable battery pack had to be located at an easily accessible and safe position, while still providing the ground-clearance of a low-floor vehicle for easy access and space for a wheelchair. Therefore two approaches were analyzed in greater detail. One having the battery in the front area ahead of the firewall and a second concept having the battery pack located under floor.

Analysis of the frontal battery location calls for reinforcements in order to guarantee sufficient safety in frontal impacts. The position under the floor is less critical but requires a slim battery compartment for a low-floor vehicle. Since the latter being the more promising concept, the housing was designed and crash analysis performed for the under-floor approach.

Experimental testing focused on the stability of the selected lithium-ion cells under crash conditions as well as battery modules.

Two different sizes of fully electric city buses were built using the crashworthy battery integration. The two vehicles run for a two year period in a field operational test.

1 Einleitung

Hintergrund

Das Österreichische Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT) fördert mit Hilfe des A3plus Programms Forschungs- und Entwicklungsvorhaben im Bereich innovativer Antriebstechnologien und alternativer Kraftstoffe [1]. Ziel ist es, den Verkehr der Zukunft energieeffizienter und umweltfreundlicher zu gestalten.

Die vorliegende Diplomarbeit ist Teil des im Rahmen des A3plus Programms geförderten Projekts „Klimamobil – 0-Emissionsfahrzeuge im öffentlichen Nahverkehr“.

Beschreibung

Im Zuge des Projekts „Klimamobil – 0-Emissionsfahrzeuge im öffentlichen Nahverkehr“ werden zwei Elektrobusse für den Linienbetrieb in den Marktgemeinden Perchtoldsdorf in Niederösterreich bzw. Hornstein im Burgenland konstruiert und gebaut. Der kleinere Bus (Bürgerbus) hat ein zulässiges Gesamtgewicht von 3,5 Tonnen und wird von der Gemeinde Hornstein eingesetzt. Der größere Bus hat ein zulässiges Gesamtgewicht von 7,2 Tonnen und wird von der Gemeinde Perchtoldsdorf verwendet.

In der vorliegenden Diplomarbeit wird die crashtechnische Untersuchung der mit einem Wechselsystem im Fahrzeug befestigten Lithium-Ionen-Polymer-Batterie behandelt.

Durchführung

Die Diplomarbeit umfasst folgende Arbeitspakete:

- Recherche über gängige Sicherheitsrichtlinien von Lithium-Ionen-Batterien und aktuelle Safety-Maßnahmen bei Hybrid- bzw. Elektrofahrzeugen
- Unterstützung des Projektpartners Austrian Institute of Technology bei der Konstruktion der Batterie
- Erstellung eines abstrakten Batteriemodells für die Simulation
- Wahl geeigneter Schutzmaßnahmen für die Batterie
- Überprüfung der Konstruktion virtuell und experimentell
- Weiterführende Versuche

2 Lithium-Batterien

In diesem Kapitel werden ausschließlich Sekundärbatterien behandelt, welche durch ihre Wiederaufladbarkeit gekennzeichnet sind. Primärbatterien sind nicht aufladbar und daher für den Einsatz als Antriebsenergiespeicher bei Fahrzeugen ungeeignet.

2.1 Allgemeines über Lithium-Ionen-Batterien

Das folgende Kapitel ist inhaltlich [2] entnommen: „Lithium ist das leichteste Metall, hat das größte elektrochemische Potenzial und liefert die größte Energiedichte pro Gewichtseinheit.“ [2]. Sony brachte 1991 die erste Lithium-Ionen-Batterie auf den Markt.

Die Vorteile der Lithium-Ionen-Batterie gegenüber anderen Batterien (Blei-Akkus, Nickel-Cadmium- und Nickel-Metallhydrid-Batterien), sind unter anderem die hohe Energiedichte und die im Vergleich zu anderen Batterien geringe Selbstentladung. Außerdem kann bei diesem Batterietypus kein Memoryeffekt entstehen. Dieser Effekt ist das scheinbare Merken der tatsächlich benötigten Energiemenge. Dadurch lässt sich die Batterie nur mehr bis zu diesem Energieniveau aufladen. Nachteile der Lithium-Ionen-Batterie sind unter anderem die hohen Herstellungskosten, die Notwendigkeit einer Schutzschaltung zur Begrenzung von Spannung und Strom sowie Alterung. Nicht zu vernachlässigen sind auch die Risiken, die durch eine Beschädigung und die daraus resultierenden Kurzschlüsse entstehen. Letzteres stellt vor allem bei der Nutzung als Energiespeicher in Fahrzeugen ein Problem dar, da im Falle eines Verkehrsunfalls hohe Beschleunigungen und dadurch hohe Kräfte auf die Batterie wirken. Auch Intrusionen können zum Kurzschluss führen.

Lithium-Ionen-Batterien sind eine relativ junge Technologie und weisen ein sehr hohes Entwicklungspotential auf. Deshalb ist es den Herstellern möglich, in regelmäßigen Abständen neue verbesserte Typen auf den Markt zu bringen. Zu Alterung bzw. Lebensdauer ist jedoch noch wenig bis keine Information vorhanden.

2.2 Bauarten von Lithium-Ionen-Batterien

Die Unterscheidung von Lithium-Ionen-Zellen ist möglich hinsichtlich:

- **Aufladbarkeit**
 - Primärbatterie
 - Sekundärbatterie
- **Chemischen Aufbaus**
 - Elektrolyt
 - Flüssig
 - Fest
 - Gel
 - Anodenmaterial
 - Kathodenmaterial
- **Bauform**
 - Zylindrische Zelle
 - Prismatische Zelle
 - Pouch Zelle
- **Herstellungsebene**
 - Zelle: kleinste Einheit
 - Modul: mehrere Zellen miteinander verschaltet inklusive Steuerelektronik
 - Pack: mehre Module zur Batterie verschaltet

2.3 Lithium-Polymer-Batterien

Das folgende Kapitel ist inhaltlich [2] entnommen: Der Unterschied von Lithium-Polymer-Batterien zu konventionellen Lithium-Ionen-Batterien besteht im Elektrolyten. Bei Lithium-Polymer-Batterien ist der Elektrolyt fest. Er ist elektrisch nicht leitend, gestattet aber einen Ionenaustausch und ersetzt ein mit Elektrolyt gesättigtes poröses Trennelement. Dieser feste Polymerelektrolyt bietet zwar Vorteile in Bezug auf die Herstellung und die Sicherheit bzw. Robustheit, jedoch ist die Ionenleitfähigkeit bei Raumtemperatur beschränkt.

2.4 Lithium-Ionen-Polymer-Batterien

Das folgende Kapitel ist inhaltlich [2] entnommen: Bei der Lithium-Ionen-Polymer-Batterie werden zusätzlich zum festen Polymerelektrolyten noch Gelelektrolyte hinzugefügt. Auch hier ersetzt ein fester Elektrolyt das poröse Trennelement. Der Gelelektrolyt dient der Verbesserung der Ionenleitfähigkeit.

Die Vorteile gegenüber konventionellen Lithium-Ionen-Batterien sind unter anderem der flexible Formfaktor, die höhere Sicherheit und die leichtere Bauweise. Nachteile sind zum Beispiel höhere Herstellungskosten, kleinere Energiedichte und kürzere Lebensdauer. In diesem Projekt wurden Lithium-Ionen-Polymer-Zellen verwendet.

In Abbildung 2-1 sieht man eine geöffnete Lithium-Ionen-Polymerzelle. Man erkennt die Elektroden und den Festelektrolyten getränkt mit dem Gelelektrolyten.



Abbildung 2-1: Geöffnete Lithium-Ionen-Polymerzelle

2.5 Funktionsweise und Aufbau von Lithium-Ionen-Batterien

Das folgende Kapitel ist inhaltlich [3] entnommen: Die negative Aktivmasse (Anode) besteht nicht aus metallischem Lithium sondern aus Li^+ -Einlagerungsverbindungen wie zum Beispiel aus lamellaren Kohlenstoffen, Übergangsmetalloxiden oder mit Lithium legierenden Metallen, die reversibel Li^+ -Ionen aufnehmen bzw. abgeben können.

Die positive Aktivmasse (Kathode) besteht in den verbreiteten Zellen aus LiMO_2 , wobei das M für Kobalt, Nickel oder Mangan steht.

In Abbildung 2-2 sind die Anoden-, Kathoden- und die gesamte Zellreaktion für den Lade- und Entladevorgang einer gängigen Zelle dargestellt. Bei der Entladung entstehen an der Anode aus einer Kohlenstoff-Lithium-Einlagerungsverbindung Kohlenstoff, Lithium-Kationen und Elektronen. An der Kathode werden die Lithium-Kationen und die Elektronen vom Lithium-Metall-Oxid gebunden. Bei der Zellreaktion entstehen aus Lithium-Metall-Oxid und einer Kohlenstoff-Lithium-Einlagerungsverbindung Lithium-Metalloxid und Kohlenstoff. Beim Ladevorgang wird anstatt des Verbrauchers eine Stromquelle an die elektrischen Kontakte angeschlossen. Die chemischen Reaktionsgleichungen drehen sich nun um und laufen in die Gegenrichtung ab.

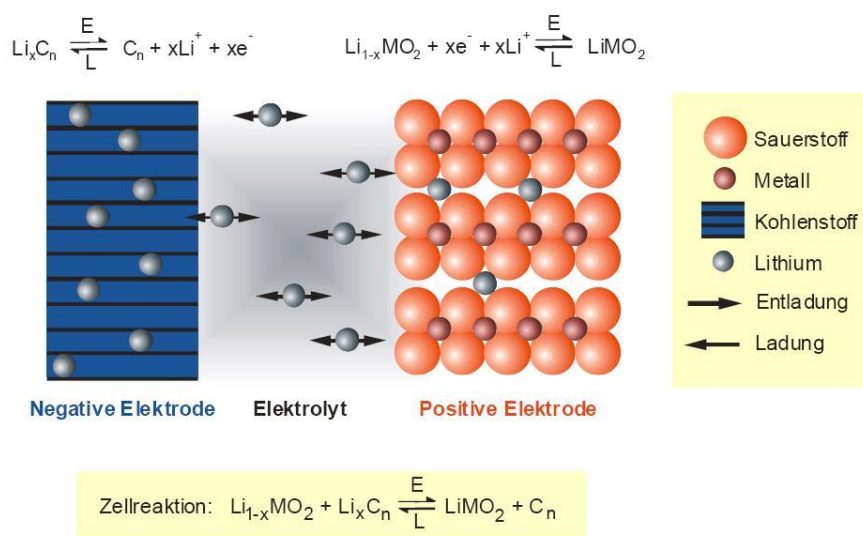


Abbildung 2-2: Prinzip der Entlade- und Ladereaktionen in Lithium-Ionen-Zellen [3]

2.6 Sicherheitsrisiken von Lithium-Ionen-Batterien

Das folgende Kapitel ist inhaltlich [3] entnommen: Die Gefahr, die von einer Lithium-Ionen-Batterie ausgeht, ist proportional zur Energiedichte und zur chemischen Reaktivität der verwendeten Komponenten. Neben dem elektrischen Verhalten ist auch die Reaktion auf Feuer, Hitze und mechanische Gewalteinwirkung von wesentlicher Bedeutung für die Batteriesicherheit.

Die Elektroden sind nur durch eine passivierende Oberflächenschicht gegen eine exotherme Reaktion mit dem leicht entzündlichen Elektrolyten geschützt. Eine Zerstörung dieser Oberflächenschicht zum Beispiel durch Überladung bzw. Überentladung muss in jedem Fall mittels elektronischer Überwachung verhindert werden. Auch durch mechanischen Einfluss kann diese Schutzschicht zerstört werden. Darum sind weitere Sicherheitsmaßnahmen wie

ein Sicherheitsventil und eine PTC-Keramik verbaut. Das Sicherheitsventil öffnet bei einem eventuellen Gasüberdruck in der Zelle den äußeren Leiterkreis und die PTC-Keramik erhöht den Widerstand bei Temperaturerhöhung bis ins Unendliche. Im Extremfall kommt es aber immer auf die Sicherheit der Einzelzelle an.

Je größer eine Batterie ist, desto höher wird auch der benötigte Sicherheitsaufwand. Dabei kommen auch chemische Sicherungen zum Einsatz wie zum Beispiel im Falle thermischer Überbelastung polymerisierende Elektrolyte, überlade- und überentladefeste Elektrodenmaterialien und brandhemmende Elektrolyte.

2.7 Löschen von brennenden Lithium-Ionen-Batterien

Der folgende Absatz ist inhaltlich [4] entnommen: Die Brennbedingungen lauten Wärme- bzw. Zündquelle, Sauerstoff und Brennstoff. Diese drei Komponenten bilden das Feuerdreieck. Entfernt man einen dieser drei Teile kann das Feuer nicht brennen und erlischt. Eine Art erweitertes Feuerdreieck, den Feuertetraeder, erhält man, wenn man als vierte Bedingung die ungehinderte Kettenreaktion hinzufügt (Abbildung 2-3).

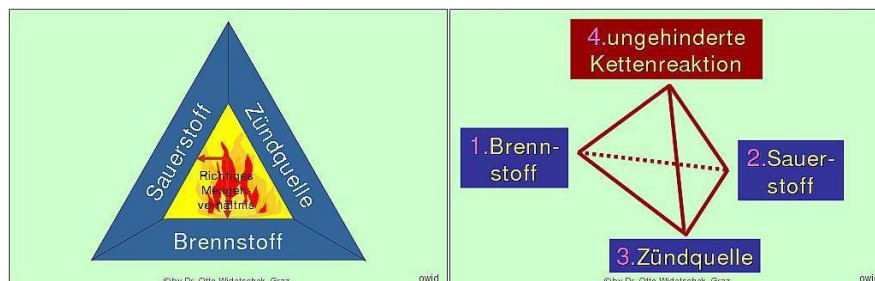


Abbildung 2-3: Feuerdreieck und Feuertetraeder [5]

Die Expertenmeinungen zur Löschung von brennenden Lithium-Ionen-Zellen, gehen weit auseinander. Fest steht jedoch, dass es auf keinen Fall möglich ist, der Verbrennung den Sauerstoff zu entziehen, da die brennende Zelle den Sauerstoff durch die eigene chemische Zersetzung selbst erzeugen kann.

Wenn möglich sollte der sogenannte Thermal Runaway verhindert, gestoppt oder zumindest abgeschwächt werden. Der Thermal Runaway ist die selbstständige Beschleunigung einer exothermen Kettenreaktion durch ihre eigene Erwärmung. Dabei kann es zur Ansteckung zwischen neben- oder aneinander liegenden Zellen kommen. Es wird immer wieder von

Zellen berichtet, die nach Tests äußerlich unbeschädigt waren und sich erst nach einiger Zeit selbst entzündeten – bei denen also der Thermal Runaway erst nach einer unauffälligen Anlaufphase begann.

Im Folgenden eine Auflistung von Löschmittelempfehlungen [6] (wörtlich) :

„Löschen mit Wasser:

Beschädigte Zellen werden gekühlt und brennen kontrolliert ab, da die brennende Zelle den benötigten Sauerstoff teilweise selbst produziert. Wasser selbst löscht nicht. Nicht beschädigte Zellen werden geschützt. Risiko: Lithium reagiert mit Wasser und beschleunigt ggf. das Abbrennen der geschädigten Zellen. Ergebnis der exothermen Reaktion sind Lithiumhydroxid und Wasserstoff $2\text{Li} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{LiOH} + \text{H}_2$.“

„Abdecken mit Sand etc.:

Ersticken der Flammen kann durch Sand oder ähnliche Mittel geschehen (Metallbrandpulverlöscher). Der für die Verbrennung notwendige zur Verfügung stehende Sauerstoff wird reduziert. Heißer Schwelherd bleibt bestehen; dadurch kann der Brand bei Sauerstoffverfügbarkeit jederzeit wieder ausbrechen (bei schneller Sauerstoffzufuhr ist eine Verpuffung möglich). Es wird wenig gekühlt, durch die thermische Wirkung können weitere Zellen beschädigt werden und in Brand geraten.“

„Ersticken mit CO₂:

CO₂ erstickt den Brandherd. Beseitigt den Schwelherd ebenfalls nicht. In geschlossenen Räumen anwendbar. Im Freien verflüchtigt sich CO₂ sehr schnell und gibt den Brandherd wieder frei. Feuer kann erneut ausbrechen.“

2.8 Testvorschriften und Sicherheitslinien für Lithium-Ionen-Batterien

Es existiert eine Reihe von Testvorschriften und Sicherheitsrichtlinien für Batterien – allgemein und speziell für den Gebrauch in Fahrzeugen. Ein Auszug:

- FreedomCAR Electrical Energy Storage System Abuse Test Manual for Electric and Hybrid Electric Vehicle Applications

- United States Advanced Battery Consortium Electrochemical Storage System Abuse Test Procedure Manual
- VDA-Testspezifikation für Lithium-Ion-Batterien für Hybrid- Elektrofahrzeuge
- UL 1642 Lithium Batteries
- FMVSS 305, Electric Powered Vehicles: Electrolyte Spillage And Electrical Shock Protection
- UN Manual of Test and Criteria Recommendations on the Transport of Dangerous Goods ST/SG/AC.10/11/Rev.4
- SAE J1766 Recommended Practice for Electric and Hybrid Electric Vehicle Battery Systems Crash Integrity Testing
- SAE J2464 Electric and Hybrid Electric Vehicle Rechargeable Energy Storage System (RESS) Safety and Abuse Testing

2.9 FreedomCAR Electrical Energy Storage System Abuse Test Manual for Electric and Hybrid Electric Vehicle Applications

Das folgende Kapitel inklusive Unterkapitel ist inhaltlich [7] entnommen: Laut Auskunft von [8] wird diese Testspezifikation der Sandia National Laboratories – erstellt in Zusammenarbeit mit der US-Automobilindustrie – voraussichtlich auch von den europäischen und asiatischen Automobilherstellern übernommen werden. Deshalb fiel die Wahl bei der vorliegenden Diplomarbeit auf diese Prüfspezifikation. Folgend eine kurze Beschreibung der Tests.

2.9.1 Versuchsbedingungen

Die Tests sind für die verschiedenen Herstellungsebenen (Zelle, Modul, Pack) gedacht. Diese wird in jedem Testprofil angegeben. Für jeden Test ist ein Abuse Level angegeben:

- Level 1: Der Versuchskörper sollte im Wesentlichen intakt bleiben.
- Level 2: Der Versuchskörper könnte nicht mehr funktionstüchtig sein, aber es sollte keine Gefährdung von Menschen auftreten.
- Level 3: Der Versuchskörper wird nach dem Versuch höchstwahrscheinlich nicht mehr funktionstüchtig sein.

Im idealen Fall sollten die Prüflinge nicht ganz neu und maximal 25 % ihres Lebenszyklus absolviert haben. Die Zellen sollten bei einem SOC von 100 % getestet werden. Die Prüftemperatur sollte 25° C betragen, die Testkörpertemperatur sollte der normalen Betriebstemperatur entsprechen und ein allenfalls integriertes Temperiersystem sollte eingeschaltet sein. Nach dem Test müssen die Versuchsartikel mindestens eine Stunde (oder bis ihre Temperatur unter 50° C fällt) beobachtet werden.

2.9.2 Testbewertung

Das FreedomCAR Abuse Test Manual for Electric and Hybrid Electric Vehicle Applications empfiehlt die von EUCAR herausgegebenen Hazard Levels zur Quantifizierung und Evaluierung der Abuse Testergebnisse (Tabelle 2-1). Bis zu Hazard Level 4 wäre eine Bewertung für Lithium-Ionen-Batterien, eingesetzt in Fahrzeugen, akzeptabel. Wobei natürlich möglichst niedrige Levels anzustreben sind.

Tabelle 2-1: EUCAR Hazard Levels [7]

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

2.9.3 Übersicht über die Tests

Die Tests sind in drei Hauptgebiete aufgeteilt: Mechanische Tests, thermische Tests und elektrische Tests. Im Anhang des Manuals befindet sich zudem eine Versuchsmatrix für einen Vibrationstest, der aber nicht als Abuse Test zu verstehen ist, sondern Betriebsbedingungen im Fahrzeug simuliert. Tabelle 2-2 zeigt eine Übersicht der empfohlenen Versuche.

Tabelle 2-2: Tests nach dem FreedomCar Abuse Test Manual [7]

Mechanical Abuse Tests					
Controlled Crush	Penetration	Drop	Immersion	Roll-Over-Simulation	Mechanical Shock
Thermal Abuse Tests					
Thermal Stability	Simulated Fuel Fire	Elevated Temperature Storage	Rapid Charge / Discharge	Thermal Shock Cycling	
Electrical Abuse Tests					
Overcharge / Overvoltage	Short Circuit	Overdischarge / Voltage Reversal		Partial Short Circuit	
Vibration Testing					

2.9.4 Mechanische Tests:

Zur Untersuchung der Crashesicherheit einer Lithium-Ionen-Batterie erscheinen die mechanischen Tests besonders wichtig. Deshalb folgt hier eine detaillierte Beschreibung der einzelnen mechanischen Tests.

Controlled Crush:

- Abuse Level: 3
- Minimale Herstellungsebene: Modul
- Beschreibung: Der Versuchskörper wird zwischen einer flachen und einer strukturierten Platte (Abbildung 2-4) geklemmt. Der Test besteht aus zwei Abschnitten:
 - Auslenkung von 15% der Modulhöhe – Halten für 5 Minuten
 - Entweder 50% Auslenkung der Modulhöhe oder 1000fache Gewichtskraft des Moduls – Halten für 5 Minuten

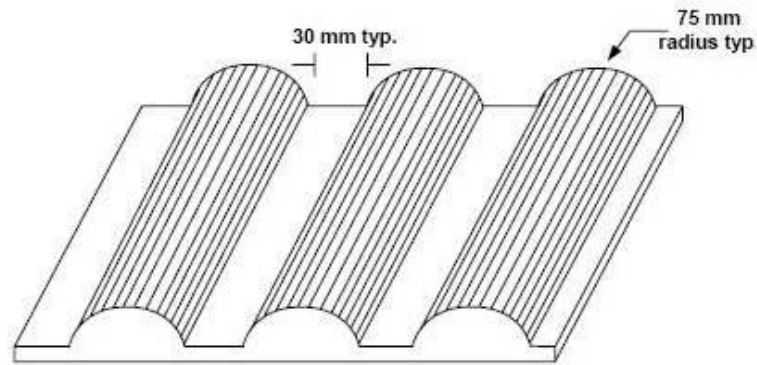


Abbildung 2-4: Strukturierte Platte für kontrollierte Quetschung [7]

Penetration:

- Abuse Level: 3
- Herstellungsebenen: Zelle/Modul/Pack
- Beschreibung: Versuchskörper wird mit einem Stahlstab normal zu den Elektrodenplatten durchstoßen. Der Stab ist vom Versuchskörper elektrisch isoliert und wird mit 8 cm/s Penetrationsrate geführt.
 - Zellebene:
 - 3 mm Stabdurchmesser
 - Penetrationstiefe: Durch die Zelle
 - Modul- bzw. Packebene:
 - 20 mm Stabdurchmesser
 - Penetrationstiefe: Durch 3 Zellen oder 100 mm

Drop:

- Abuse Level: 3
- Minimale Herstellungsebene: Pack
- Beschreibung: Versuchskörper wird aus einer geeigneten Höhe (maximal 10 m) auf einen Stahlzylinder abgeworfen (Abbildung 2-5).
 - Zylinderradius: 150 mm
 - Maximale Abwurfhöhe: 10 m

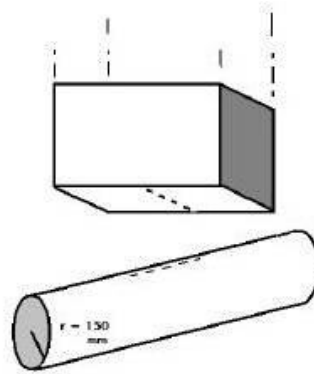


Abbildung 2-5: Falltest [7]

Immersion:

- Abuse Level: 2
- Minimale Herstellungsebene: Zelle
- Beschreibung: Der Versuchskörper wird in Salzwasser getaucht und muss dort entweder mindestens 2 Stunden oder bis alle sichtbaren Reaktionen abgeklungen sind verweilen.

Roll-Over-Simulation:

- Abuse Level: 1
- Herstellungsebene: Modul
- Beschreibung: Versuch besteht aus zwei Abschnitten:
 1. Der Versuchskörper wird eine komplette Umdrehung (360 Grad) kontinuierlich rotiert. Danach wird kontrolliert, ob Betriebsflüssigkeiten ausgeronnen sind.
 2. Versuchskörper wird jeweils in 90 Grad-Abschnitten eine komplette Umdrehung rotiert und muss in jeder Position 1 Stunde verweilen.

Mechanical Shock:

- Abuse Level: 1 für Low, 2 für Mid
- Beschreibung: Versuch besteht aus zwei Abschnitten (siehe Tabelle 2-3):
 1. Lowleveltest: Der Versuchskörper muss den Test ohne Schaden überstehen.
 2. Midleveltests: Der Versuchskörper kann beim Test zerstört werden.

Tabelle 2-3: Mechanische Schocktests [7]

Level	Geschwindigkeit	Max. Dauer	Min. Beschleunigung	Akzeptable Pulsform
Low	6.7 m/s	55 ms	20 G für 11 ms	25 G für 30 ms Halbsinus
Mid-1	11.1 m/s	65 ms	30 G für 16 ms	35 G für 51 ms Halbsinus
Mid-2	13.3 m/s	110 ms	20 G für 22 ms	25 G für 60 ms Halbsinus

2.10 Verwendete Lithium-Ionen-Zellen

Für das Projekt „Klimamobil – 0-Emissionsfahrzeuge im öffentlichen Nahverkehr“ wurden Lithium-Ionen-Polymer-Zellen des koreanischen Herstellers EIG verwendet. Die genaue Produktbezeichnung ist: Rechargeable Lithium Ion Polymer Battery Model ePLB C020B.

2.10.1 Technische Daten

Die Technischen Daten sind in Tabelle 2-4 angegeben.

Tabelle 2-4: Technische Daten der Lithium-Ionen-Polymer Zellen ePLB C020B [9]

Nominal Capacity		20 Ah
Nominal Voltage		3.65 V
Weight		420 g
Energy Density	Volume	360 Wh/L
	Weight	180 Wh/kg
AC Impedance (1 kHz)		< 3 mΩ

2.10.2 Abmessungen

Die Hauptabmessungen ohne die elektrischen Kontakte sind:

- Breite: 147 mm
- Länge: 216 mm
- Höhe: 7,2 mm

Die restlichen Abmessungen sind in Abbildung 2-6 ersichtlich.

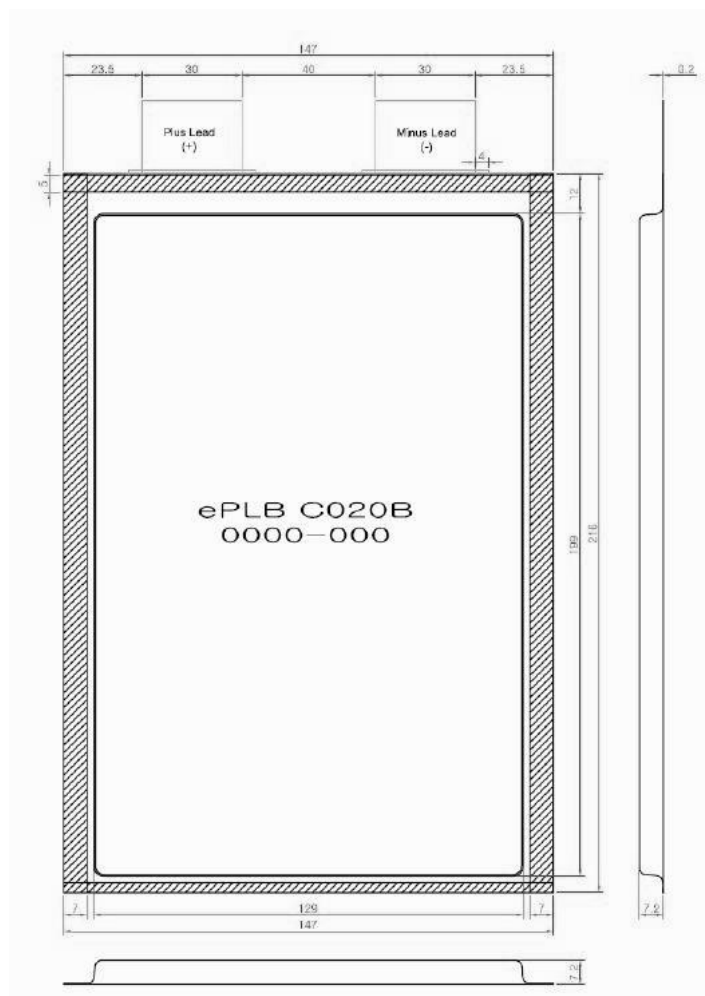


Abbildung 2-6: Abmessungen der Lithium-Ionen-Polymer Zellen ePLB C020B [9]

2.10.3 Vom Hersteller durchgeführte Zellentests

Ein Testprotokoll [10] der verwendeten Zellen stand zur Verfügung. In diesem Protokoll werden 8 absolvierte Tests beschrieben:

- Thermal Shock Test
 - Ergebnis: Die Kapazitäten nach jedem von drei auf den Test folgenden Lade-Entlade-Zyklen wurden gemessen. Diese sind unauffällig bzw. konstant.
- Overdischarge Test
 - Ergebnis: "No flame, no vent gas and no smoke."
- Short Circuit Test
 - Ergebnis: "No flame, no vent gas and no smoke."
- Penetration Test
 - Ergebnis: "No flame, no vent gas and no smoke."
- Overcharge Test
 - Ergebnis: "No explosion and no fire."
- Thermal Stability Test
 - Ergebnis: "No flame, no vent gas and no smoke."
- Extreme Cold Temperature Test
 - Ergebnis: Kapazitäten nach jedem von drei Lade-Entlade-Zyklen mit definierten Temperaturen zu jedem DOD; unauffällig bzw. konstant.
- Controlled Crush Test
 - Ergebnis: "No flame, no vent gas and no smoke."

Die Tests wurden alle in der Zellebene durchgeführt. Abgesehen davon sind sie den Tests im FreedomCar Abuse Test Manual for Electric and Hybrid Electric Vehicle Applications [7] ähnlich bzw. an sie angelehnt. Der Extreme Cold Temperature Test scheint in oben genannter Richtlinie jedoch nicht auf.

Vergleicht man die Tests mit jenen des United States Advanced Battery Consortium Electrochemical Storage System Abuse Test Procedure Manual [11] ist ebenfalls eine

Ähnlichkeit bzw. eine Anlehnung zu erkennen. In dieser Prüfvorschrift kommt auch der Extreme Cold Temperature Test vor.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass alle Tests, mit leichten Variationen, Untertests dieser beiden oben genannten Richtlinien sind.

Bei diesen durchgeführten Tests fehlt der im Falle eines Crashes wichtige Mechanical Shock Test. Dieser überprüft die Robustheit bei Beschleunigung. Deshalb wurden diese mechanischen Schocktests ergänzend durchgeführt. Siehe dazu Kapitel 8 auf Seite 98.

3 Aufgabenstellung

In der vorliegenden Arbeit sollte eine crasht sichere Implementierung des EESS in einen konventionellen Bus erarbeitet werden. Ziel ist es, zwei Busse auf Basis eines Leicht-LKW-Fahrgestells aufzubauen, bei dem vorwiegend Achsen, Lenkung und Fahrerkabine wiederverwendet werden. Der Aufbau wird als Leichtbau-Rahmenstruktur konzipiert. Zur zusätzlichen Stromgewinnung während des Betriebs werden am Dach Photovoltaikzellen montiert. Die zwei Busse erhalten eine Sondergenehmigung als Prototypen für die Straßenzulassung. Für die Integration des EESS sind folgende Hauptpunkte zu berücksichtigen:

- Crashtsicherheit der Batterie
- Personenschutz im Crashfall
- Zulässiges Gesamtgewicht der Busse
- Zulässige Achslasten der Busse
- Niederflurkonstruktion
- Zugänglichkeit der Batterie für den Wechsellvorgang



Abbildung 3-1: Klimamobil Elektrobus 7,2 Tonnen [12]

4 Mögliche Crashsicherheitsmaßnahmen für Lithium-Ionen-Batterien

Serienhersteller müssen zusätzlich zu den spezifischen Tests für elektrische Fahrzeuge noch alle gesetzlichen Tests erfüllen, die für Fahrzeuge mit konventionellem Antrieb gelten. Zusätzlich müssen ihre Fahrzeuge bei den NCAP-Verbraucherschutztests noch möglichst gut abschneiden. Auch bei diesen Tests ergeben sich eventuell neue Herausforderungen wie zum Beispiel:

- Wegfall des Lastpfades über die Motortriebeeinheit beim Frontcrash
- Neben dem Schutz des Menschen im Crashfall hat auch der Schutz des EESS höchste Priorität
- Schwerpunktänderung des Fahrzeugs durch die Batterie (Auslegung, Fahrdynamik)

Für die Sicherheit des gesamten Batteriesystems ist im äußersten Extremfall noch immer die Einzelzelle mit ihren chemischen und elektrischen Sicherheitsmechanismen verantwortlich. Diese Mechanismen sollen nach Möglichkeit nicht gebraucht bzw. überstrapaziert werden. Die Serienhersteller aller BEV und HEV mit Lithium-Ionen-Batterien setzen vergleichbare Schutzmechanismen und Präventivmaßnahmen ein. Im Folgenden eine kurze Beschreibung und Diskussion eventueller Vorkehrungen, die teilweise auch in Kombination angewendet werden. Diese Mechanismen und Maßnahmen sollen eventuelle Lösungsansätze für die crashsichere Implementierung der Batterie in den Elektrobussen aufzeigen.

4.1 Zentrale Einbaulage

Diese Sicherheitsmaßnahme stammt aus [13]. Eine zentrale Einbaulage (Abbildung 4-1) außerhalb der Knautschzone schützt die Batterie vor Deformationen im Crashfall. Bei einer Unfallschwere, die den gesetzlichen Tests bzw. den Verbraucherschutztests entspricht, werden, soweit dem Autor dieser Arbeit bekannt, von Serienherstellern keine Deformationen der Batterie zugelassen, da dann die Crashsicherheit der Batterie noch nicht gewährleistet werden kann.

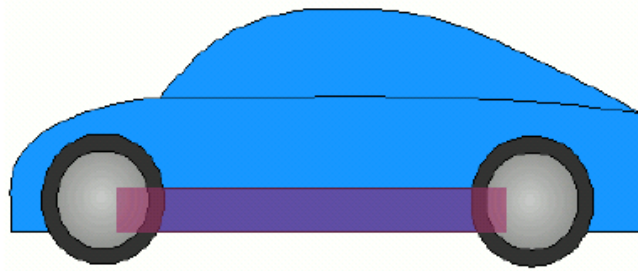


Abbildung 4-1: Zentrale Einbaumöglichkeit [13]

Die Batterie wird also ausschließlich dort platziert, wo sie nach den gesetzlichen Crash- und Verbraucherschutztests keine Deformationen aufweist. In Abbildung 4-2 sieht man die unbeschädigte Batterie eines PHEV nach einem Heck-Crashtest.

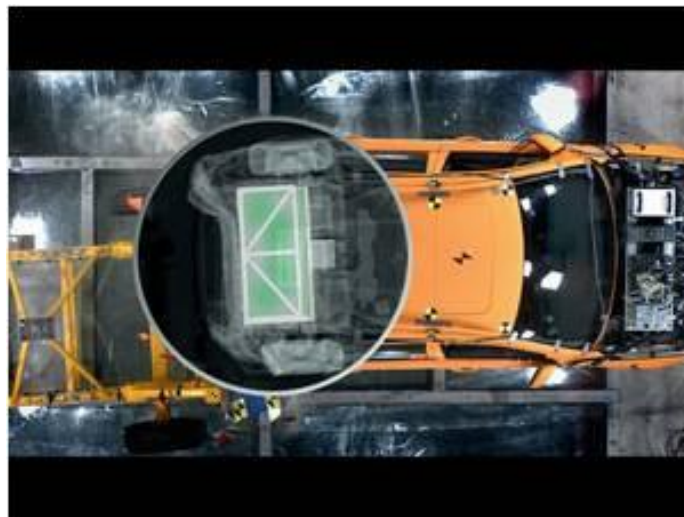


Abbildung 4-2: Unbeschädigte Batterie eines PHEV nach einem Heck-Crashtest [14]

Eine zukünftige Alternative wäre eine Randposition der Batterie (Abbildung 4-3). Diese wäre für eine bessere Raumnutzung anzustreben. Im Motorbereich wird Platz frei durch den Wegfall des Verbrennungsmotors bei EV und den oftmals kleineren Verbrennungsmotoren bei HEV. Bei einer Platzierung im ehemaligen Motorbereich würde sich die Gewichtsverteilung und mit ihr die Schwerpunktlage kaum ändern.

Eine andere Möglichkeit ist die Positionierung im Bereich des Kofferraums, wo – auf Kosten des Stauraums – Platz zur Verfügung steht. Im Moment sind diese zwei Einbaulagen noch keine Alternativen, da Batteriedeformationen im Falle eines Unfalls auftreten können.

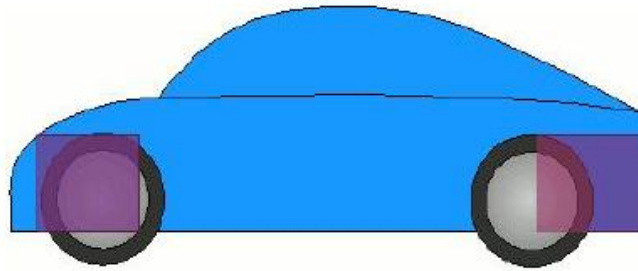


Abbildung 4-3: Einbaumöglichkeiten an den Randbereichen des Fahrzeugs [13]

4.2 Stabil gekapselte Batterie

Batterien werden, wie in Abbildung 4-4 die des Opel Ampera, stabil gekapselt. Im Falle eines Unfalls kann die Kapselung den austretenden Elektrolyten zurückhalten und die Insassen und eventuelle Rettungskräfte vor einem elektrischen Schlag bewahren. Weiters erfüllt sie die Funktion eines Schutzes der Zellen und der Elektronik vor Penetrationen. Dadurch reduziert sich die Gefahr eines Kurzschlusses.

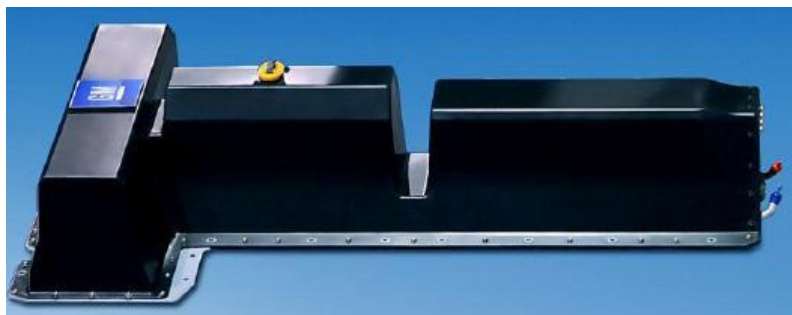


Abbildung 4-4: Stabil gekapselte Batterie des Opel Ampera [15]]

Lüftungskanäle oder Überdruckventile können bei einer Ausgasung der Zellen – letztendlich verursacht durch den Thermal Runaway – der Explosionsverhinderung dienen. Das ausströmende Gas soll nicht in die Fahrgastzelle gelangen, da die Zusammensetzung und die Toxizität dieses Gases mit der chemischen Zusammensetzung der Zelle variieren. Wie aus Abbildung 4-5 ersichtlich, steht das austretende Gasvolumen beim Thermal Runaway Peak in direktem Zusammenhang mit der elektrischen Ladung der Zelle und der Temperatur und beträgt durchschnittlich 1200 mL/Ah bei Normbedingungen (0° C und 1,013 bar).

Die stabile Kapselung stellt einen Widerspruch mit der betriebsbedingten Wärmeausdehnung beim Lade- und Entladevorgang dar. Diese Ausdehnung kann durch ein

Temperiersystem minimiert werden. Eine andere Möglichkeit ist die Tolerierung der Volumsänderung und die nicht druckdichte Ausführung der Kapselung.

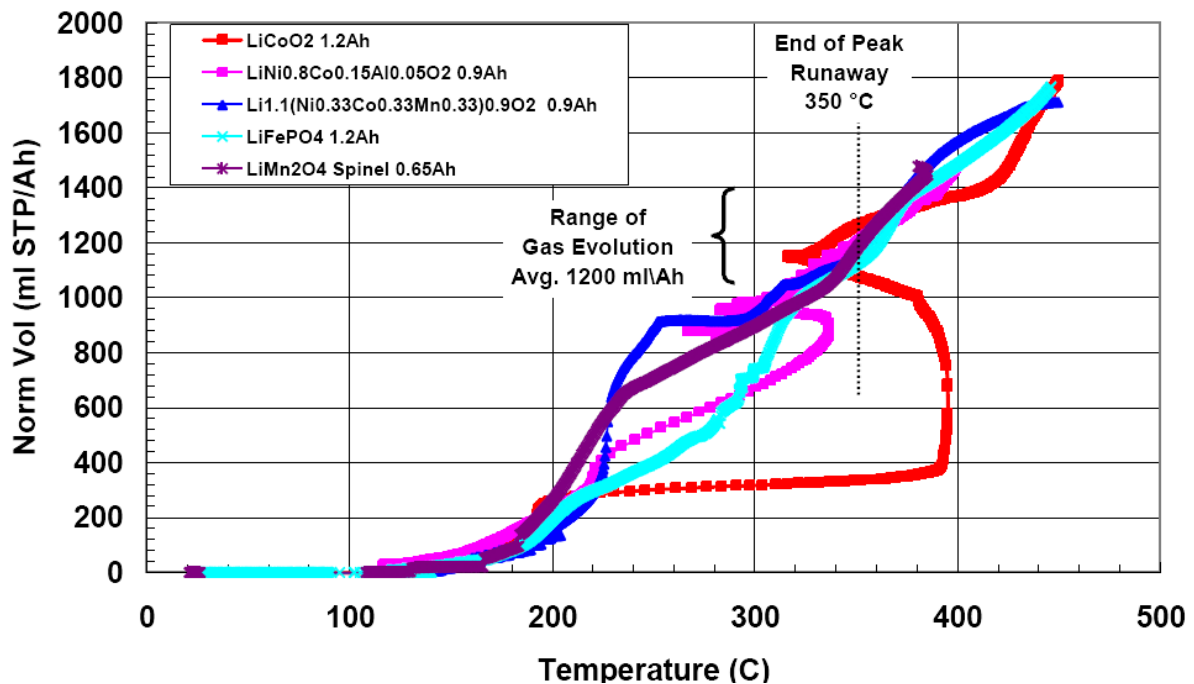


Abbildung 4-5: Ausgasvolumen beim Thermal Runaway von verschiedenen Li-Ionen-Zellen [16]

4.3 Adaptierungen im batterieumgebenden Raum

Im Falle eines Unfalls muss eine Zerstörung der Batterie so weit als möglich verhindert werden. Im Bereich des Akkus sollen die Träger verstärkt werden. Dies hat zum einen eine schützende Funktion für den Energiespeicher und zum anderen vermindert es die Gefahr von Penetrationen durch gebrochene oder geknickte Träger. Spitze Bauteile sollen im Batteriebereich vermieden werden.

In [17] wird ein Ansatz beschrieben, der eine Relativbewegung der Batterie im Crashfall erlaubt. Diese wird durch ein Deformationselement vor dem Akku realisiert. Bei einem gewissen Kraft- bzw. Verzögerungsniveau das die Batterie auf das Element aus Metallschaum ausübt, beginnt es sich zu verformen (Abbildung 4-6). Dadurch können die Belastungen auf das EESS geringer gehalten werden und eventuell Deformationen vermieden oder verringert werden.

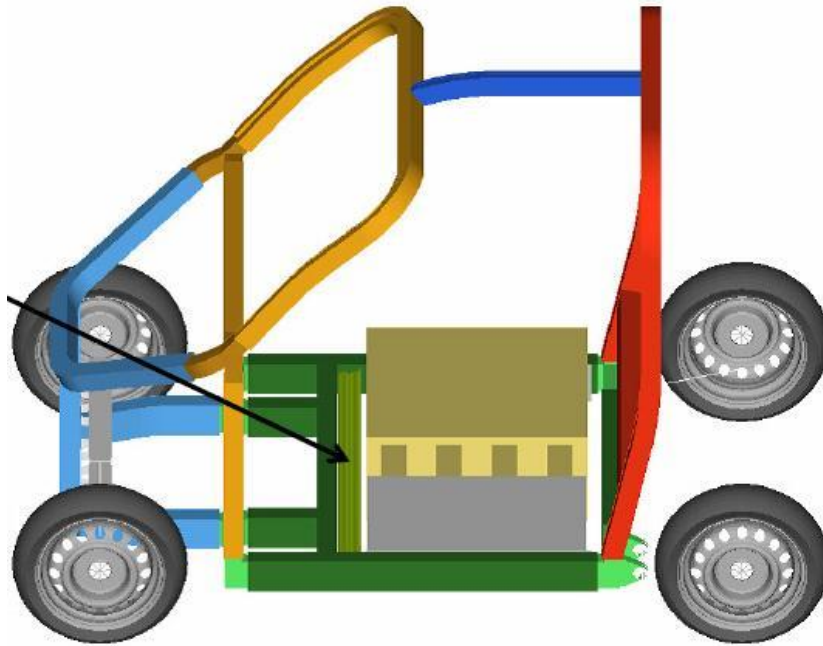


Abbildung 4-6: Space Frame des Steyr 1050 mit Deformationselement (Pfeil) vor der Batterie [17]

4.4 Crashsensoren für die Batteriekontaktunterbrechung

Ein weiterer Ansatz ist die Nutzung von Crashsensoren für die Batteriekontaktunterbrechung im Fahrzeugheck, in der Fahrzeugfront und an den Seiten. Crashsensoren werden beispielsweise beim Toyota Prius auch für das Unterbrechen der Batteriekontakte eingesetzt [18]. Falls Sensoren für die Rückhaltesysteme vorhanden sind, können auch diese dafür verwendet werden. In Abbildung 4-7 ist beispielhaft eine mögliche Anordnung der Crashsensoren an der Fahrzeugfront und an den Seiten dargestellt, wie sie für Rückhaltesysteme verwendet wird.



Abbildung 4-7: Anordnung von Crashsensoren für Rückhaltesysteme [19]

4.5 Hitzeschild

Ein Hitzeschild wird beispielsweise in [20] eingesetzt. Da es beim Thermal Runaway einer oder mehrerer Zellen zu einer Hitzeentwicklung kommt, besteht die Möglichkeit, benachbarte Zellen oder Module mit Hitzeschildern vor einem eventuellen Anstecken zu schützen. Mittels Hitzeschild ist es auch möglich, die Insassen vor der Hitze zu schützen. Eine Möglichkeit ist ein Aluminiumhitzeschild wie in Abbildung 4-8.

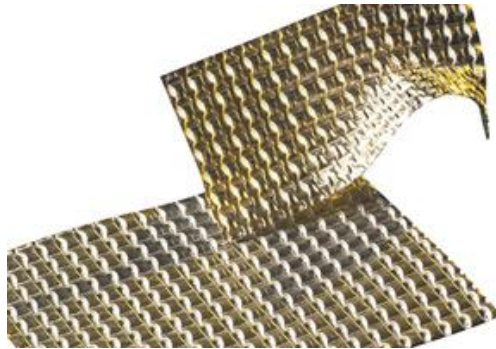


Abbildung 4-8: Aluminiumhitzeschild [21]

4.6 Zusammenfassung der Crashsicherheitsmaßnahmen

Diese Maßnahmen werden meist in Kombination angewendet. Dabei ist es nötig, individuelle Lösungen für die Fahrzeug- und Batteriekonstruktion auszuarbeiten. Wie bereits in Kapitel 4.2 erwähnt bestehen zum Beispiel verschiedene Anforderungen bezüglich der Batteriekapselung, je nachdem ob ein Temperiersystem im EESS inkludiert ist oder nicht.

5 Konzeptfindung Batterieposition und Batteriewechselsystem

Die Integration des EESS in die Fahrzeugstruktur bedarf der Findung einer geeigneten Einbaulage. Diese sollte crashtsicher, wechselbar und für den Wechselvorgang gut zugänglich verbaut werden.

5.1 Batterieposition

Im Folgenden werden mögliche Einbaulagen diskutiert.

5.1.1 Batterie im Fahrzeuginnenraum

Der Fahrzeuginnenraum (Abbildung 5-1) wird wegen des Insassenschutzes ohnehin besonders beachtet und deshalb durch Richtlinien und Normen geschützt. Er befindet sich zentral und erfüllt die Anforderungen bezüglich Crashtsicherheit. Der Fahrzeuginnenraum gewährleistet bestmöglichen Schutz in alle Crasht Richtungen (Frontal-, Heck-, Seitencrash, Rollover). Jedoch stellt die Batterie bei Elektrolytverlust oder Ausgasung eine Gefahr für die Passagiere dar. Außerdem ist die Zugänglichkeit für einen reibungslosen Wechselvorgang nicht gegeben. Vor allem aufgrund der schlechten Zugänglichkeit ist diese Einbauvariante für den vorliegenden Fall nicht geeignet.

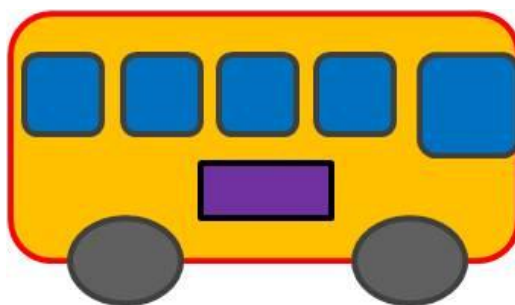


Abbildung 5-1: Batterie im Fahrzeuginnenraum

5.1.2 Batterie am Fahrzeugdach

Durch die Platzierung der Batterie am Dach (Abbildung 5-2) kommt es zu einer Schwerpunkterhöhung. Daraus resultiert eine Kippgefahr bei Wind und/oder hohen Kurvengeschwindigkeiten. Außerdem würden nötige Versteifungen in der Dachkonstruktion

das Fahrzeug schwerer machen. Dies kann ein Problem hinsichtlich des zulässigen Gesamtgewichts darstellen. Der Platz am Dach wird ohnehin für die Anbringung von Photovoltaikzellen zur Stromgewinnung benötigt. Der Schutz der Batterie wäre wiederum in alle Crashrichtungen, ausgenommen beim Rollover, gegeben. Da der Platz am Dach schon anders belegt ist, wurde diese Möglichkeit als ungeeignet betrachtet und nicht weiter analysiert.

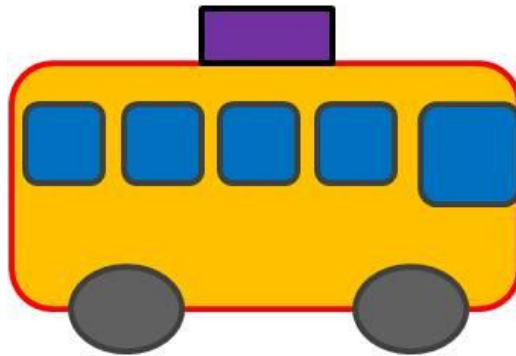


Abbildung 5-2: Batterie am Dach

5.1.3 Batterie im Fahrzeugheck

Diese Einbauposition ist in Abbildung 5-3 dargestellt. Für die Buskonstruktionen werden die Achsen der Iveco-Fahrgestelle verwendet. Dabei ist die Achslast der Hinterachse bei der Buskonstruktion schon annähernd maximal. Durch die nötige Hecktür beim größeren Bus steht nur sehr wenig Bauraum zur Verfügung. Es kann ein Interessenskonflikt zwischen Zugänglichkeit für den Wechselvorgang und nötiger Batteriegröße entstehen. Die Crashesicherheit beim Heckcrash muss bei dieser Einbauposition gesondert berücksichtigt werden. Aufgrund der generell hohen Heckachslasten wurde dieser Ansatz nicht weiter verfolgt.

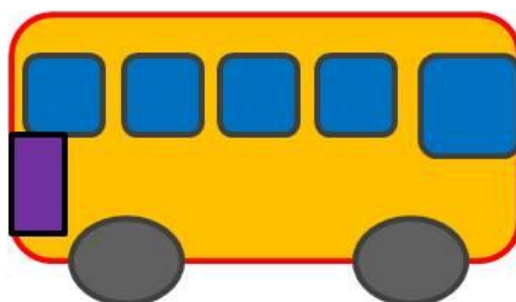


Abbildung 5-3: Batterie im Fahrzeugheck

5.1.4 Nachlaufbatterie

Diese unkonventionelle Lösung wurde hinsichtlich Vor- und Nachteile genau erörtert.

Vorteile dieser Lösung wären:

- Keine Probleme mit den Achslasten und dem Gesamtgewicht
- Keine Einschränkungen bezüglich des Platzbedarfs
- Einfacher problemloser Wechsel der Batterie
- Platz über Batterie könnte auch als Stauraum (Generator, Fahrräder, Gepäck...) verwendet werden
- Sicherheitstechnisch einfach realisierbar
- Interessant als Reichweitenverlängerung auf Autobahnen

Nachteile dieser Lösung wären:

- Bus wäre schwieriger zu manövrieren
- Optisch ist diese Variante weniger ansprechend
- Hochspannungskabel müsste über die Anhängerdeichsel in den Bus geführt werden

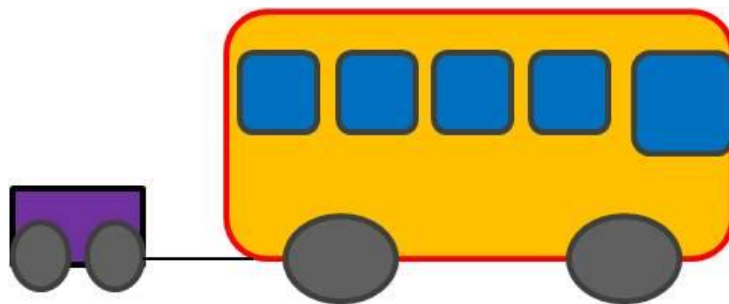


Abbildung 5-4: Nachlaufbatterie im Busanhänger

Das größte Problem bei dieser Lösung stellt laut [16] die Stromführung durch ein Hochspannungskabel in der Anhängerdeichsel zum Fahrzeug dar.

5.1.5 Batterie im ehemaligen Motorraum

Wie bereits in Kapitel 4.1 auf Seite 28 beschrieben wurde, bietet sich der Einbau im ehemaligen Motorraum (Abbildung 5-5) an. Auch die Zugänglichkeit für den Wechselvorgang

ist gegeben. Jedoch befindet sich die Batterie in der Knautschzone beim Frontcrash und abhängig von der Kollisionsposition eventuell auch beim Seitencrash.

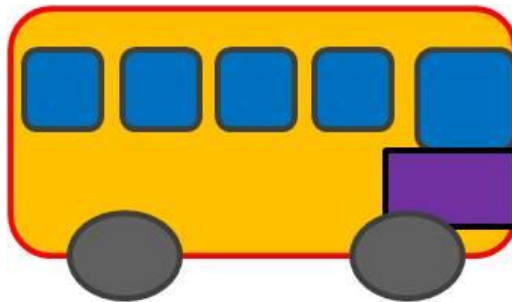


Abbildung 5-5: Batterie im ehemaligen Motorraum

5.1.6 Einbau unter dem Niederflurboden

Diese zentrale Einbaulage (Abbildung 5-6) gewährleistet die Zugänglichkeit, die Wechselbarkeit und auch die Verkehrssicherheit. Die Batterie ist von den Seiten und von unten erreichbar und befindet sich zentral im Fahrzeug, also außerhalb der Knautschzone beim Frontcrash. Auch beim Seitencrash besteht ein gewisser Schutz durch die Fahrzeuglängsträger.

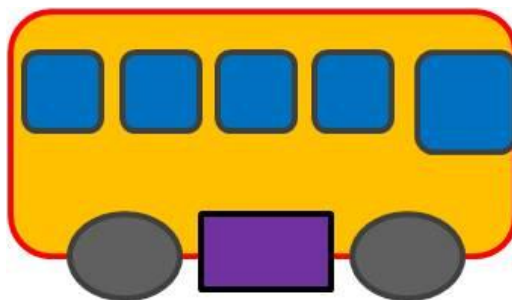


Abbildung 5-6: Batterie unter dem Niederflurboden

5.1.7 Bewertung der Einbaumöglichkeiten

Eine Bewertung aller hier beschriebenen Einbaulagen ist in Tabelle 5-1 ersichtlich. Von diesen sechs Einbaulagen wurden die letzten beiden, Einbau im Motoraum und Einbau unter dem Niederflurboden, für die geplante Anwendung als durchführbar erachtet und genauer analysiert. Als erstes wurde die Möglichkeit Einbau im ehemaligen Motorraum genauer betrachtet (Kapitel 6 ab Seite 43). Danach wurde die Möglichkeit Einbau unter dem Niederflurboden genauer analysiert (Kapitel 7 ab Seite 67).

Tabelle 5-1: Bewertung der Einbaumöglichkeiten

Bauraum	Wechselvorgang	Frontcrash	Heckcrash	Seitencrash	Rollover
Fahrzeuginnenraum	--	++	++	++	++
Fahrzeugdach	~	+	++	++	--
Fahrzeugheck	~	++	--	~	+
Nachlaufbatterie	++	++	--	--	-
Motorraum	~	--	++	-	+
Niederflurboden	~	++	++	~	+

5.2 Batteriewechselsystem

Der nötige Energiegehalt für einen gesamten Tag Fahrbetrieb der Busse ist mit einer einzigen Batterie aus Gewichtsgründen nicht bereitzustellen. Probleme wären dabei hinsichtlich zulässiger Achslasten, besonders der Hinterachse, und zulässigem Gesamtgewicht bzw. Nutzlast entstanden. Dies macht ein Wechselsystem mit wechselbarer Batterie nötig.

Der Wechselvorgang ist symbolhaft in Abbildung 5-7 dargestellt.

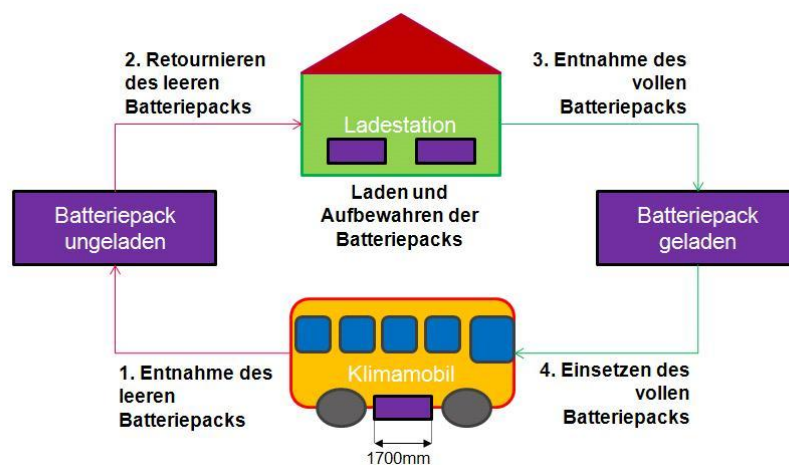


Abbildung 5-7: Genereller Batteriewechselvorgang

Verschiedene Wechselmethoden wurden erörtert. Besonders problematisch erschien das Ein- bzw. Ausfedern des Busses beim Ein- bzw. Ausführen der Batterie, denn hierbei entsteht eine Relativbewegung zwischen dem Bus und dem nicht im Fahrzeug befindlichen Teil der Wechseinrichtung. Abhilfe könnte ein Niederhalten des Busses schaffen oder eine kleine Hebebühne, die den Bus aus den Federn hebt. Dadurch könnte allerdings die Batterie beim

Wechselvorgang verklemmen. Angedacht wurde auch eine kostengünstige Wechselmethode mit einer modifizierten Ameise.

5.2.1 Wechsel von der Unterseite

Der Energiespeicher wird von unten an das Fahrzeug herangeführt. Die Batterie hat, um automatisches Anstecken zu ermöglichen, den Stecker an der Oberseite und dockt damit am Gegenstück am Fahrzeugunterboden an.

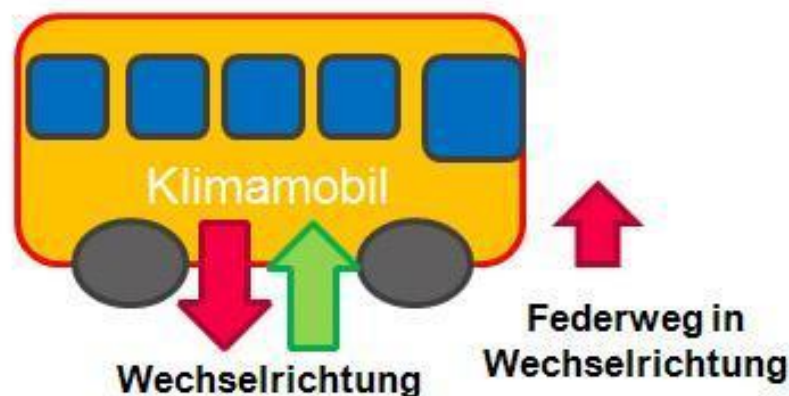


Abbildung 5-8: Prinzip Wechsel von der Unterseite

Vorteile dieser Variante:

- Es sind nur geringfügige Modifikationen des Busrahmens nötig
- Der Wechsel erfolgt in Einfederungsrichtung
- Einfaches Nachführen der Wechseleinrichtung als Ausgleich der oben beschriebenen Relativbewegung ist möglich
- Eventuell ist ein kostengünstiger Batteriewechsel mit einer Ameise möglich
- Das Platzproblem zwischen Fahrzeug- und Wechselstationsboden wäre mit einer Auffahrtsrampe lösbar
- Fixe Schutzkonstruktion für Seitenaufprall durch die Längsträger des Busses

Nachteile dieser Variante:

- Wenig Platz für den Wechselvorgang verfügbar
- Aufhängung der Batterie nur an Punkten möglich; eine Schiene würde den Wechselvorgang behindern

- Der ohnehin geringe Platz wird durch die zwei Steckerhälften weiter reduziert
- Zentrierung der Steckerhälften beim Anstecken ist schwierig

5.2.2 Wechsel von der Seite

Der Energiespeicher wird von der Seite an das Fahrzeug herangeführt. Die Batterie hat den Stecker an der Längsseite und dockt damit am Gegenstück am Fahrzeuglängsträger an, damit auch bei dieser Variante automatisch angesteckt werden kann.



Abbildung 5-9: Prinzip Wechsel von der Seite

Vorteile dieser Variante:

- Ein Schienensystem zur Batteriebefestigung ist möglich
- Es wird kein Platz für den Stecker nach oben benötigt
- Es ist ausreichend Platz für den Wechsellvorgang vorhanden
- Zentrierung der Steckerhälften beim Anstecken ist einfacher
- Eine komplette Kapselung der Batterie in einem Schacht ist möglich

Nachteile dieser Variante:

- Es sind größere Modifikation des Busrahmens nötig
- Der Bus muss vom Ausfedern abgehalten werden oder es ist eine sich mitbewegende Wechseinrichtung nötig
- Für den Wechsel mit einer Ameise ist eine zusätzliche Aufnahmevorrichtung an der Batterie nötig

- Eine eventuelle Schutzkonstruktion für den Seitenaufprall muss an einer Seite entfernbar sein

5.2.3 Wechsel von schräg unten mittels Kipplade

Die Batterie hat den Stecker an der Oberseite oder an der Längsseite. Der Stecker kann durch eine Rotation oder eine Translation getrennt werden.

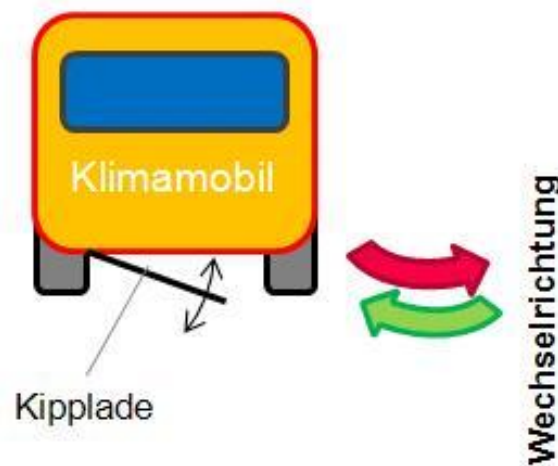


Abbildung 5-10: Prinzip Wechsel mittels Kipplade

Vorteile dieser Variante:

- Es sind keine größeren Modifikation des Busrahmens nötig
- Ein Schienensystem zur Batteriebefestigung ist möglich
- Ausfederung wäre nicht so problematisch
- Das Platzproblem zwischen Fahrzeug- und Wechselstationsboden wäre mit einer Auffahrtsrampe lösbar
- Fixe Schutzkonstruktion für Seitenaufprall durch die Längsträger des Busses
- Maximale Flexibilität durch Anbringungsmöglichkeiten des Steckers an der Längsseite oder an der Oberseite der Batterie möglich

Nachteile dieser Variante:

- Komplexeste Lösung
- Wenig Platz für Wechselvorgang verfügbar
- Wechsel mit Ameise wäre problematisch
- Aus- oder Einfahren über die Kipplade benötigt einen Antrieb

5.2.4 Bewertung der Wechselsysteme

Aus Sicht des Autors dieser Arbeit stellt der Wechsel von unten die beste Lösung dar, da der Wechselvorgang in Einfederungsrichtung erfolgt und die Relativbewegung der Federn nicht gesondert berücksichtigt werden muss. Zusätzlich kann eine fixe Schutzkonstruktion bei Seitencrash für die Batterie angebracht werden. Das Platzproblem nach unten wäre durch eine Auffahrtsrampe lösbar.

Die Projektbeteiligten [12] und [16] entschieden sich für die Variante Wechsel von der Seite. Diese Methode wurde dann weiter verfolgt und auch realisiert.

6 Prinzipanalyse Konzept 1 Batterie im ehemaligen Motorraum

Dieser Einbauort ist, wie oben bereits beschrieben, die naheliegendste Lösung. Zur prinzipiellen Beurteilung der Verkehrssicherheit wurde ein Finite Elemente Modell der Fahrzeugplattform mit einem inkludierten Batteriemodell erstellt. Damit wurden ausgewählte Lastfälle, die die Modellerstellung maßgeblich beeinflussten, simuliert. Das Modell diente zur Durchführung von Prinzipsimulationen. Die verwendete Software und Hardware ist im Anhang A beschrieben.

6.1 Konzeptphase Batterie im ehemaligen Motorraum

Neben den Simulationen wurden noch weitere Untersuchungen über diese Bauraumvariante und deren Durchführbarkeit angestellt.

6.1.1 3D-Scan des Iveco Fahrgestells

Mittels 3D-Scanner wurde das kleinere Iveco Fahrgestell von [22] gescannt. Ziel war digitale Geometrieinformationen über den Batteriebauraum zu bekommen. (Anm.: Die Außenscans wurden sehr deutlich und können auch für das Design des Klimamobils sehr gut verwendet werden). Den Scanaufbau sieht man in Abbildung 6-1. Als Ergebnis sieht man beispielhaft die Fahrzeugfront in Abbildung 6-2.



Abbildung 6-1: 3D-Scan des Iveco Fahrgestells

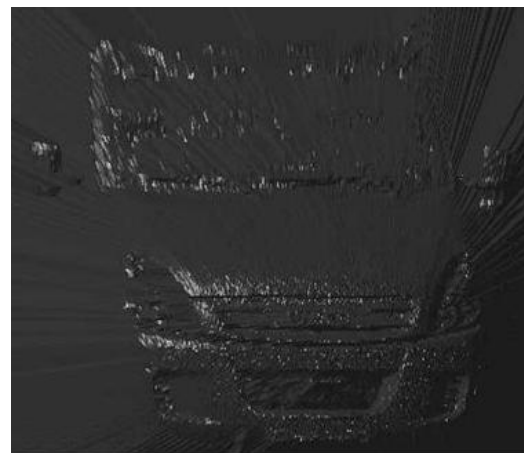


Abbildung 6-2: Fahrzeugfront 3D Scan

6.1.2 Ausmessen des Bauraums

Da der 3D-Scan des Motorraums durch Abschattungen gestört wurde und die Ergebnisse verfeinert werden mussten, wurde der Bauraum mittels Faro Arm abgetastet. Aus den Präzisionsmessungen konnte der grob definierte Batteriebauraum analysiert und angepasst werden. Vor allem beim Übergang in den Getriebetunnel waren Verschneidungen feststellbar. In Abbildung 6-3 sieht man den gemessenen Bauraum – dargestellt durch Flächen und Linien in beige – mit eingepasster Batterie. Deutlich erkennbar ist die Überschneidung im Bereich des Getriebetunnels.

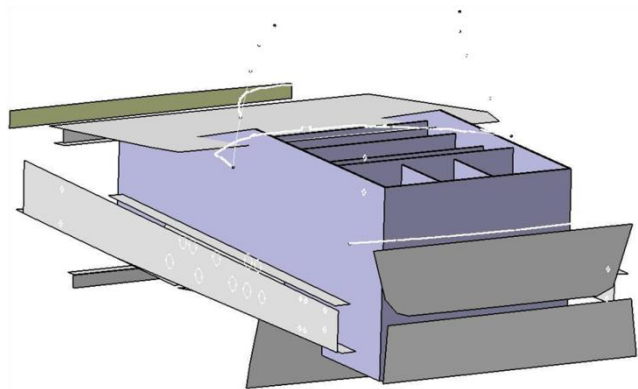


Abbildung 6-3: Bauraum inklusive Batterie

6.1.3 Bau eines Batterie-Mock-Up

Zur Verifizierung der Bauraummessungen wurde ein Mock-Up angefertigt. Dadurch konnten die Verschneidungen verifiziert werden und Analysen für eine Anpassung des Batteriebauraums abgeleitet werden. Der Mock-Up wurde umbaubar gestaltet, damit auch andere Batterieformen getestet werden konnten. Den Mock-Up in der ursprünglichen Form, also in jener des originalen CAD-Modells der Batterie, sieht man in Abbildung 6-4. Dabei wurde der Mock-Up so gut als möglich in den zur Verfügung stehenden Bauraum eingepasst.



Abbildung 6-4: Mock-Up im ehemaligen Motorraum

6.2 Geplante Lastfälle für die Simulationen des Gesamtmodells

Für die geplanten Simulationen wurden drei Lastfälle aus den gesetzlichen Crashtests, Verbraucherschutztests und aus den Tests der Serienhersteller gewählt. Zum Vergleich und zur Validierung der Simulationsergebnisse wurde beschlossen, bei beiden Bussen mit denselben Lastfällen zu simulieren. Die aus einer Vielzahl von Versuchen ausgewählten Lastfälle werden im Folgenden kurz beschrieben:

6.2.1 Lastfall I: Frontal Impact

Begründung: Dieser Test wird laut SAEJ1766 für batteriebetriebene Fahrzeuge und Hybridfahrzeuge vorgeschlagen. Dieser Versuch stellt einen Unfall dar, bei dem die gesamte Crashzone aktiviert wird.

- Anlehnung an den FMVSS 305 Frontal Impact
- Mindestgeschwindigkeit: 48 km/h
- Lotrechter Anprall
- Zulässige Abweichung: 30°
- Starre Barriere
- Skizze siehe Abbildung 6-5

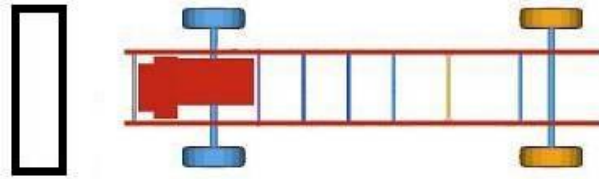


Abbildung 6-5: Lastfall I Frontal Impact

6.2.2 Lastfall II: Car to Car Crash

Begründung: Dieser Fall ist wesentlich kritischer als Lastfall I, da bei diesem Versuch nur ein Lastpfad aktiviert wird. Zusätzlich entsteht eine Gefahr für die Batterie durch Intrusionen mit dem Längsträger des gegnerischen Fahrzeugs.

- Anlehnung an Daimler Benz Test
- Fahrzeug-Fahrzeug-Crash
- 50 % Überdeckung
- Anprallgeschwindigkeit: 60 km/h
- Skizze siehe Abbildung 6-6.

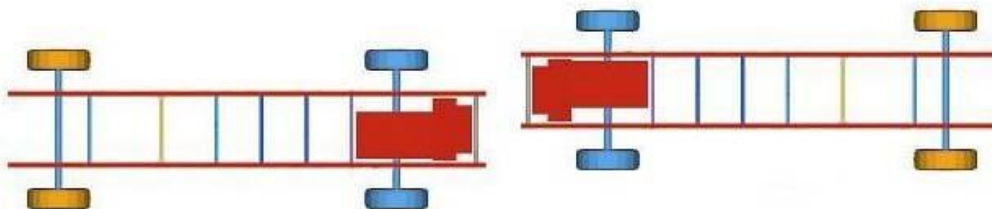


Abbildung 6-6: Lastfall II Car to Car Crash

6.2.3 Lastfall III: Side Impact

Begründung: Nicht explizit für batteriebetriebene Fahrzeuge und Hybridfahrzeuge vorgeschlagen. Jedoch in diesem Fall sicherlich aussagekräftiger als der laut SAEJ1766 für batteriebetriebene Fahrzeuge und Hybridfahrzeuge vorgeschlagene FMVSS 214. Bei diesem Lastfall sind große Belastungen für die Batterie durch Intrusionen zu erwarten.

- Anlehnung an EURO NCAP Pole Side Impact
- Fahrzeug seitlich auf „Pole Barriere“
- Anprallgeschwindigkeit: 29 km/h
- Skizze siehe Abbildung 6-7.

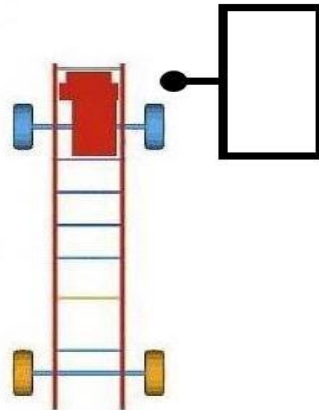


Abbildung 6-7: Lastfall III Pole Side Impact

6.3 Abstraktes Batteriemodell

Das CAD-Batteriemodell von [16] wurde erstellt nach den entsprechenden Anforderungen bezüglich Energiegehalts, verfügbaren Bauraums und des Platzes für die notwendigen elektronischen Bauteile. Daraus wurde aus einer generierten Midsurface durch Vernetzen das FE-Batteriemodell erstellt. Abbildung 6-8 und Abbildung 6-9 zeigen jeweils die vorletzte Version, die für die Variante „Batterie im ehemaligen Motorraum“ erstellt wurde. In dieser Version sind 736 Stück Lithium-Ionen-Polymer-Zellen verbaut. Im FE-Modell sieht man noch die vom Autor dieser Arbeit hinzugefügten Batteriehalterungen, mehr dazu in Kapitel 6.3.2. Das Finite Element Modell besteht aus Shell-Elementen und Solid-Elementen. Daraus ergibt sich eine Elementanzahl von rund 198.000 Elementen.

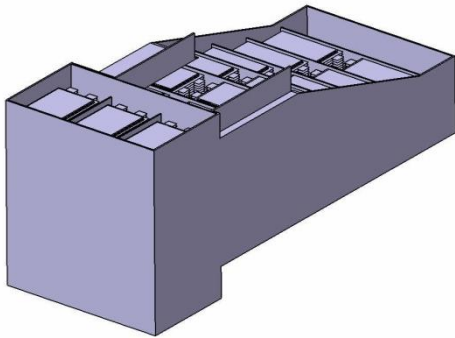


Abbildung 6-8: CAD-Batteriemodell

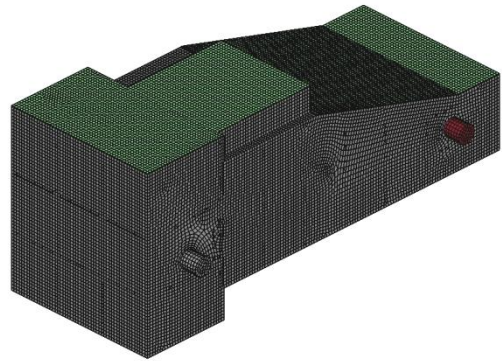


Abbildung 6-9: FE-Batteriemodell

6.3.1 Hauptbestandteile des FE-Modells

Die Hauptbestandteile sind Tabelle 6-1, Abbildung 6-10 und Abbildung 6-11 zu entnehmen.

Tabelle 6-1: Hauptbestandteile des FE-Modells

Positionsnummer	Anzahl	Bestandteil	Typ	Stärke
1	1	Batteriegehäuse	Shell	2 mm
2	1	Deckel	Shell	2 mm
3	4	Batteriehalterungen	Solid	-
4	22	Zwischenplatten	Shell	2 mm
5	21	Zellenpaketdummies	Solid	-

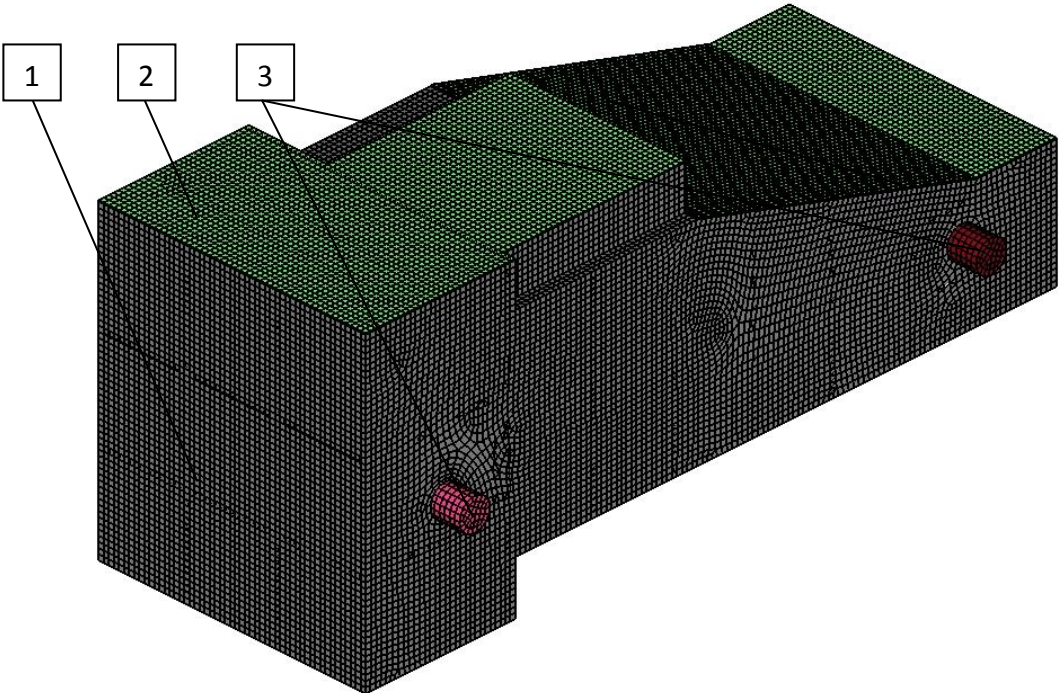


Abbildung 6-10: Hauptbestandteile des FE-Modells außen

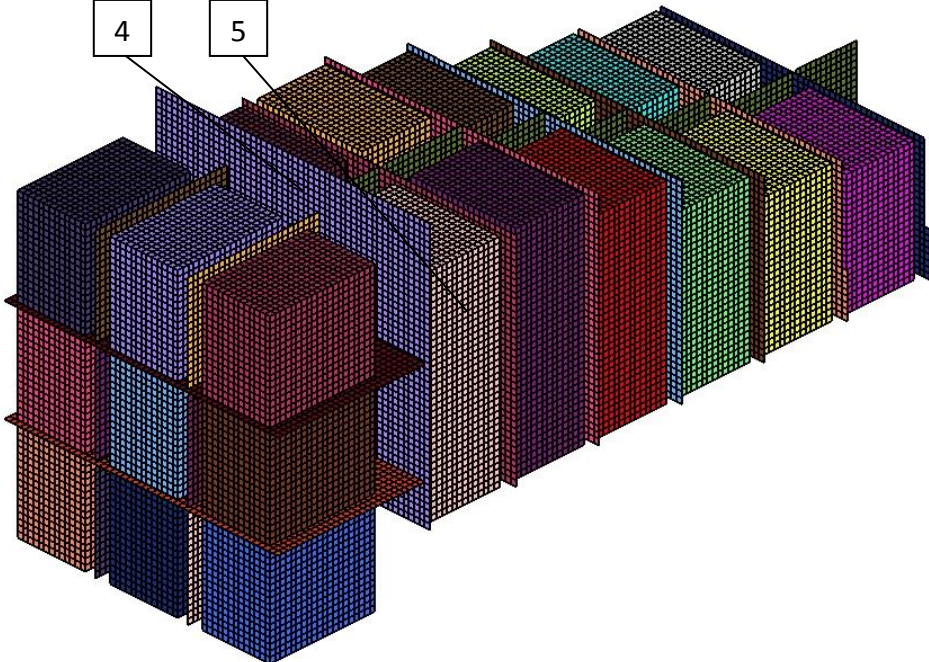


Abbildung 6-11: Hauptbestandteile des FE-Modells innen

6.3.2 Details Modellierung Batteriemodell

In diesem Kapitel werden die getroffenen Annahmen bzw. Vereinfachungen bei der Modellierung der Batterie beschrieben. Man entschloss sich auch hier zu Vereinfachungen, um die Modellerstellung bei diesen Prinzipuntersuchungen im Rahmen zu halten.

Modellierung der Lithium-Ionen-Polymer-Zellen

Die Lithium-Ionen-Polymer-Zellen werden zu Paketen zusammengefasst und miteinander verklebt. Auf der Seite der elektrischen Kontakte wird die nötige Elektronik in Form von Leiterplatten angebracht. Im FE-Modell wurden für die Zellenpakete Solid-Blöcke verwendet. Siehe hierfür Abbildung 6-12 und Abbildung 6-13.

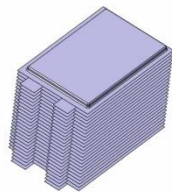


Abbildung 6-12: CAD-Batteriepaket



Abbildung 6-13: FE-Batteriepaket

Als Materialmodell wurde für eine erste Annäherung plastisches Verhalten nach dem Materialmodell `*MAT_PLASTICITY_WITH_DAMAGE (MAT_081)` verwendet. Es wurde, mangels Informationen, derselbe Werkstoff angenommen wie bereits bei den Längs- und Querträgern des Fahrzeugmodells. Die definierte wahre Spannungs-Dehnungskurve ist in Tabelle 6-6 ersichtlich. Dabei wurde nur die Dichte derart verändert, dass eine Zelle 420g – wie im Datenblatt angegeben – hat. Auf eine Berücksichtigung der Elektronik als Einfluss auf die errechnete Dichte wurde in diesem Stadium der Untersuchungen noch verzichtet. Die Ermittlung der Dichte ist in Berechnung (1) dargestellt. Hier wurde die Dichte für das abstrakte Batteriepaket aus Abbildung 6-13 berechnet. Es besteht aus 24 Zellen zu je 420g und hat ein Volumen von $4,436 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$. Die Werkstoffwerte sind Tabelle 6-2 zu entnehmen.

Tabelle 6-2: Materialwerte für den gewählten Batteriepaketwerkstoff

Dichte	E-Modul	Querkontraktionszahl	Streckgrenze
2.2723E-09 t/mm ³	2,100E+05 N/mm ²	0,3	369 N/mm ²

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{24 \times 0,420 \times 10^{-3}}{4,436 \times 10^6} = 2,2723 \times 10^{-9} \frac{t}{mm^3} \quad (1)$$

Zwischenplatten und deren Verbindungen

Die Batterie ist aus verschiedenen Fächern aufgebaut. Diese Fächer sollen das Batteriegehäuse verstärken und Deformationen verhindern, Abstände zwischen den Zellstapeln bewahren und damit elektrische Kontaktherstellung verhindern. Diese Wände und Böden wurden für diese Prinzipuntersuchungen als miteinander sowie mit dem Batteriegehäuse verschweißt angenommen. Die Schweißnähte sind aus Shell-Elementen modelliert, in Abbildung 6-14 kirschrot ausgeführt. Die Kammplatten – in Abbildung 6-14 in grün ausgeführt – sind im CAD-Modell von [16] noch nicht enthalten. Sie wurden vom Autor dieser Arbeit eingeführt, um dadurch der Konstruktion mehr Stabilität zu verleihen.

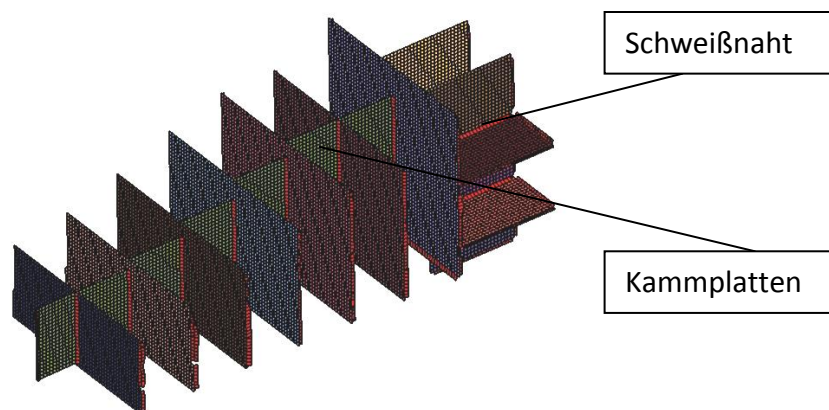


Abbildung 6-14: Zwischenplatten und Schweißverbindungen

Für die Platten wurde wiederum als Materialmodell *MAT_PLASTICITY_WITH_DAMAGE (MAT_081) verwendet. Die Werte sind völlig ident mit jenen des Materialmodells der Längs- und Querträger des Fahrgestells, deshalb wird hier nur auf Tabelle 6-5 und Tabelle 6-6 verwiesen.

Für die Schweißnähte wurde ebenfalls das oben beschriebene Modell verwendet. Sie wurden in diesem Stadium bezüglich Position und Form völlig frei gewählt. Die Stärke der Shell-Elemente wurde mit 7 mm angenommen.

Batteriegehäuse und Deckel

Das Batteriegehäuse und der Deckel wurden ebenso aus dem Materialmodell *MAT_PLASTICITY_WITH_DAMAGE (MAT_081) modelliert. Werte sind wiederum in Tabelle 6-5 und Tabelle 6-6 ersichtlich. Das Model wurde vom Autor dieser Arbeit mit einer Deckplatte als Deckel erweitert. Dieser Deckel war nötig, um der Batterieschachtel die nötige Steifigkeit zu geben. Als Verbindung zwischen Deckel und Gehäuse wurde abermals eine aus Shell-Elementen modellierte Schweißnaht gewählt. Material wurde auch hier dasselbe verwendet. Die Elementstärke wurde wieder mit 7 mm angenommen. Siehe dazu Abbildung 6-15.

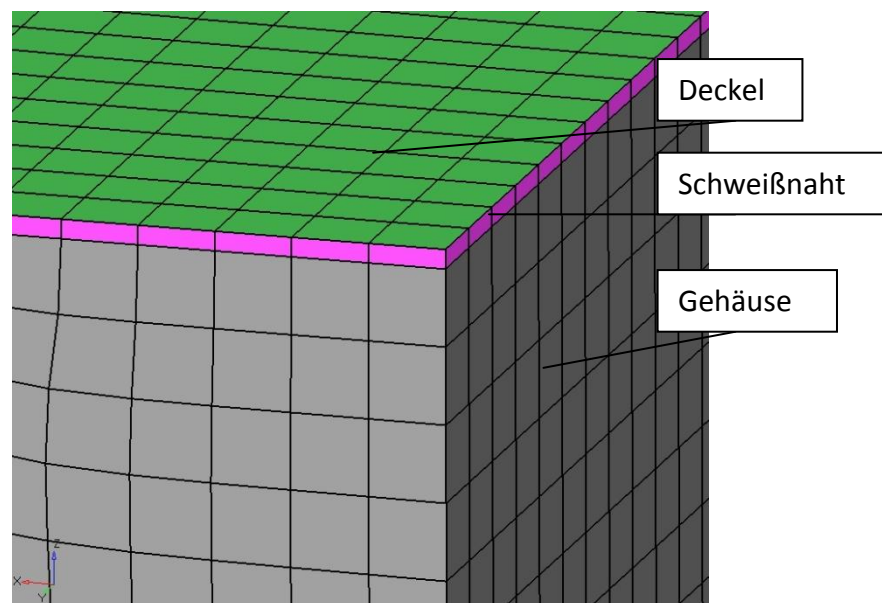


Abbildung 6-15: Gehäuse und Deckel

Batteriehalterungen

Im Batteriegehäuse wurden Löcher für die Batteriehalterungen vorgesehen. Diese Halterungen wurden, mangels Information und zum Zwecke einer einfachen und schnellen Modellierung für Prinzipsimulationen, vom Autor dieser Arbeit in einer ersten Annahme hinzugefügt. Die Befestigungen wurden als Solid-Elemente erstellt und mit dem Gehäuse verschweißt. Die Schweißnähte wurden wieder als Solid-Elemente mit einer Stärke von 7 mm ausgeführt. Für das Material der Befestigungen und der Schweißnaht wurde das Materialmodell *MAT_ELASTIC (MAT_001) verwendet, bei dem es kein Versagenskriterium gibt, da ein Versagen dieser fiktiven Verbindung für diese Prinzipuntersuchung nicht von Interesse war. Die gewählten Werte sind in Tabelle 6-3

ersichtlich. Die Befestigung ist in Abbildung 6-16 zu sehen. Die Verschweißung der Anbindung im Inneren des Batteriegehäuses ist in Abbildung 6-17 zu sehen. Bei der Schweißnaht handelt es sich um eine grobe Annahme, dabei wurde die Elementform noch nicht beachtet. Die tatsächliche Halterung hätte dann noch im Detail analysiert werden müssen.

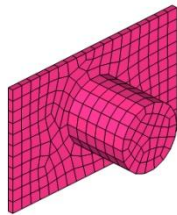


Abbildung 6-16: Batteriehalterung

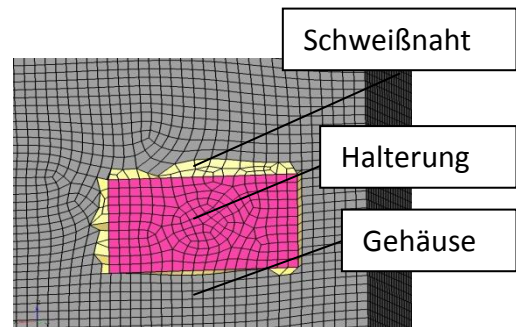


Abbildung 6-17: Batteriehalterung verschweißt

Tabelle 6-3: Materialwerte für die Batteriehalterung und deren Verschweißung

Dichte	E-Modul	Querkontraktionszahl
7.8500E-09 t/mm ³	2,100E+05 N/mm ²	0,3

6.4 Simulierte Lastfälle am Batteriemodell

Mit dem erstellten Batteriemodell wurden Simulationen auch ohne Integration ins Fahrzeugmodell durchgeführt. Dabei wurden zwei Versuchsreihen erstellt. Beide sind den Mechanical Tests des FreedomCar Abuse Test Manuals [7] sehr ähnlich bzw. an sie angelehnt.

6.4.1 Simulationsreihe I Mechanische Schocktests

Hier wurden die Batteriehalterungen mit dem Mid-1 Beschleunigungspuls aus [7] beaufschlagt. Siehe Tabelle 2-3. Das Batteriegehäusemodell hat diesen Tests ohne weitere Probleme standgehalten. Wobei die in Kapitel 6.3.2 genannten Annahmen zu berücksichtigen sind. Zum Beispiel sehr dicke Schweißnähte (7 mm), Batteriegehäuse aus einem Teil (das heißt ohne Schweißnähte) direkt verbunden und provisorische

Batterieanbindungen. Wie in Abbildung 6-18 ersichtlich, wurden diese Simulationen noch ohne die, ebenfalls in Kapitel 6.3.2 beschriebenen, Kammplatten durchgeführt.

Diese Simulation ist nicht kritisch für die Deformation des Gehäuses, sehr wohl aber für die elektrischen Kontakte bzw. Elektronikplatten der Batteriemodule, da bei dieser Modellkonstellation die Module im Gehäuse frei beweglich sind.

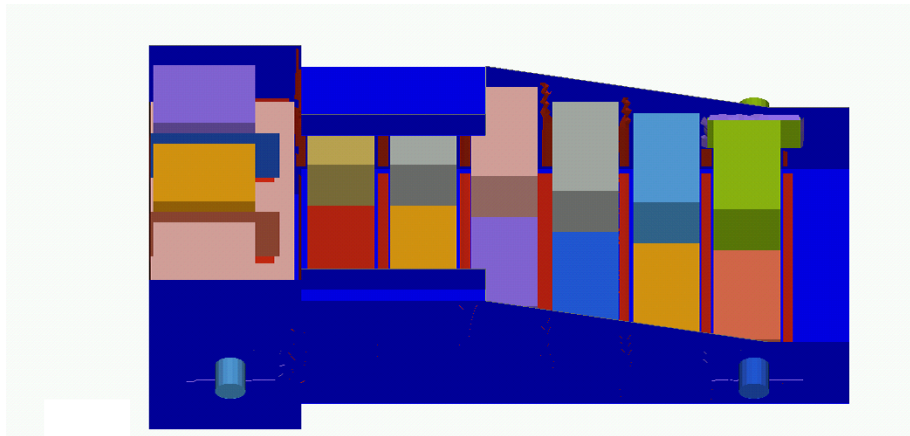


Abbildung 6-18: Ergebnis Mechanische Schocktests

6.4.2 Simulationsreihe II Drop Tests

Bei dieser Versuchsreihe wurde auch der Einsatz von Trapezblechen an der Batterie Vorderseite und den Trennwänden zur Aufprallenergieaufnahme simuliert. Die Trapezbleche sind in Abbildung 6-19 dargestellt. Die Trapeze konnten nicht größer ausgeführt werden, da sonst nicht mehr genügend Platz für die Lithium-Ionen-Polymer-Zellen zur Verfügung gestanden wäre.

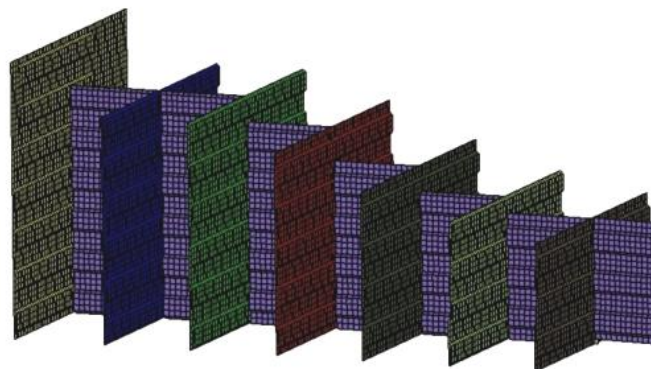


Abbildung 6-19: Trapezblech der Trennwände

Dieser Test wird im FreedomCar Abuse Test Manual [7] mit einem Zylinder (Radius: 150 mm) beschrieben. Der Wert für den Radius wurde fälschlicherweise gleich dem Durchmesser gesetzt. Dieser Fehler erhöhte die Belastung für die Batterie. Die Bewegung jedes Nodes des Zylinders wurde in allen sechs Freiheitsgraden gesperrt, was bedeutet, dass der Zylinder, wie in der Realität auch annähernd, komplett starr war. Bei dieser Versuchsreihe wurden auch die in Kapitel 6.3.2 bereits beschriebenen Kammlatten eingeführt. Die Simulationen wurden mit einer der maximalen Abwurfhöhe (10 m) äquivalenten Geschwindigkeit erstellt. Für die Ermittlung der Geschwindigkeit siehe Berechnung (2). Die äquivalente Geschwindigkeit berechnet sich aus der zeitfreien Gleichung, in der für die Beschleunigung die Erdschwerebeschleunigung und für den Weg die Abwurfhöhe eingesetzt wird. Das Ergebnis ist in Abbildung 6-20 zu sehen. Die Deformationen der Batterie sind erheblich. Es besteht die Gefahr eines Kurzschlusses und das Risiko eines eventuellen Feuers ist erheblich. Der Einfluss der eingeführten Trapezbleche war gering bzw. gar nicht feststellbar.

$$v = \sqrt{2 \times g \times h} = \sqrt{2 \times 9,81 \times 10} = 14,007\text{m/s} \quad (2)$$

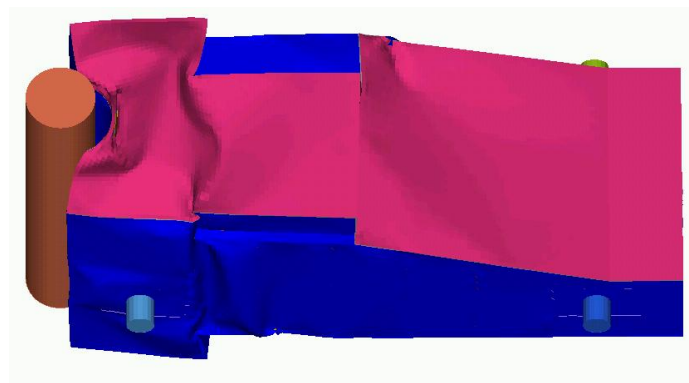


Abbildung 6-20: Ergebnis Drop Tests

6.5 Abstraktes Fahrzeugmodell

Als Ausgangslage für die Prinzipuntersuchungen wurden die zugekauften Iveco Plattformen in ihren Standardausführungen verwendet. Die spätere Niederflurkonstruktion wurde in diesem Stadium noch nicht berücksichtigt. Mithilfe von Fotos, Konstruktionszeichnungen von Iveco und Messungen wurde ein CAD-Modell der Plattform Iveco Daily 35 C 14 erstellt. Siehe dazu Abbildung 6-21 und Abbildung 6-22. Diese Plattform wird für den Bau des

kleineren Busses verwendet. Die Masse der Aufbauten wurde mithilfe von Massenpunkten realisiert. Siehe diesbezüglich Kapitel 6.5.2 unter dem Punkt Massenverteilung.



Abbildung 6-21: Iveco Daily 35 C 14 Plattform

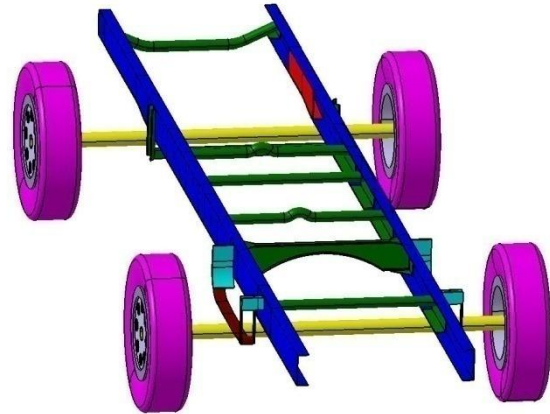


Abbildung 6-22: Iveco Daily 35 C 14 CAD-Modell

Dieses CAD-Modell diente zur Erstellung eines FE-Modells, das in Abbildung 6-23 dargestellt ist. Dabei wurde zuerst die Midsurface des CAD-Modells generiert und daraus das tatsächliche Simulationsmodell erstellt. Das Finite Elemente Modell besteht aus Shell-Elementen, Solid-Elementen, Rigids und Beams. Dies ergibt eine Elementanzahl von rund 70.000. Dieses FE-Modell wird für den größeren Bus einfach skaliert. Auf die Modellierung der Federung wurde verzichtet, siehe hierfür 6.5.2.

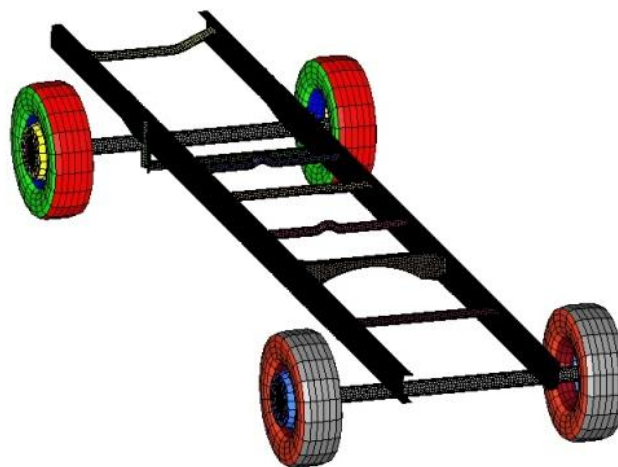


Abbildung 6-23: Iveco Daily 35 C 14 FE-Modell

6.5.1 Hauptbestandteile des FE-Modells

Die Hauptbestandteile sind Tabelle 6-4 und Abbildung 6-24 zu entnehmen.

Tabelle 6-4: Hauptbestandteile des FE-Modells

Positionsnummer	Anzahl	Bestandteil	Typ	Stärke
1	1	Querträger rund nach unten gebogen	Shell	3 mm
2	2	Längsträger	Shell	3 mm
3	2	Längsträgerverstärkungen	Shell	3 mm
4	1	Querträger quadratisch	Shell	3 mm
5	2	Querträger rund mit Biegung in der Mitte	Shell	3 mm
6	2	Querträger rund gerade	Shell	3 mm
7	4	Bereifte Räder	Gemischt	-
8	2	Achsen	Solid	-
9	1	Profilquerträger	Shell	3 mm

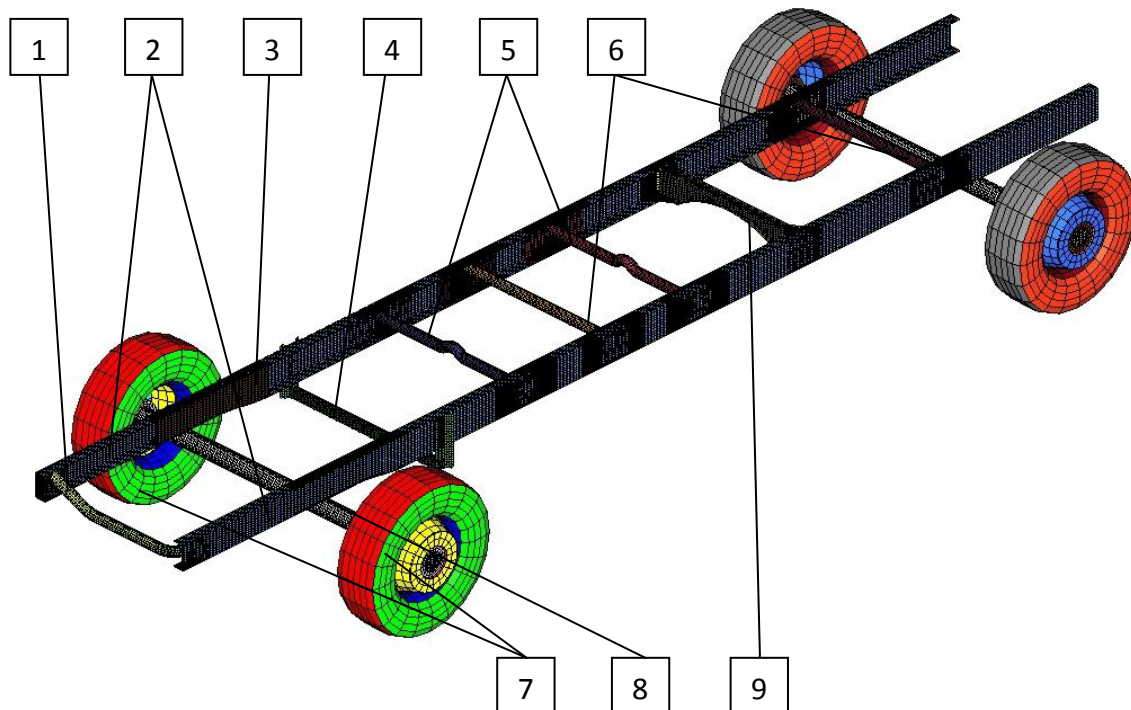


Abbildung 6-24: Hauptbestandteile des FE-Modells

6.5.2 Details Modellierung Fahrzeugmodell

In diesem Kapitel werden die getroffenen Annahmen bzw. Vereinfachungen bei der Modellierung des Fahrgestells beschrieben. Ziel bei diesen Simulationen war, prinzipielle Zusammenhänge zu ermitteln. Darum wurde das Modell mit möglichst wenig Aufwand erstellt.

Räder und Achsen

Räder und Achsen wurden nicht von den CAD-Daten übernommen, sondern dem bestehenden Modell eines LKW entnommen und entsprechend skaliert. Sie werden deshalb hier nicht beschrieben, es wird nur auf die European Standard EN-1317 Test Vehicle Models des Politecnico Milano verwiesen [23].

Längs- und Querträger

Für die Längsträger inklusive Längsträgerverstärkung und Querträger wurde das Materialmodell *MAT_PLASTICITY_WITH_DAMAGE (MAT_081) verwendet. Die Kennwerte sind Tabelle 6-5 zu entnehmen. Wobei in diesem Stadium auf die Formulierung eines Versagenskriteriums verzichtet wurde. Des Weiteren wurde eine wahre Spannungs-Dehnungskurve mit 8 Punkten definiert. Diese ist Tabelle 6-6 zu entnehmen. Bei wahren Spannungs-Dehnungskurven wird, im Vergleich zu technischen Spannungs-Dehnungskurven, die Querschnittsverjüngung der Probe mitberücksichtigt.

Tabelle 6-5: Materialwerte für den gewählten Längs- und Querträgerwerkstoff [22]

Dichte	E-Modul	Querkontraktionszahl	Streckgrenze
7,850E-09 t/mm ³	2,100E+05 N/mm ²	0,3	369 N/mm ²

Tabelle 6-6: Wahre Spannungs-Dehnungskurve für den gewählten Längs- und Querträgerwerkstoff [22]

	P 1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6	P 7	P 8
Wahre Dehnung	0.0	0.016	0.047	0.14	0.182	0.205	0.211	1.0
Wahre Spannung	369.0 N/mm ²	457.0 N/mm ²	472.0 N/mm ²	561.0 N/mm ²	583.0 N/mm ²	552.0 N/mm ²	494.0 N/mm ²	450.0 N/mm ²

Befestigung der Querträger an den Längsträgern

Die Querträger und auch die Längsträgerverstärkung werden bei den Ivecoplattformen mit Schrauben befestigt. Im Modell werden die Schrauben mithilfe von `*SECTION_BEAM` und `*CONSTRAINED_NODAL_RIGID_BODY` abgebildet. Dabei stellt der Beam den Schaft und das Gewinde dar und die Rigidspinnen bilden Mutter und Schraubenkopf ab. An jedem Ende des Beamelements befindet sich der zentrale Punkt der Rigidspinne von dem aus sich die Rigids zu den Nodes der zu verbindenden Bauteile erstrecken. Siehe hierzu Abbildung 6-25 und Abbildung 6-26. Dies stellt eine häufig gewählte Modellierung in Crashmodellen dar.

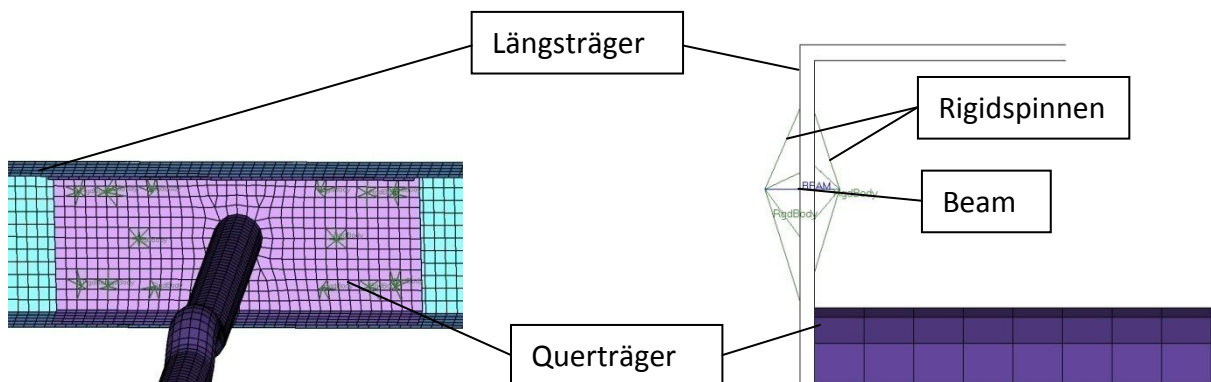


Abbildung 6-25: Befestigung Querträger

Abbildung 6-26: Befestigung Querträger Detail

Die Schrauben wurden als M16 angenommen. Es wurde das Materialmodell `*MAT_RESULTANT_PLASTICITY (MAT_28)` verwendet. Werkstoffkennwerte sind Tabelle 6-7 zu entnehmen. Der Modellierung wurde wenig Beachtung geschenkt und es wurde kein Versagenskriterium ermittelt, da es sich um eine bestehende Konsole handelte und von ausreichender Festigkeit ausgegangen wurde.

Tabelle 6-7: Materialwerte für den gewählten Schraubenwerkstoff

Dichte	E-Modul	Querkontraktionszahl	Streckgrenze
7,850E-09 t/mm ³	2,100E+05 N/mm ²	0,3	240 N/mm ²

Verbindung Längsträger Achsen

Die Verbindung zu den Achsen wurde mit `*CONSTRAINED_NODAL_RIGID_BODY` modelliert. Über einen gemeinsamen zentralen Punkt der beiden Spinnen wird die Achse mit dem Längsträger starr verbunden. Insgesamt ist jede Achse einmal mit jedem Längsträger

verbunden. Es werden also vier solcher Rigidspinnenpaare für die beiden Achsen benötigt. Auf die Modellierung der Federung und Dämpfung wurde verzichtet, weil die Modellierung einen zu großen Aufwand für eine Prinzipsimulation darstellt.

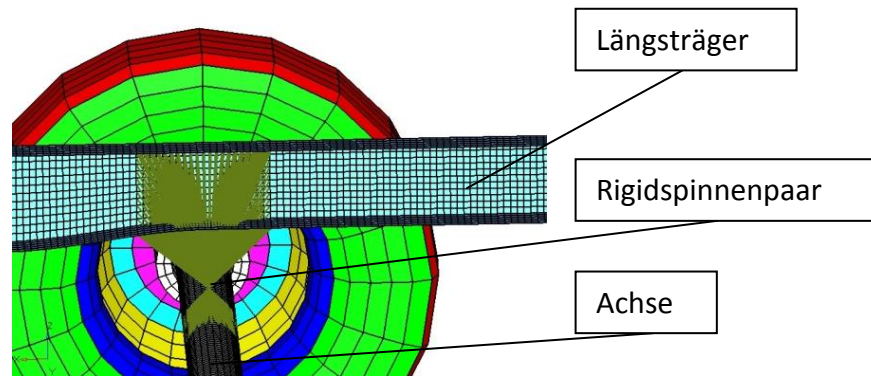


Abbildung 6-27: Iveco Daily 35 C 14 FE-Modell

Massenverteilung

Für die Massenverteilung wurde für den kleineren Bus ein Zielgewicht von rund 3,5 Tonnen inklusive Batterie über das Modell des Fahrgestells verteilt. Die angenommene Massenverteilung, dargestellt im CAD-Modell mit inkludierter Batterie, zeigt Abbildung 6-28.

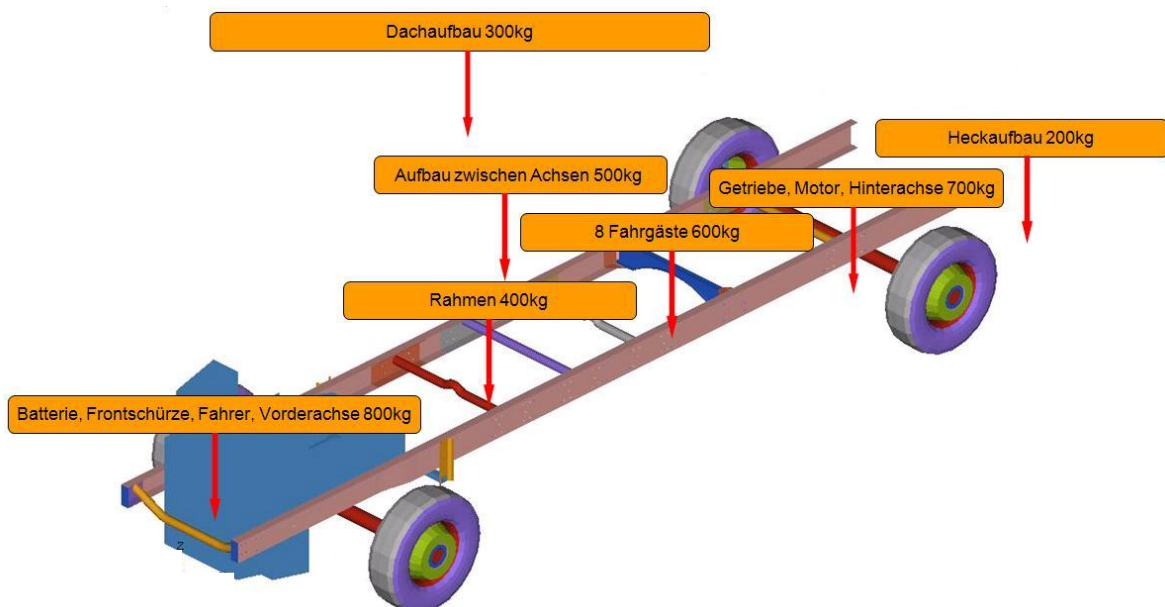


Abbildung 6-28: Angenommene Massenverteilung des kleineren Busses inklusive Batterie

Im FE-Modell wurde die Massenverteilung mittels der Funktionen `*CONSTRAINED_NODAL_RIGID_BODY` und `*ELEMENT_MASS` realisiert. Mittels

Rigidspinnen wurden Massenpunkte mit der Rahmenkonstruktion verbunden. Die Anordnung der Rigids und der Massenpunkte zeigt Abbildung 6-29. Mit diesem Modell wurden nur Betrachtungen im Frontbereich angestellt. Deshalb wurden im hinteren Bereich des Modells keine Deformationen erwartet und das FE-Modell konnte in diesem Bereich durch die starren Rigidverbindungen verstärkt werden.

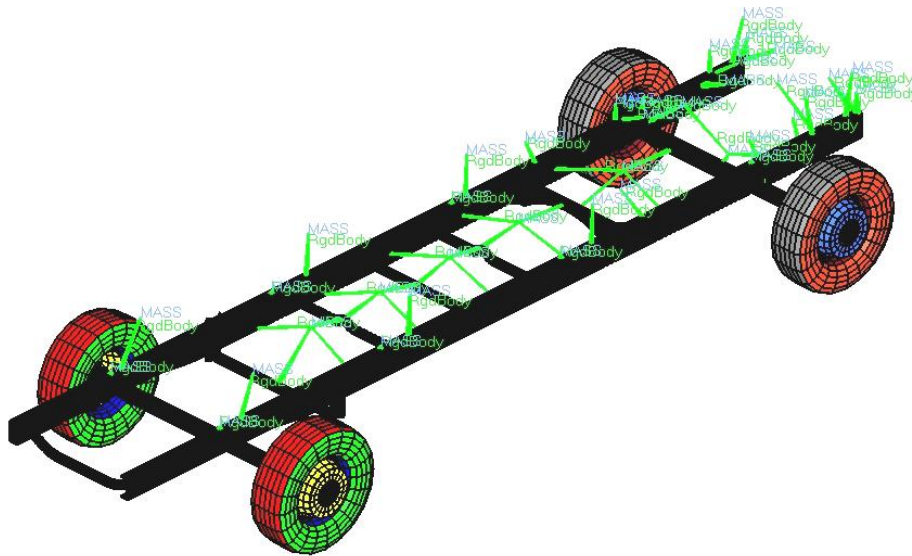


Abbildung 6-29: Anordnung der Rigids und Massenpunkte

6.6 Integration des Batteriemodells in das Fahrzeugmodell

Die Integration des Batteriemodells in das Fahrzeugmodell erfolgte mit Rigidspinnenpaaren. Jede Batteriehalterung wurde mit einem Rigidspinnenpaar mit den Längsträgern des Fahrzeugmodells verbunden. Diese Verbindung zwischen Längsträgern und Batteriehalterungen zeigt Abbildung 6-30. Bei dieser Integration gibt es keinen Formschluss zwischen der Batteriehalterung und den Fahrzeuglängsträgern. Dies ist zulässig, da es sich um eine Konzeptabschätzung handelt und dabei nur der Vorderbereich von Interesse ist.

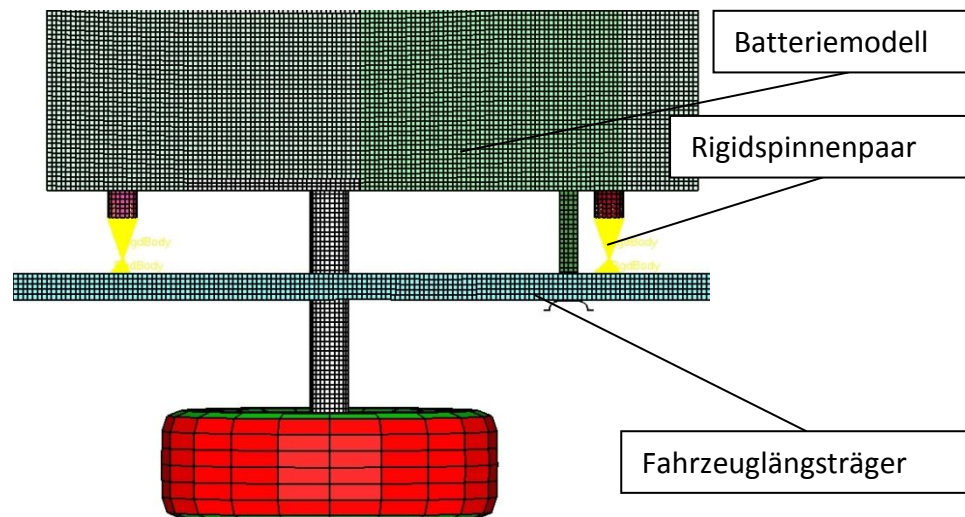


Abbildung 6-30: Integration des Batteriemodells

6.7 Kontakte im Gesamtmodell

Im Gesamtmodell, das heißt Fahrzeugmodell und integriertes Batteriemodell, sind zwei Kontakte definiert worden.

Alle Bauteile – mit Ausnahme der Reifen, Räder und Achsen – wurden in einem Part-Set zusammengefasst und mittels `*CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE_ID` ein Selbstkontakt für das Set definiert. Allgemein bekannte Standardwerte für diesen Kontakt sind Tabelle 2-1 zu entnehmen.

Das zweite Kontaktmodell ist `*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID`. Dieses stellt einen Kontakt zwischen dem oben beschriebenen Set und der völlig steifen Crashwand her. Die gewählten Standardwerte für diesen Kontakt sind Tabelle 6-8 zu entnehmen. Dabei wurde eine Ungenauigkeit in Kauf genommen, da diese Werte für Reibung von Stahl auf Stahl gelten. Der Einfluss dieser Ungenauigkeit auf die Untersuchung ist in diesem Fall vernachlässigbar.

Tabelle 6-8: Reibungswerte der Kontakte

Statischer Reibungskoeffizient	Dynamischer Reibungskoeffizient
0,2	0,1

6.8 Simulierte Lastfälle am Gesamtmodell

Tatsächlich simuliert wurden verschiedene Variationen des Lastfalles I. Mit Hilfe der Abänderungen wurde das Ergebnis plausibilisiert:

- Anprall frontal mit 56 km/h und 40 % Überdeckung gegen eine starre Wand
- Anprall frontal mit 56 km/h und 100 % Überdeckung gegen eine starre Wand
- Anprall mit 30°, mit 56 km/h und 100 % Überdeckung gegen eine starre Wand
- Anprall frontal mit 30 km/h und 40 % Überdeckung gegen eine starre Wand

6.8.1 Kriterien bei den Simulationsergebnissen für das Gesamtmodell

Bei diesem Fahrzeugmodell wurde bei den Simulationsergebnissen vor allem auf bleibende Deformationen der Batterie geachtet. Es wurde beschlossen, bei den gewählten Lastfällen keine Batteriedeformationen zuzulassen. Die bleibenden Verformungen des EESS werden als Kurzschlussgefährdung angesehen und dadurch erzeugen sie ein erhöhtes Brandrisiko.

6.8.2 Simulationsergebnisse für das Gesamtmodell

In der Abbildung 6-31 ist die Ausgangslage der Simulation – Anprall frontal mit 30 km/h und 40 % Überdeckung gegen eine starre Wand – dargestellt. Abbildung 6-32 zeigt das Ergebnis.

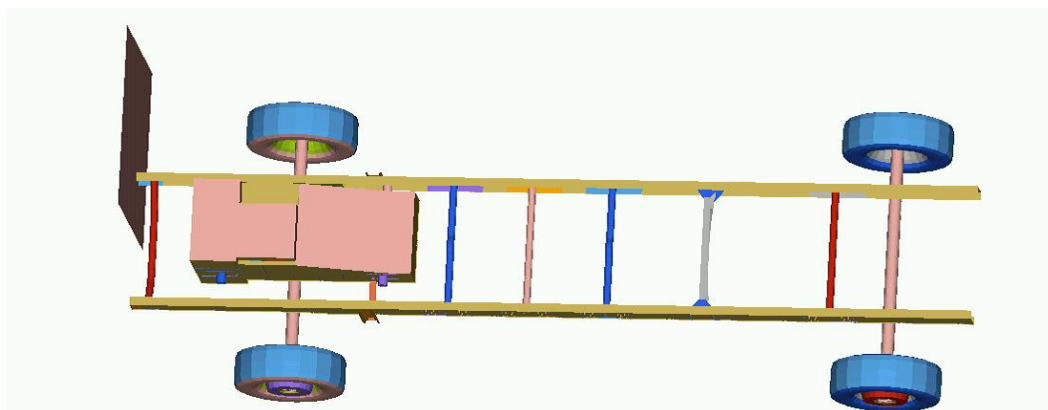


Abbildung 6-31: Ausgangslage 30 km/h und 40 % Überdeckung

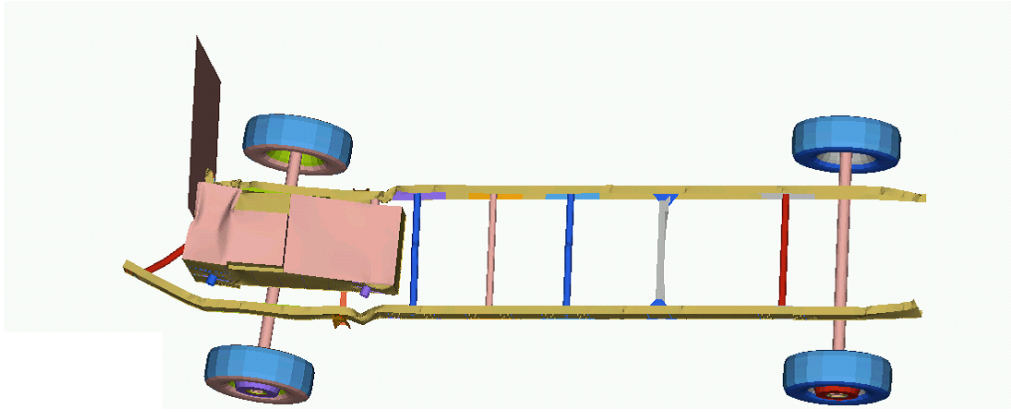


Abbildung 6-32: Ergebnis 30 km/h und 40 % Überdeckung

Obwohl das gezeigte Simulationsergebnis von der Simulation mit der geringsten Ausgangsgeschwindigkeit stammt, erkennt man deutlich die Deformationen der Batterie. Wie bereits in Kapitel 3 beschrieben, vermeiden Serienhersteller derzeit, soweit dem Autor dieser Arbeit bekannt, jegliche Batteriedeformation. Diese Verformung fällt in Wirklichkeit schlimmer aus, da die modellierten Zellenblöcke, abgesehen von der Dichte, dieselben Materialwerte wie Stahl haben. Dadurch nehmen diese modellierten Pakete die Energie mit wesentlich weniger Deformation auf und geben sie weiter. Man erkennt deutlich die Versteifungen am Längsträger, die durch die Rigidspinnen der Batteriebefestigung entstehen. Die Längsträger knicken im Endbereich der Verbindung mit den Rigidspinnen weg. In der Realität tritt dieses Phänomen nicht auf, da die Batterie formschlüssig mit dem Fahrgestell verbunden ist. Das Hauptaugenmerk bei dieser Simulation ist allerdings ohnehin auf vorne rechts zu richten.

Durch das Ergebnis wurde ersichtlich, dass die Batterie entweder an einer anderen Stelle verbaut werden muss, oder aber eine sehr stabile Schutzkonstruktion benötigt.

6.9 Plausibilisierung der FE-Ergebnisse

Um das Risiko eines Einbaus im ehemaligen Motorraum abschätzen und die Ergebnisse plausibilisieren zu können, wurde die Einbaulage im Bus – nach Plänen von [12] – mit Fotos von Crashtests verglichen. Dabei wurde das Batterie CAD-Modell maßstabsgetreu in eine Konstruktionszeichnung des Busses eingepasst, siehe Abbildung 6-33. Dies wurde dann mit Fotos von Tests an ähnlichen Fahrzeugen verglichen. In Abbildung 6-34 ist als Beispiel der NCAP Fronttest eines Mercedes Viano als Vergleich dargestellt. Aus den Bildern ist ersichtlich, dass sich die Batterie eindeutig in der Knautschzone befinden würde. Mögliche

Folgen eines Unfalls sind eine starke Beschädigung und Deformation der Batterie bei nachgiebiger Ausführung bzw. ein Zurückschieben der Batterie in den Fahrgastraum bei steifer Ausführung. Durch das Zurückschieben in Kombination mit Deformationen entsteht neben der Gefahr des Einklemmens eine weitere Gefährdung der Insassen: Das eventuelle Ausgasen der Lithium-Ionen-Polymer-Zellen in den Fahrgastraum. Die Zusammensetzung des Gases ist, dem Autor dieser Arbeit, nicht bekannt und kann für den Menschen giftig sein.

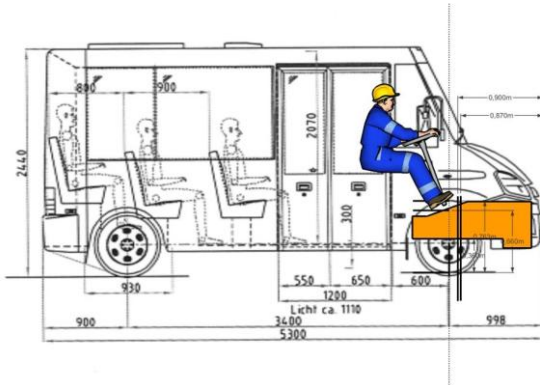


Abbildung 6-33: In Konstruktionszeichnung eingepasste Batterie



Abbildung 6-34: NCAP Fronttest Mercedes Viano [24]

6.10 Lösungsvorschläge aufgrund der FE-Ergebnisse

Da eine völlig steife Ausführung der Fahrzeugfront, also ein Verzicht auf jegliche Knautschzone an der Vorderseite, wenig bis keine Sicherheit für Unfallgegner, Insassen und Fußgänger bringen würde, und wahrscheinlich auch Probleme hinsichtlich des Gesamtgewichts hervorgerufen hätte, wurde über mögliche Schutzmechanismen recherchiert. Dabei standen besonders zwei Systeme, eventuell sogar in Kombination, zur Auswahl. Dies war einerseits die, in UN ECE 93 zu findende, Frontal Underrun Protection (Abbildung 6-35), wie sie bei LKW zur Vermeidung von Unterfahrten von PKW bei Unfällen zum Einsatz kommt. Dabei darf beim LKW nur eine definierte maximale Verformung zugelassen werden. Nach dem Erreichen des Verformungsweges muss die restliche Energie weitergeleitet werden (zum Beispiel in die Längsträger). Dieses System könnte in Kombination mit einer längeren Fahrzeugfront, zur Intrusionsvermeidung, zum Schutze der Batterie verwendet werden. Eine Alternative dazu war die Implementierung einer Crashbox (Abbildung 6-36) vor der Knautschzone. Diese Box kann im Falle eines Unfalls Energie durch Deformation abbauen und dadurch bleibt die Batterie unbeschädigt.



Abbildung 6-35: Frontal Underrun Protection System [25]

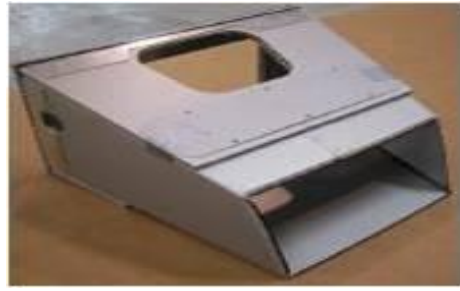


Abbildung 6-36: Crashbox des Gumbert Apollo [26]

6.11 Bewertung der Einbaulage im Motorraum

Die Möglichkeit des Einbaus im ehemaligen Motorraum ist nur mit erheblichem Mehraufwand hinsichtlich Projektdauer und -kosten zu realisieren. Selbst die Serienhersteller verzichten, soweit dem Autor dieser Arbeit bekannt, derzeit noch auf einen Einbau der Batterie in der Crashzone, obwohl dieser einige Vorteile (siehe Kapitel 5.1.5 auf Seite 36) mit sich bringt. Batteriedeformationen sind im Falle eines Frontcrash zu erwarten. Durch Kurzschluss und daraus resultierendes Ausgasen und Feuerentwicklung entsteht ein hohes Gefährdungspotential für den Menschen. Lithium-Ionen-Batterien finden erst seit kurzer Zeit Anwendung im Automotivbereich, und die Sicherheitsbedenken sind wegen mangelnder Erfahrung und noch nicht ausreichenden chemischen Sicherheitsvorkehrungen derzeit zu groß. Aus diesen Gründen scheint dieses Konzept für die Elektrobusse derzeit nicht geeignet.

7 Analyse Konzept 2 Batterie unter dem Niederflurboden

Dieser Einbauort wurde gewählt, da er sowohl sicherheitstechnisch in Bezug auf die Batterie, als auch für die Gesamtfahrzeugkonzeption die beste Lösung darstellt. Zur Beurteilung der Verkehrssicherheit wurde ein Finite Elemente Modell der Batterie erstellt. Mit Hilfe der CAD-Daten der Batterieanbindung im Fahrzeug wurden die Krafteinleitungsflächen der Batterie modelliert. Das Batteriemodell stammt von [16] und wurde von [27] nach den Fertigungsmöglichkeiten abgeändert. Mit dem FE-Modell wurden Lastfälle, angelehnt an die mechanischen Schocktests des FreedomCar Abuse Test Manuals [7], simuliert, um damit die nötige Sicherheit zu gewährleisten. Es wurden mehrere Berechnungsläufe durchgeführt, um damit die Ursprungs konstruktion crashtechnisch zu optimieren. Auf eine Simulation der Batterie im Gesamtfahrzeug musste mangels Konstruktionsplänen verzichtet werden. Die verwendete Software und Hardware ist im Anhang A beschrieben.

7.1 Abstraktes Batteriemodell

Die Batterie musste, wegen der Niederflurkonstruktion, der Einbaulage darunter und der nötigen Wechselbarkeit, möglichst nieder ausgeführt werden. Die geforderte Lithium-Ionen-Polymer-Zellenanzahl beläuft sich auf 720 Stück. Zusätzlich wurde ein leerer Platz als Reserve für zusätzliche Zellen eingeplant. Auf Basis dieser Konstruktion wurde durch Vernetzen ein FE-Modell erstellt. Das Finite Elemente Modell besteht aus Shell-Elementen, Solid-Elementen, Rigids und Beams. Das Modell besteht aus einer Elementanzahl von rund 138.000.

In Abbildung 7-1 sieht man das CAD-Modell und in Abbildung 7-2 das FE-Modell inklusive aller Verbesserungen für die nötige Crashsicherheit, die im Laufe der Simulationen appliziert wurden.

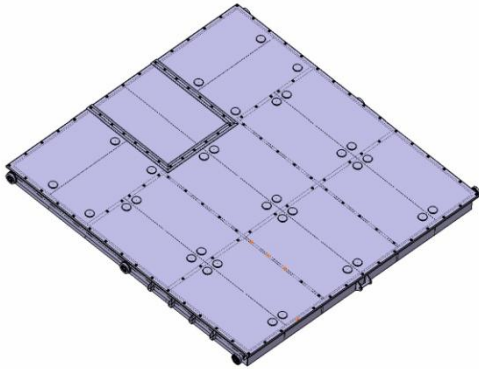


Abbildung 7-1: CAD-Batteriemodell



Abbildung 7-2: FE-Batteriemodell

7.1.1 Hauptbestandteile des FE-Batteriemodells

Die Hauptbestandteile sind Tabelle 7-1, Abbildung 7-3 und Abbildung 7-4 zu entnehmen.

Tabelle 7-1: Hauptbestandteile des FE-Batteriemodells

Positionsnummer	Anzahl	Bestandteil	Typ	Stärke
1	1	Batteriegehäuse	Shell	1,5-2 mm
2	1	Deckel groß	Shell	1,5-2 mm
3	1	Deckel klein	Shell	1,5-2 mm
4	2	Batterieträger	Shell	2 mm
5	15	Zellenmoduldummies	Shell	10 mm
6	30	Polycarbonatplatten	Shell	3 mm
7	11	Zwischenplatten	Shell	1,5-2 mm

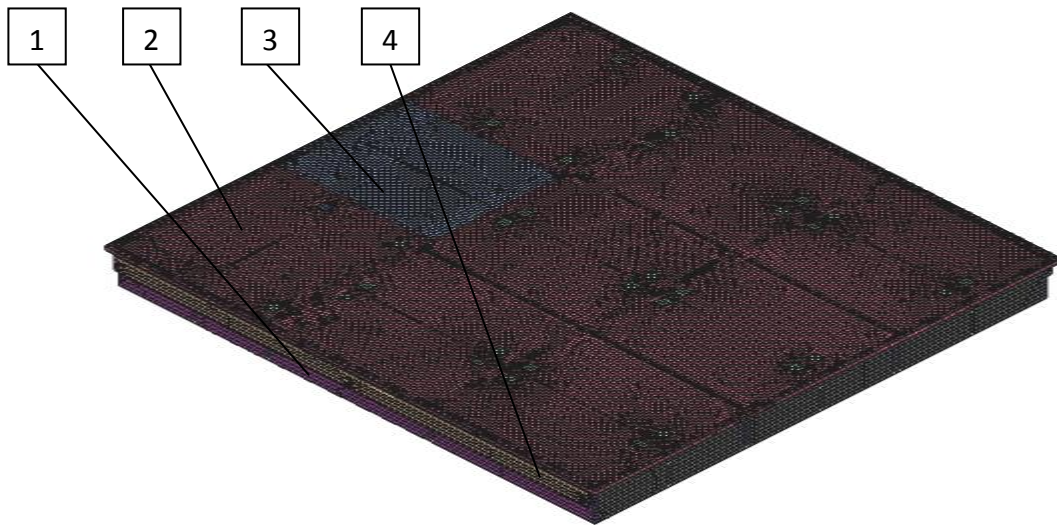


Abbildung 7-3: Hauptbestandteile des FE-Batteriemodells außen

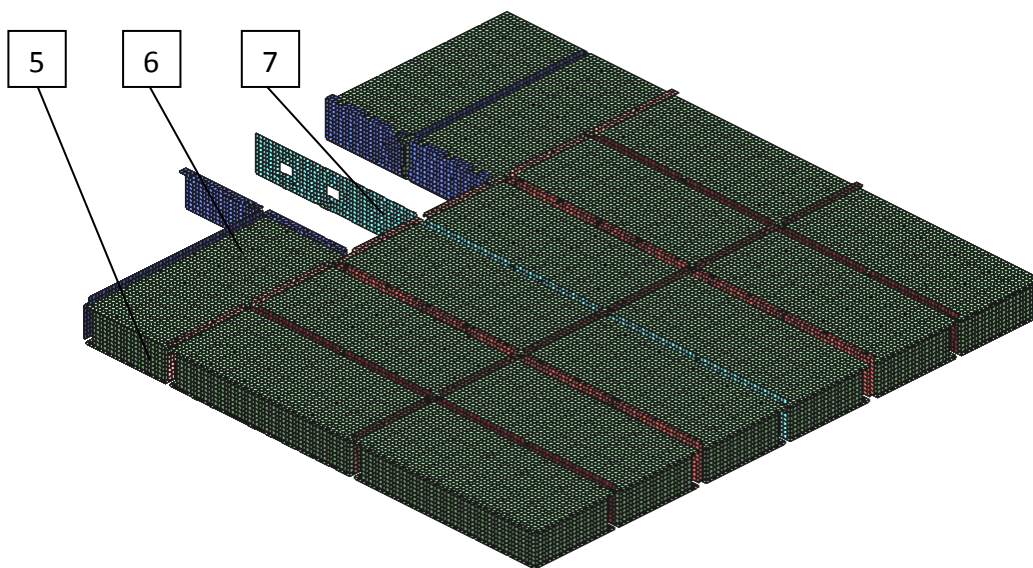


Abbildung 7-4: Hauptbestandteile des FE-Batteriemodells innen

7.1.2 Details Modellierung

In diesem Kapitel werden die getroffenen Annahmen bzw. Vereinfachungen bei der Modellierung der Batterie beschrieben.

Material für Batteriegehäuse

Der Werkstoff für das Batteriegehäuse ist laut Auskunft von [27] der austhenitische rostfreie Stahl EN 1.4301. Von [28] wurde auf Anfrage ein Werkstoffdatenblatt zur Verfügung gestellt, mit dem eine Materialkarte mit Versagenskriterium mittels dem Materialmodell *MAT_PLASTICITY_WITH_DAMAGE (MAT_081) erstellt werden konnte. Die Kennwerte sind Tabelle 7-2 zu entnehmen. Des Weiteren konnte mit den Informationen von [27] eine wahre Spannungs-Dehnungskurve mit 18 Punkten definiert werden. Diese ist Tabelle 7-3 zu entnehmen.

Tabelle 7-2: Materialwerte für EN 1.4301 [28]

Dichte	E-Modul	Querkontraktionszahl	Streckgrenze
7,900E-09t/mm ³	2,000E+05N/mm ²	0,3	290N/mm ²

Tabelle 7-3: Wahre Spannungs-Dehnungskurve für EN 1.4301 [28]

	P 1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6	P 7	P 8	P 9
Wahre Dehnung	0,020	0,049	0,068	0,095	0,140	0,182	0,223	0,262	0,300
Wahre Spannung	363,0 N/mm ²	428,0 N/mm ²	465,0 N/mm ²	519,0 N/mm ²	599,0 N/mm ²	667,0 N/mm ²	727,0 N/mm ²	780,0 N/mm ²	829,0 N/mm ²
	P 10	P 11	P 12	P 13	P 14	P 15	P 16	P 17	P 18
Wahre Dehnung	0,336	0,372	0,400	0,500	0,600	0,700	0,800	0,900	1,000
Wahre Spannung	872,0 N/mm ²	912,0 N/mm ²	941,0 N/mm ²	1045,0 N/mm ²	1140,0 N/mm ²	1228,0 N/mm ²	1311,0 N/mm ²	1389,0 N/mm ²	1463,0 N/mm ²

Dieses Materialmodell wurde für alle Bauteile, außer für die Polykarbonatplatten, Zellendummies und Schrauben verwendet. Die dort angewendeten Materialmodelle sind in den jeweiligen Unterpunkten explizit angeführt.

Entgasungslöcher

Am großen Batteriedeckel sind Entgasungslöcher angebracht, sodass bei einer eventuellen Entgasung einer oder mehrerer Zellen das entstehende Gas abströmen kann. Die nötige Anordnung und Größe dieser Löcher stammt von [16]. Diese Öffnungen sind in Wirklichkeit rund und mit einem Gummistoppel verschlossen, siehe CAD-Model in Abbildung 7-5. Um

einfacher modellieren zu können wurden quadratische Entgasungslöcher mit der Seitenlänge des Durchmessers verwendet (siehe Abbildung 7-6).

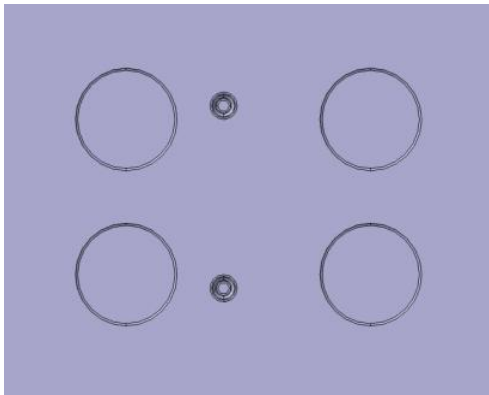


Abbildung 7-5: Entgasungslöcher mit Gummistoppeln

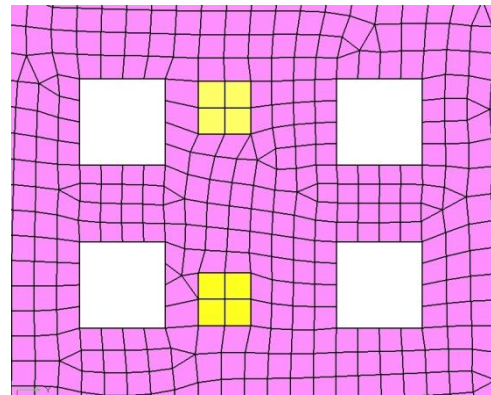


Abbildung 7-6: Entgasungslöcher im FE-Modell

Befestigung der Deckel

Die Deckel werden beim Original mit Schrauben an der Batterieschachtel befestigt. Im Modell werden die Schrauben mit Hilfe von `*SECTION_BEAM` und `*CONSTRAINED_NODAL_RIGID_BODY` abgebildet. Dabei stellt der Beam den Schaft und das Gewinde dar, und die Rigidspinnen bilden Mutter und Schraubenkopf ab. An jedem Ende des Beamelements befindet sich der zentrale Punkt der Rigidspinne von dem aus sich die Rigids zu den zu verbindenden Bauteilen erstrecken. Dies stellt eine in der Crashberechnung häufig angewandte Modellierungstechnik dar. In Abbildung 7-7 erkennt man die Schraubenpositionen an den Deckeln in Form der gelben Quadrate. Die Schraubenflächen haben eine andere Farbe und sind in einer anderen Komponente organisiert, um die Modellierung einfacher und übersichtlicher zu gestalten. Außerdem sind sie beim Postprocessing sofort erkennbar. In Abbildung 7-8 sieht man eine Schraubenverbindung im Detail.

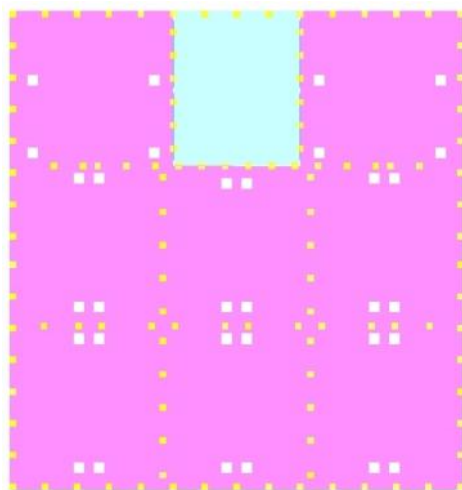


Abbildung 7-7: Positionen der Schrauben

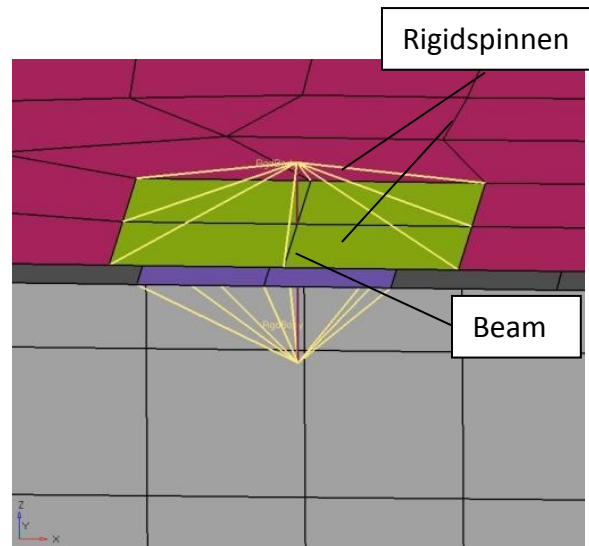


Abbildung 7-8: Detail Schraubenverbindung Deckel

Die Schrauben wurden mit M6 und der Festigkeitsklasse 10.9 angenommen. Es wurde das Materialmodell *MAT_SPOTWELD (MAT_100) verwendet. Werkstoffkennwerte sind Tabelle 7-4 zu entnehmen.

Tabelle 7-4: Materialwerte für den gewählten Schraubenwerkstoff

Dichte	E-Modul	Querkontraktionszahl	Streckgrenze
7,850E-09 t/mm ³	2,100E+05 N/mm ²	0,3	900 N/mm ²

Ein weiteres Detail ist die Befestigung der Deckel am Übergang zwischen großem und kleinem Deckel. Hier werden die beiden Deckel über gemeinsame Schrauben mit einer Schiene befestigt. Ein Bild vom CAD-Modell mit dem kleinen Deckel, Schiene und Übergang zum großen Deckel ist in Abbildung 7-9 zu sehen. Die Modellierung erfolgte auch hier mit Rigidspinnen und Beams, wobei in diesem Falle die Rigidspinnen beide Deckel miteinander verbinden, siehe dazu Abbildung 7-10 bzw. im Detail Abbildung 7-11. Zwischen den beiden Deckeln wurde im Modell ein Abstand von 1 mm gehalten. Es wurde mit der Annahme simuliert, dass die Schrauben halten, da diese Menge an Schrauben bedeutend mehr Stabilität aufweist als der Falz der Batterieschachtel bzw. der Zwischenwände.

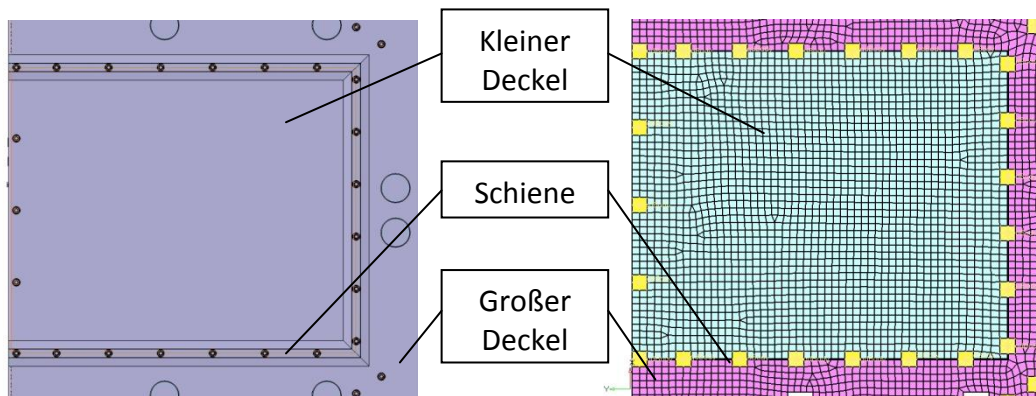


Abbildung 7-9: Befestigung kleiner Deckel großer Deckel CAD-Modell

Abbildung 7-10: Befestigung kleiner Deckel großer Deckel FE-Modell

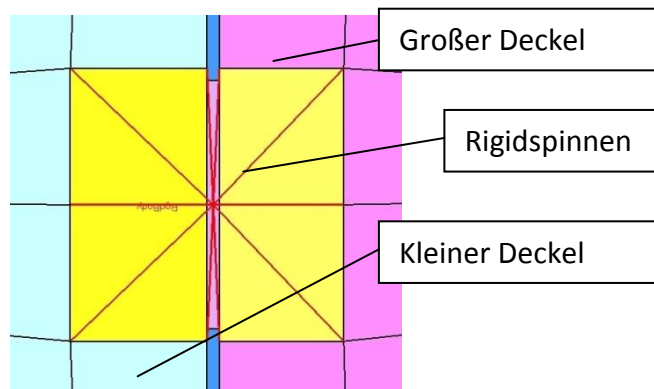


Abbildung 7-11: Detail Befestigung kleiner Deckel großer Deckel FE-Modell

Außenschachtel

Die Außenschachtel wird, da sie aus einer abwickelbaren Fläche besteht, aus einem Stück gefertigt. Das heißt die Seitenwände werden aufgebogen und dann an den neu entstehenden Ecken verschweißt. An der Oberseite wird noch ein Falz für die Deckelverschraubung nach außen gebogen. Im FE-Modell wurden die Biegeradien vernachlässigt und eine scharfe Kante angenommen. Runde Ausparungen für die Batterierollenachsen, die beim Wechselvorgang benötigt werden, sind im Simulationsmodell auch hier quadratisch mit dem Durchmesser als Seitenlänge ausgeführt. Die Unterschiede zwischen CAD- und FE-Modell sieht man in Abbildung 7-12 und Abbildung 7-13.

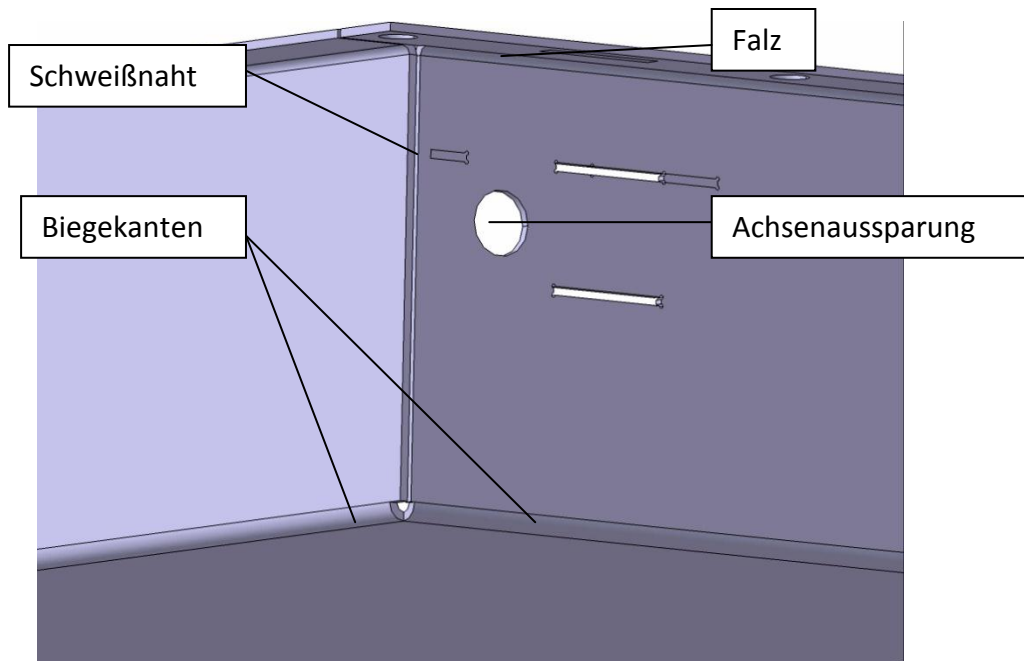


Abbildung 7-12: Außenschachtel CAD-Modell

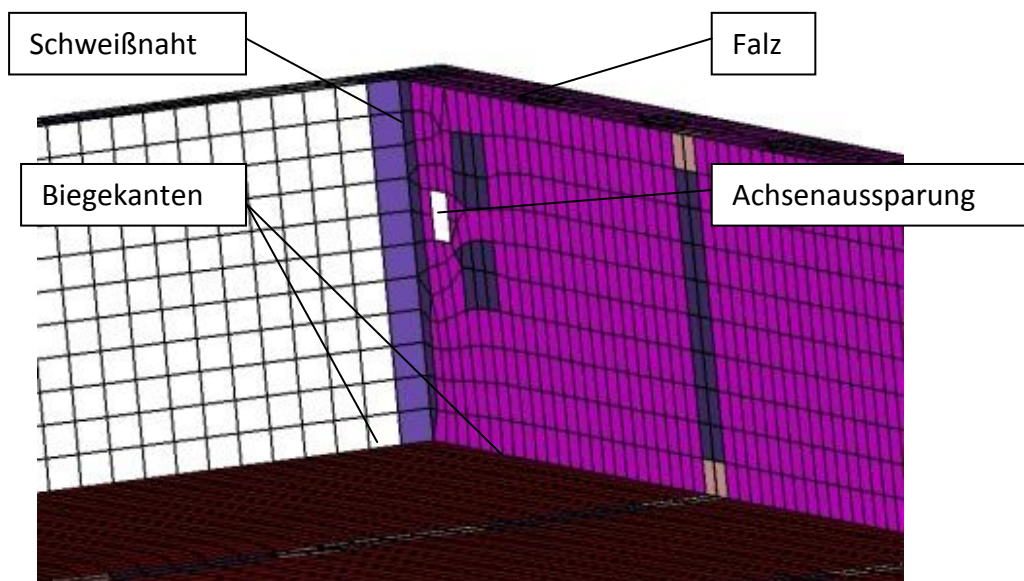


Abbildung 7-13: Außenschachtel FE-Modell

Zwischenplatten und Schweißnahtmodellierung

In die Schachtel sind Nuten lasergeschnitten (Abbildung 7-14), in die dann die mit Falzen versehenen Zwischenplatten gesteckt werden. Die Nuten werden von außen mit den Falzen verschweißt. Die Platten sind untereinander ebenfalls zusammengesteckt. Dabei sind sie jeweils entgegengesetzt bis zur Hälfte mit einer Nut ausgeführt und auch verschweißt. So verschweißt kommt es im Inneren zu fast keinem Platzverlust durch Schweißnähte. Nur in den Ecken der Batteriemodulfächer, wo sich zwei Zwischenplatten schneiden, geht ein wenig

Platz (Abstützfläche für die Polykarbonatplatten) durch die Schweißverbindung verloren. Die Zwischenplatten sind für die Deckelbefestigung entweder mit Falz, teilweise doppelwandig oder ohne Falz ausgeführt und haben Aussparungen für die elektrischen Kabel.

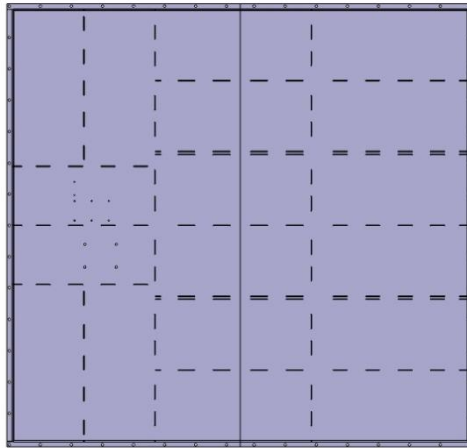


Abbildung 7-14: Außenschachtel mit Nuten CAD-Modell

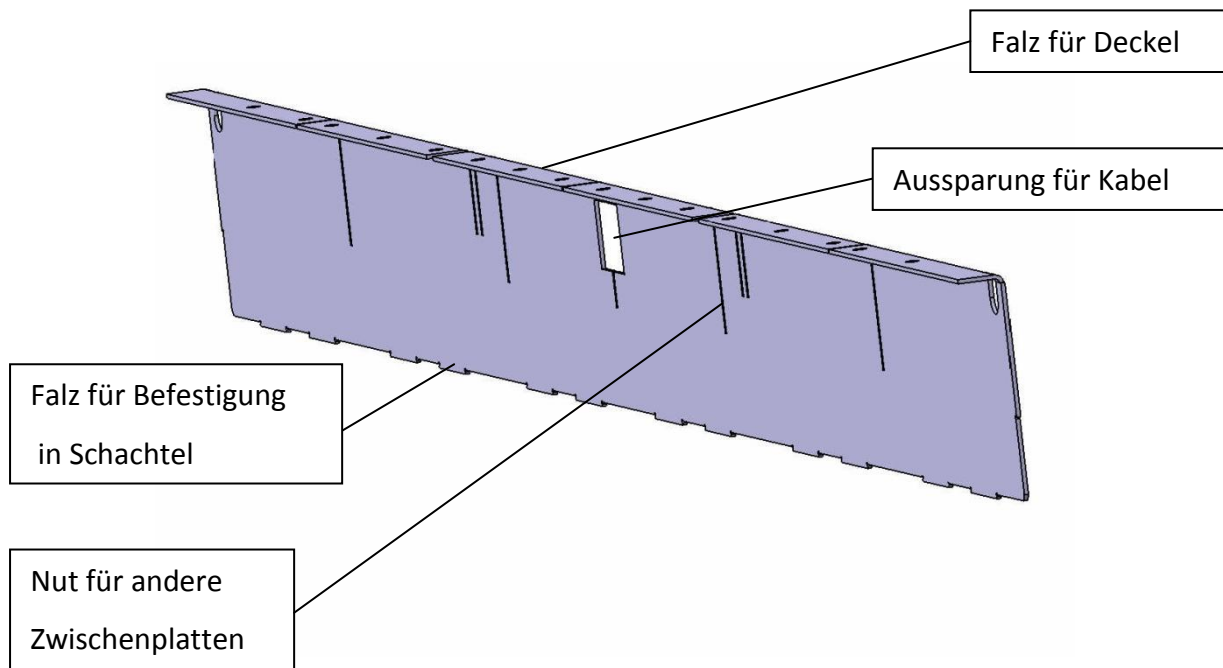


Abbildung 7-15: Zwischenplatte CAD-Modell

Im FE-Modell wurden die verschweißten Nut-Falzverbindungen durch äquivalente Nodes in diesen Bereichen modelliert. Auf die Modellierung der Nuten wurde verzichtet. Diese Vereinfachung ist deshalb zulässig, da die Belastung auf den Falz höher ist als auf die ohnehin durch die Nut-Falzverbindungen gestützten Schweißnähte. Diese Modellierung wurde realisiert indem zwei Komponenten, „verschweisst“ und „nicht_verschweisst“, erstellt

wurden. In den Kollektor „verschweisst“ kamen alle Elemente, die in dem Bereich sind, in dem sich in Wirklichkeit die Nuten bzw. Falze befinden. Die Nodes wurden hier äquivalent gesetzt. Im anderen Kollektor „nicht_verschweisst“ wurde darauf geachtet, dass die Punkte nicht ident sind. In Abbildung 7-16 und Abbildung 7-17 ist die Komponente „verschweisst“ violett und die Komponente „nicht_verschweisst“ beige ausgeführt.

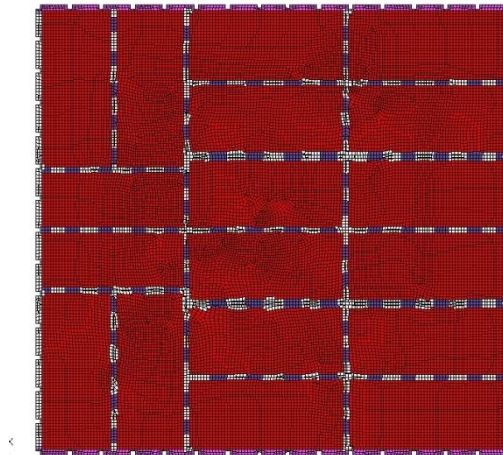


Abbildung 7-16: Außenschachtel mit Nuten FE-Modell

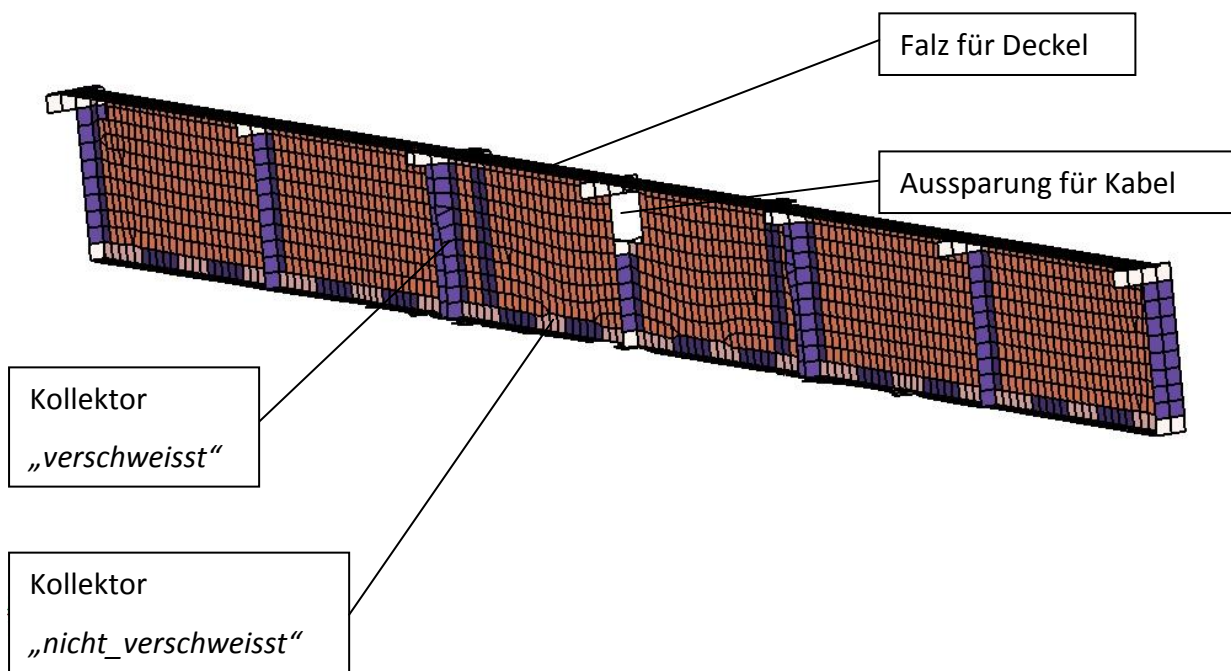


Abbildung 7-17: Zwischenplatte FE-Modell

Batterieträger

Für den Wechselvorgang sind an der Batterie Rollen mit Achsen montiert. Da die Achsen und die Rollen als nicht crashrelevant angesehen wurden, ist auf eine Modellierung verzichtet worden. Die beiden Träger auf dem die Achsen montiert sind, sind aber sehr wohl

crashrelevant und mussten daher modelliert werden. Die Träger sind U-Profile mit einem Zwischenflansch in der Mitte und werden am unteren Flansch und am Zwischenflansch wiederum mit der oben beschriebenen Nut-Falzverbindung am Gehäuse befestigt. Auch hier wurde bei der Erstellung des Simulationsmodells wieder die oben erwähnte Komponente „*verschweisst*“ verwendet. Die Komponente „*nicht_verschweisst*“ wurde nicht benutzt, da durch einen definierten Kontakt zwischen Gehäuse und Träger an den nicht verschweißten Stellen ohnehin Abstand gehalten werden musste. Dies resultiert aus einer Kontaktbedingung zwischen dem Gehäuse und den Trägern, dem virtuellen Aufdicken der Shell-Elemente der Batterieschachtel bei der Simulation und der Vermeidung einer Initial Penetration. Am oberen Flansch wird der Träger über die Deckelbefestigungsschrauben mit dem Deckelbefestigungsfalz der Batterieschachtel verschraubt. Hier wurde die Rigidspinne der Schraubenunterseite direkt mit dem Träger verbunden. Auf die Modellierung der Biegeradien des U-Trägers ist verzichtet worden, es wurde eine rechtwinkelige Ecke angenommen. Ebenfalls wurde auf die Modellierung der Befestigung des Zwischenflanschs am U-Träger, welche auch mit einer Nut-Falzverbindung realisiert wurde, verzichtet. Der Träger wurde von [27] noch einmal überarbeitet. In Abbildung 7-18 und Abbildung 7-19 sieht man die letzte Version des Trägers im CAD- bzw. FE-Modell. Die nötigen Änderungen des Trägers werden in Kapitel 7.4.3 auf Seite 89 beschrieben.

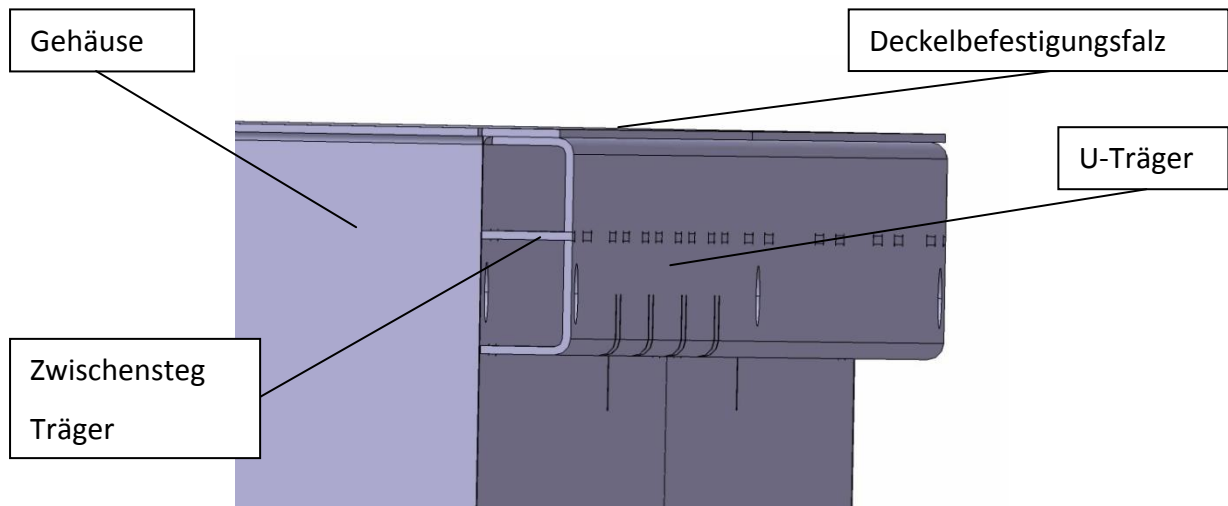


Abbildung 7-18: Träger am Gehäuse CAD-Modell

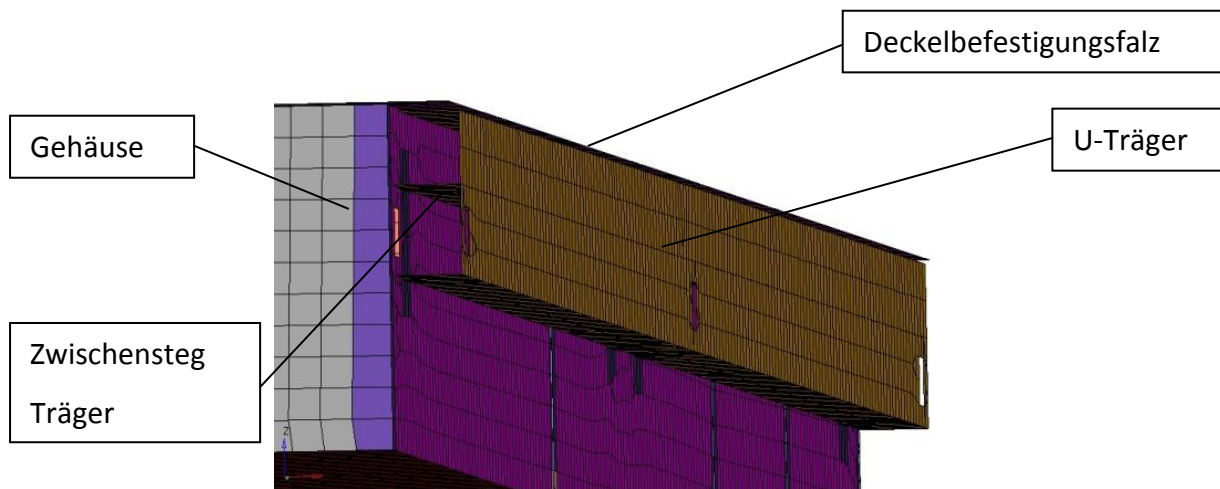


Abbildung 7-19: Träger am Gehäuse FE-Modell

Batteriedummies

Auf eine Ausmodellierung der miteinander verklebten Zellenpakete wurde verzichtet. Stattdessen wurden in der Simulation Batteriedummies eingesetzt. Jedes Modul mit 4x12 Zellen und Elektronik wurde zu einem Dummy zusammengefasst. Die Simulation sollte nur der Gewährleistung ausreichender Stabilität des Batteriegehäuses dienen. Die Crashesicherheit der Lithium-Ionen-Zellen und der Klebeflächen dazwischen ist durch Versuche ermittelt worden. Siehe hierzu Kapitel 8 auf Seite 98. Die Dummies wurden aus Shell-Elementen erzeugt. Hierfür wurden nur die umschließenden Seitenflächen verwendet und dadurch entstand eine Art Rahmen (siehe Abbildung 7-20). Bei der Simulation durfte es zu keiner Deformation des Gehäuses kommen, damit die Zellen nicht beschädigt werden. Die

Batteriedummies stellen nur eine Last für die Simulation dar, um Trägheitskräfte auf das Batteriegehäuse wirken zu lassen.

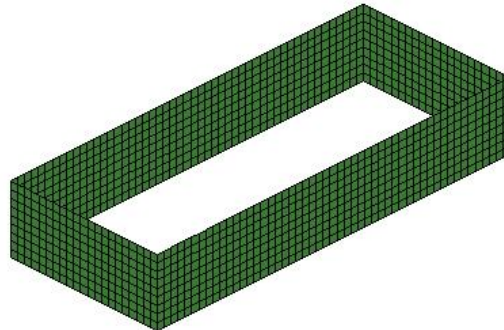


Abbildung 7-20: Batteriedummie FE-Modell

Die Dicke der Elemente wurde mit 10 mm angenommen. Aus der Stärke und dem Gewicht eines Moduls inklusive Elektronik wurde eine Dichte für das Materialmodell *MAT_PLASTICITY_WITH_DAMAGE (MAT_081) errechnet. Es wurde derselbe Werkstoff angenommen wie bereits bei den Längs- und Querträgern des Fahrzeugmodells in Kapitel 6.5. Die definierte wahre Spannungs-Dehnungskurve ist in Tabelle 6-6 auf Seite 58 ersichtlich, die restlichen Materialwerte in Tabelle 7-5. Es wurde die Dichte derart verändert, dass eine Zelle 420g – wie im Datenblatt angegeben – hat. Der Einfluss der eingebauten Elektronik und der elektrischen Kabel auf die Dichte wurde mit einem 15 prozentigen Gewichtsaufschlag berücksichtigt. Die Ermittlung der Modulmasse ist in Berechnung (3) dargestellt. Sie setzt sich aus 48 Zellen zu 420g plus dem oben beschriebenen Aufschlag zusammen. Die Dichte wurde mit Hilfe des von HyperMesh berechneten Volumens berechnet (Berechnung (4)).

Tabelle 7-5: Materialwerte für den Batteriedummiewerkstoff

Dichte	E-Modul	Querkontraktionszahl	Streckgrenze
1,751E-08 t/mm ³	2,100E+05 N/mm ²	0,3	369 N/mm ²

$$m = 0,420 \times 10^{-3} \times 12 \times 4 \times 1,15 \cong 2,32 \times 10^{-2} t \quad (3)$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{2,32 \times 10^{-2}}{1,325 \times 10^6} \cong 1,751 \times 10^{-8} \frac{t}{mm^3} \quad (4)$$

Polykarbonatplatten

Jedes Modul ist auf allen sechs Seiten mindestens von einer, teils auch von mehreren Polykarbonatplatten umgeben. Wobei nur die Platten oberhalb und unterhalb der Module bei diesen Simulationen crashrelevant sind und als Schutzkonstruktion für die Zellen und die Elektronik dienen. Sie haben eine Stärke von 3 mm und sind mit den Zellen verklebt. Im Simulationsmodell sind die berührenden Nodes zwischen dem Batteriedummie und dem Polykarbonat äquivalent gesetzt. Dies stellt die Klebeverbindung dar. Damit der PC-Schutz, der aus Shell-Elementen besteht, die Kräfte in das Gehäuse einleiten kann, sind die Ränder um 90 Grad nach innen gebogen. Einen Batteriedummie im FE-Modell inklusive Polykarbonatplatten, als Deckel und Unterseite, sieht man in Abbildung 7-21.

Die anderen Platten dienen als elektrische Schutzisolation zur Gehäusewand oder als Einsetzhilfe der Zellen beim Batteriezusammenbau (siehe Punkt „Sylomer-Schaumstoff“). Diese Platten, bei Beschleunigung ohne Crashrelevanz, wurden bei der Simulationsmodellerstellung vernachlässigt.

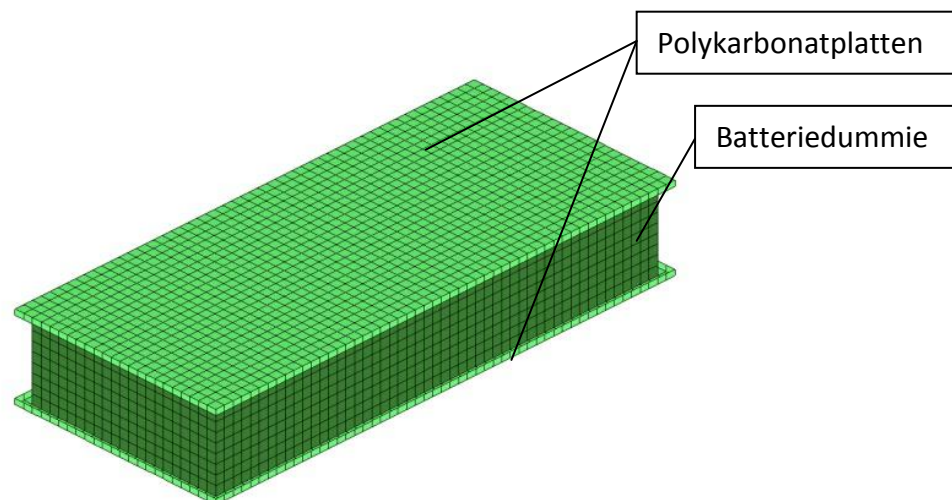


Abbildung 7-21: Batteriedummie mit PC-Schutz FE-Modell

Auch die Crashesicherheit der Polykarbonatplatten und die Haltbarkeit der Klebeflächen mit den Batteriezellen wurden im Versuch ermittelt. Aus diesem Grund konnte bei den Simulationen auf Aussparungen der Platten, wie sie in Wirklichkeit für Kabeldurchführungen nötig sind, verzichtet werden.

Die Crashesicherheit der Module inklusive Schutzeinrichtungen wurde im Versuch ermittelt. Dabei wurden keine Intrusionen bzw. Penetrationen überprüft, jedoch stellen die

Polykarbonatplatten, die um jedes Modul angebracht sind, einen Penetrationsschutz dar. Vor Penetration ist die Batterie zusätzlich durch ihre zentrale Einbaulage geschützt.

Im FE-Modell wurden erneut Materialwerte und Materialmodell wie bei den Batteriedummies (Baustahl) verwendet. Lediglich die Dichte wurde wiederum Polykarbonat entsprechend angepasst [16]. Das bedeutet, dass die Einleitung der Trägheitskräfte zu steif modelliert wurde. Dies wiegt im Modell aber schwerer als in Realität.

Tabelle 7-6: Materialwerte für die Polykarbonatplatten

Dichte	E-Modul	Querkontraktionszahl	Streckgrenze
1,200E-09 t/mm ³	2,100E+05 N/mm ²	0,3	369 N/mm ²

Sylomer-Schaumstoff

Laut [16] wird dauerelastischer Sylomer-Schaumstoff der Firma Getzner in der Batterie verbaut. Dieser Schaumstoff wird über den Lithium-Ionen-Zellen-Modulen und auf einer Seite der Module verbaut. Seitlich wird er zwischen zwei Polykarbonatplatten eingeführt, um den Platz, der für das Einlegen der Zellen benötigt wird, auszufüllen und um den Modulen Halt im Gehäuse zu geben. Oberhalb wird er zwischen Deckel und den oberen Polykarbonatplatten der Module eingelegt, um die Module mittels Pressung durch die Deckelverschraubung zu fixieren. In Abbildung 7-22 sieht man den verwendeten Sylomer-Schaumstoff SR11 in verschiedenen Stärken. Der komplette Aufbau eines Moduls inklusive Polykarbonat und dauerelastischen Schaumstoff ist im Anhang ab Seite 117 dargestellt. Auf die Modellierung des Schaumstoffes wurde verzichtet. Die Module konnten im FE-Gehäuse, nur durch die auftretende Reibung beeinflusst, hin und her rutschen.



Abbildung 7-22: Sylomer-Schaumstoff

7.2 Abstrakte Batteriehalterungen

Die abstrakten Batteriehalterungen bzw. die Flächen, über die eine eventuelle Beschleunigung bzw. Kraft in die Batterie eingeleitet wird, sind aus jenen Bauteilen der Batteriebefestigung im Fahrzeug abgeleitet, die den elektrischen Energiespeicher in Position halten. Der Rest der Batteriebefestigung wurde wegen geringer Crashrelevanz nicht modelliert. In Abbildung 7-23 ist die Draufsicht auf das CAD-Modell der Batteriehalterung abgebildet. Die Teile mit direktem Batteriekontakt sind rot umrandet. Die Befestigung ist mit der Fahrtrichtung nach oben dargestellt siehe Pfeil. Auf der linken Seite, also ausschubseitig, ist der Verschlussmechanismus zu erkennen. Die Batterie wird dort auf der ganzen Länge am Deckelfalz befestigt. Auf der rechten Seite wird die Batterie durch ein L-Profil vollflächig an der Unterkante gehalten. In den roten Kreisen befinden sich noch Zentrierhilfen fürs Einführen der Batterie und für den Einsteckvorgang. Diese geben longitudinale Kräfte bzw. Beschleunigungen an die Batterie weiter. In bzw. gegen die Fahrtrichtung fixieren jedoch hauptsächlich die vier kleineren, nicht vollflächig ausgeführten Halterungen, die wiederum am Deckelfalz angreifen. Der Deckelfalz wird hier auf relativ kleiner Fläche belastet und wird daher mit dem zuvor beschriebenen Batterieträger gestützt. Genaueres in Kapitel 7.4.3 auf Seite 89.

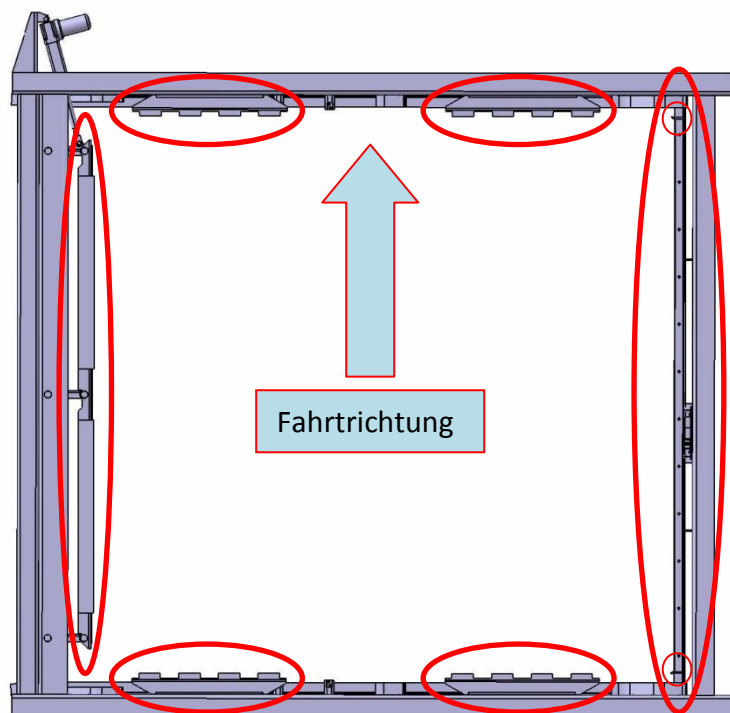


Abbildung 7-23: CAD-Modell der Batteriehalterung

7.2.1 Hauptbestandteile des FE-Modells der Krafteinleitungen

Die Hauptbestandteile des FE-Modells der Krafteinleitungen sind Tabelle 7-7 und Abbildung 7-24 zu entnehmen.

Tabelle 7-7: Hauptbestandteile des FE-Modells der Krafteinleitungen

Positionsnummer	Anzahl	Bestandteil	Typ	Stärke
1	1	Halterung Ausschubseitig	Shell	3 mm
2	4	Halterung Längsseitig	Shell	3 mm
3	1	Halterung Steckerseitig	Shell	4 mm

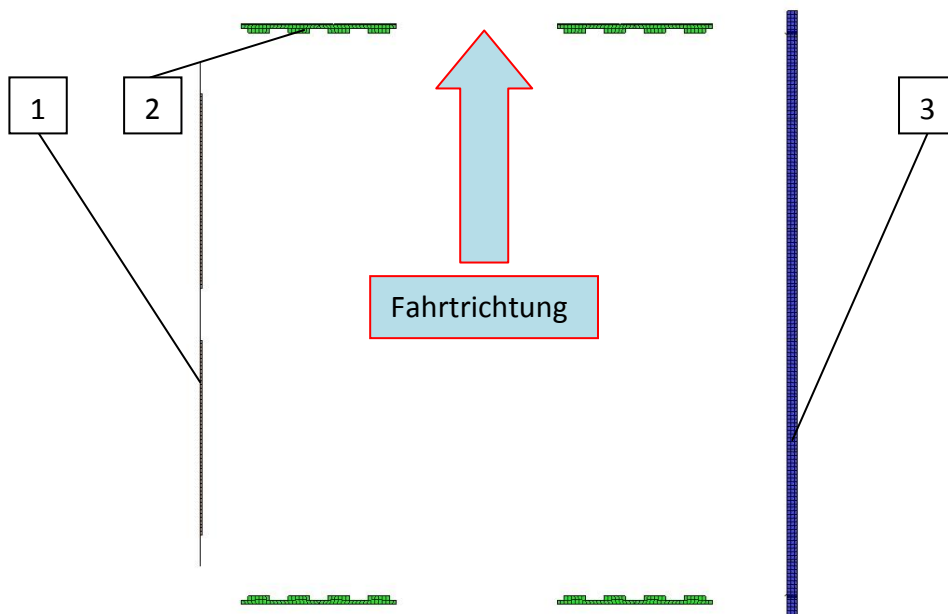


Abbildung 7-24: Hauptbestandteile des FE-Modells der Krafteinleitungen

7.2.2 Details Modellierung der Krafteinleitungen

In diesem Kapitel werden die getroffenen Annahmen bzw. Vereinfachungen bei der Modellierung der Krafteinleitungen beschrieben.

Material für die Krafteinleitungen

Als Material wurde in den Simulationen für die Krafteinleitungen dieselbe Materialkarte (Materialmodell `*MAT_PLASTICITY_WITH_DAMAGE (MAT_081)`) verwendet, die auch für das Batteriegehäuse verwendet wurde. Die Kennwerte sind Tabelle 7-2 auf Seite 70 zu entnehmen. Die wahre Spannungs-Dehnungskurve ist in Tabelle 7-3 auf Seite 70 abgebildet.

Fixierung der Krafteinleitungen

Mit der Funktion `*BOUNDARY_SPC_NODE` wurden die Nodes der Elemente von den Krafteinleitungen in ihren möglichen Bewegungsrichtungen gesperrt. Erlaubt wurde immer nur die Fortbewegung in jene Richtung, in der der Beschleunigungspuls aufgebracht wurde. Das bedeutet für einen Impuls in Richtung der X-Achse wird nur eine Translation in X-Richtung gestattet. Die restlichen zwei translatorischen und drei rotatorischen Freiheitsgrade der Bewegung werden gesperrt. Dasselbe gilt analog für die Y-Richtung.

Halterung Ausschubseitig

Die Halterung Ausschubseitig wurde im abstrakten Batteriebefestigungsmodell durch die waagrechten und die senkrechten Flächen, die den Deckel im CAD-Modell berühren, modelliert. Dabei wurden die sich berührenden Nodes – zur Verbindung – äquivalent gesetzt, und dadurch die einzelnen Flächen als eine gemeinsame angenommen. Auf die Ausmodellierung der Bohrungen in der senkrechten Auflage und die nach hinten überstehenden Platten wurde verzichtet. Den Vergleich zwischen CAD- und FE-Modell sieht man in Abbildung 7-25 und in Abbildung 7-26.

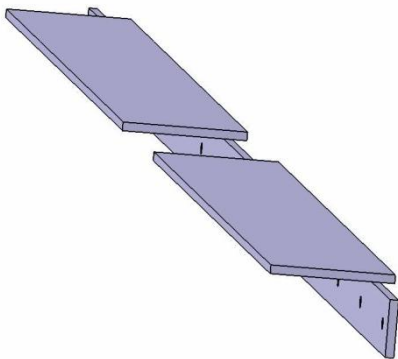


Abbildung 7-25: Halterung Ausschubseitig CAD-Modell

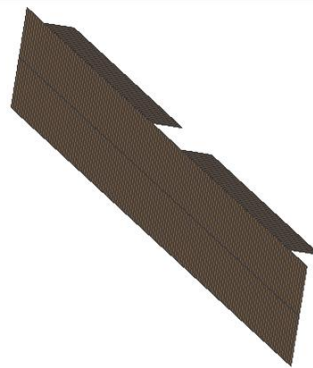


Abbildung 7-26: Halterung Ausschubseitig FE-Modell

Halterungen Längsseitig

Die insgesamt vier Halterungen auf der Längsseite der Batterie wurden anders modelliert. Der Grund dafür war die Vermeidung von zu kleinen Elementen an der waagrechten Fläche, die den Zeitschritt bei der Simulationsberechnung negativ beeinflussen können. Dadurch war hier eine stark vereinfachte Modellierung wie bei der ausschubseitigen Halterung nicht möglich. Es wurden pro Deckelhalter zwei Flächen benötigt, die mit drei modellierten Schrauben verbunden wurden. Im Gegensatz dazu wurden im CAD-Modell bzw. in

Wirklichkeit acht Schrauben verwendet. Die Schrauben wurden mit einem Beam und zwei Rigidspinnen modelliert, völlig ident mit der Deckelbefestigung des Batteriemodells. Siehe hierzu Kapitel 7.1.2. Auch das Materialmodell für die Schrauben ist dasselbe. Auf die Modellierung der Rundung des Halters wurde verzichtet. Die zwei Modelle im Vergleich sieht man in Abbildung 7-27 und Abbildung 7-28. Hier ist die verbesserte finale Version abgebildet. Die ältere Version sieht man in Kapitel 7.4.3 auf Seite 89.

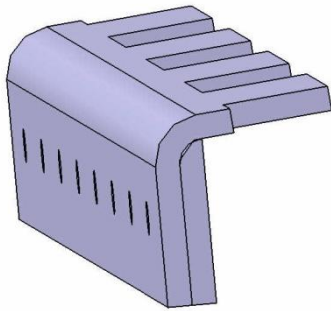


Abbildung 7-27: Halterung Längsseitig CAD-Modell

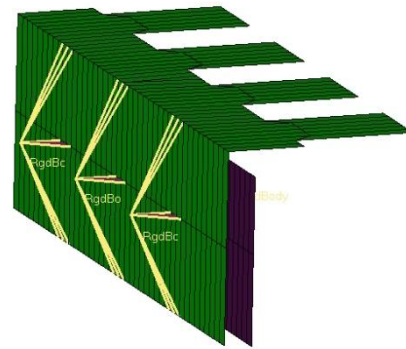


Abbildung 7-28: Halterung Längsseitig FE-Modell

Steckerseitige Halterung

Die steckerseitige Halterung wurde wieder ähnlich wie die ausschubseitige Halterung modelliert. Dabei wurden die waagrechte Innenfläche und die senkrechte Innenfläche zu einem L-Profil zusammengefügt. Auf die Modellierung der Aussparung für den Batteriestecker, der Rundung und der Bohrlöcher wurde verzichtet. Die Zentrierhilfen an den Rändern wurden als verschweißt angenommen. Die Schweißnähte wurden ebenfalls durch Shell-Elemente modelliert und sind im selben Kollektor wie der L-Träger. Sie haben die gleichen Materialwerte wie die gesamte modellierte Krafteinleitung. Den Vergleich zwischen CAD- und FE-Modell sieht man in Abbildung 7-29 und Abbildung 7-30. Hier ist ebenfalls die verbesserte finale Version abgebildet. Die ältere Version sieht man in Kapitel 7.4.3 auf Seite 89, wo auch die Veränderungen beschrieben werden.

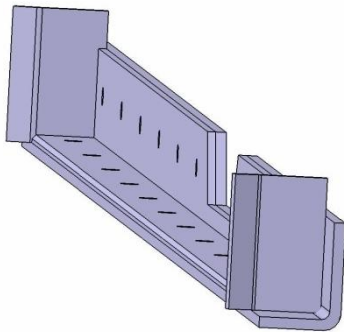


Abbildung 7-29: Halterung Längsseitig CAD-Modell

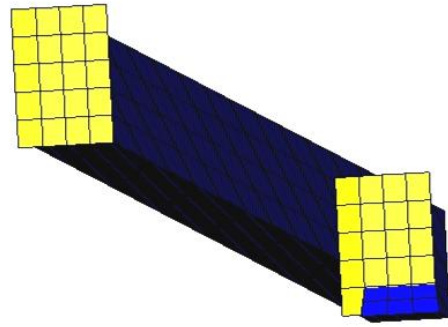


Abbildung 7-30: Halterung Längsseitig FE-Modell

7.3 Kontakte

Im FE-Modell der Batterie inklusive der Batteriebefestigung wurden insgesamt acht Kontakte mit der Funktion *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID definiert. Die Kontakte inklusive Beschreibung sind in Tabelle 7-8 zu sehen.

Tabelle 7-8: Kontakte FE-Modell der Batterie inklusive der Batteriebefestigung

Slave Segment	Master Segment	Statischer Reibungskoeffizient	Dynamischer Reibungskoeffizient
Part Set der beiden Deckel	Part Set des restlichen Gehäuses	0,2	0,1
Part Set der beiden Deckel	Part Set der Batteriehalterung	0,2	0,1
Part Set der Batteriehalterung	Part Set des restlichen Gehäuses	0,2	0,1
Part Set des restlichen Gehäuses	Polykarbonatplatten	0,2	0,1
Halterung Längsseitig Innenfläche	Halterung Längsseitig Aussenfläche	0,2	0,1
Part Set der Batteriehalterung	Batterieträger	0,2	0,1
Part Set der beiden Deckel	Batterieträger	0,2	0,1
Part Set des restlichen Gehäuses	Batterieträger	0,2	0,1

7.4 Simulationen der Niederflurbodenbatterie

Für die Ermittlung der Crashfestigkeit des Batteriegehäuses wurden Simulationen durchgeführt. Zusätzlich wurde auch noch überprüft, ob eine Reduktion der Blechdicke möglich ist. Es wurde entschieden, dieselben Lastfälle für die Simulationen und die Versuche zu verwenden, um die Simulationen über die Versuche validieren zu können. Die Simulationen sollten Schwachstellen der Batteriekonstruktion aufzeigen.

7.4.1 Beschreibung des gewählten Pulses

Für die virtuelle Belastung in der Simulation wurde die akzeptable Pulsform des Mid-1 Puls des FreedomCAR Abuse Test Manual for Electric and Hybrid Electric Vehicle Applications [7] gewählt. Siehe hierzu Tabelle 2-3 auf Seite 23. Diese Art von Puls ist auch im Versuch, mittels Hyper-G[®] Schlittens, bei der Firma DSD relativ einfach zu realisieren. Dieser mechanische Schock besteht aus einem Halbsinuspuls über 51 ms mit einer Amplitude von 35 G. Die maximale Beschleunigung beträgt somit rund 343,2 m/s². Die Wahl fiel auf diesen Test, da der Low-Test nur Abuse Level 1 aufweist, und der Mid-2 Test zwar um 9 ms länger dauert als der Mid-1 Test, aber eine um 10 G niedrigere Beschleunigungsamplitude hat. Den Verlauf des Beschleunigungspulses sieht man in Abbildung 7-31. Auf Intrusionssimulationen, wie zum Beispiel an Anlehnung an den Poletest, wurde verzichtet, da die Einbaulage zwischen den Längsträgern des Fahrzeugs bestmöglichen Schutz bietet.

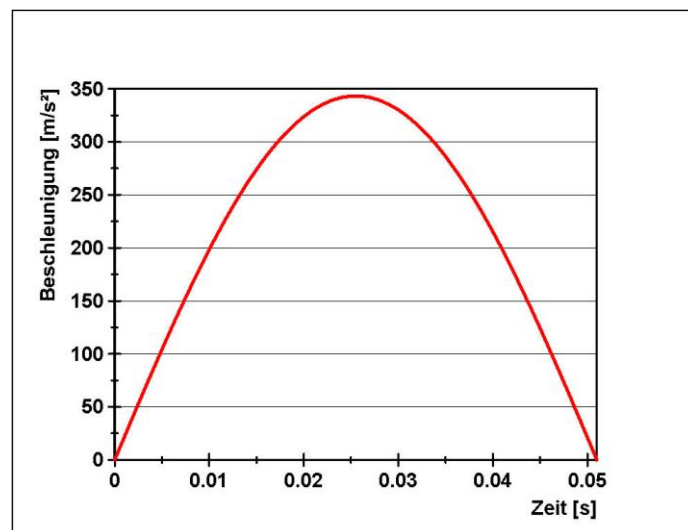


Abbildung 7-31: Mid-1 Puls Beschleunigung

Die in dieser Zeit mit dieser Beschleunigung erreichte bzw. abgebaute Geschwindigkeit beträgt 11,1 m/s. Dies entspricht rund 40 km/h. Der Geschwindigkeitsverlauf ist in dem Diagramm in Abbildung 7-32 dargestellt.

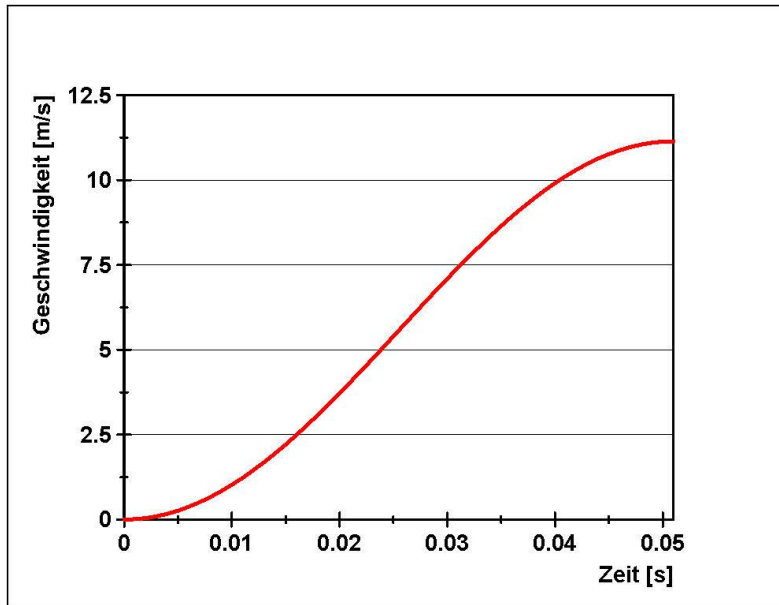


Abbildung 7-32: Mid-1 Puls Geschwindigkeit

Der zurückgelegte Weg beträgt rund 28 cm, er ist in dem Diagramm in Abbildung 7-33 dargestellt.

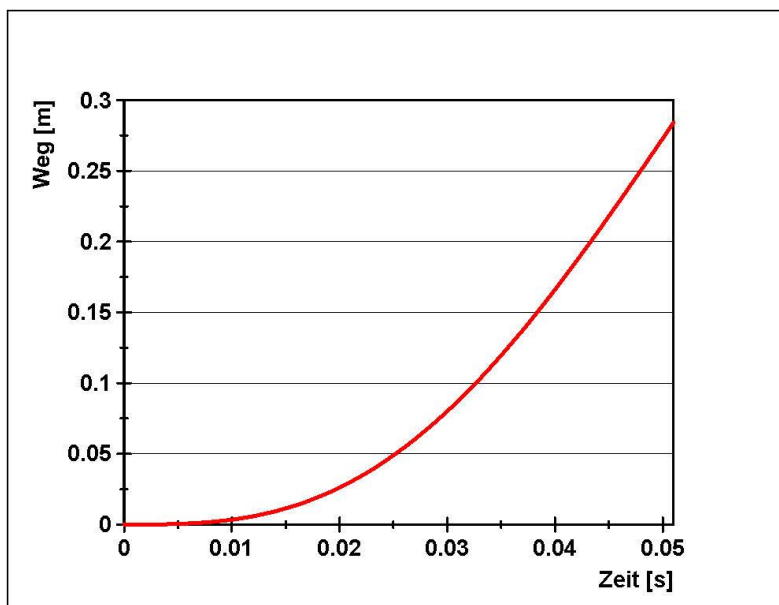


Abbildung 7-33: Mid-1 Puls Weg

7.4.2 Simulationsmatrix

Die durchgeführten Simulationen sind Tabelle 7-9 zu entnehmen. Insgesamt wurden 12 Simulationen durchgeführt. Variiert wurden in dieser Matrix die Wirkrichtungen des Pulses und die Blechstärken des Gehäuses bzw. des Deckels. Die Blechstärken wurden geändert, um eventuell eine Gewichtersparnis zu erreichen und so die Nutzlast vor allem beim kleineren Bus zu erhöhen.

Tabelle 7-9: Simulationsmatrix

Simulation	Beschleunigungsrichtung	Blechstärke Gehäuse	Blechstärke Deckel
Simulation 1	Positive Acc X	2 mm	2 mm
Simulation 2	Negative Acc X	2 mm	2 mm
Simulation 3	Positive Acc Y	2 mm	2 mm
Simulation 4	Negative Acc Y	2 mm	2 mm
Simulation 5	Positive Acc X	1,5 mm	1,5 mm
Simulation 6	Negative Acc X	1,5 mm	1,5 mm
Simulation 7	Positive Acc Y	1,5 mm	1,5 mm
Simulation 8	Negative Acc Y	1,5 mm	1,5 mm
Simulation 9	Positive Acc X	1,5 mm	2 mm
Simulation 10	Negative Acc X	1,5 mm	2 mm
Simulation 11	Positive Acc Y	1,5 mm	2 mm
Simulation 12	Negative Acc Y	1,5 mm	2 mm

In der Kontaktkarte `*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_ID` mit den Funktionen `SST` (optional thickness for slave surface) und `MST` (optional thickness for master surface) wurden die Kontaktbedingungen beim ursprünglichen Abstand beibehalten. Die Blechstärken wurden lediglich in den Shelldefinitionen `*SECTION_SHELL` für die Festigkeitsberechnungen geändert.

7.4.3 Nötige Verbesserungen in der Konstruktion

An den Simulationsergebnissen wurde ersichtlich, dass Verbesserungen in der Konstruktion nötig sind, um Deformationen zu vermeiden. Insgesamt waren zwei Adaptierungsschritte nötig. Die Modifikationen betrafen im ersten Schritt die vier längsseitigen Batteriehalterungen. Sie wurden am VSI erarbeitet und von [27] durchgeführt. Die Halterungen wurden verlängert, um eine größere Einleitungsfläche für die Beschleunigung

zu erhalten. In Abbildung 7-34 sieht man das FE-Modell in der ursprünglichen Version und in Abbildung 7-35 mit verlängerter Halterung. Im gleichen Zug wurden die steckerseitigen Zentrierhilfen entfernt, da dort ebenfalls eine große Belastung auf die Batterie wirkte.

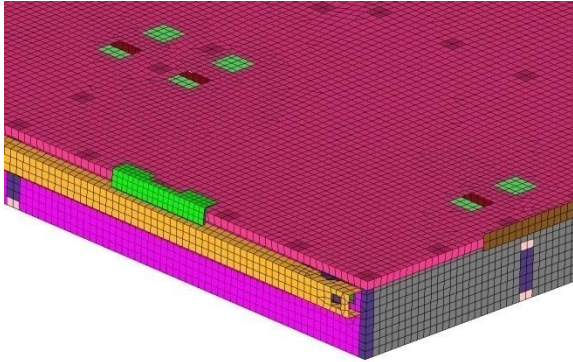


Abbildung 7-34: FE-Modell mit alter Halterung

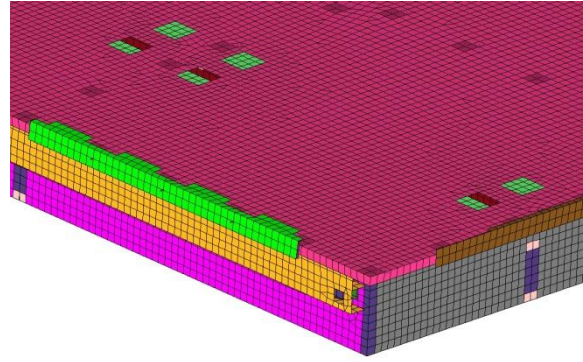


Abbildung 7-35: FE-Modell mit neuer Halterung

Die größeren Batteriehalterungen leiteten zwar die Beschleunigungen und damit die Kräfte großflächiger in den Deckel ein, jedoch wurde keine Kraft mehr in die Batterieschachtel über die Zentrierhilfen eingeleitet. Diese zwei Veränderungen verbesserten die Stabilität nicht bzw. hob sich ihre Wirkung gegenseitig auf.

Im zweiten Schritt gestaltete [27] den Batterieträger um und verwendete ihn als zusätzliche Stütze für den Deckel. In Abbildung 7-36 sieht man den alten Batterieträger in projizierter Ansicht und in Abbildung 7-37 den bis unter den Deckelfalz verlängerten Träger (roter Kreis) mit einem Zwischenfalz, ebenfalls in projizierter Ansicht.

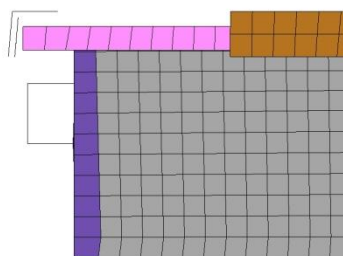


Abbildung 7-36: FE-Modell mit altem Träger

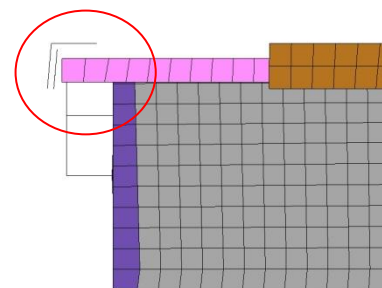


Abbildung 7-37: FE-Modell mit neuem Träger

In Zuge dieser Adaption wurden auch die Zentrierhilfen in vergrößerter Ausführung wieder eingeführt. Der Vergleich zwischen alten und neuen Zentrierhilfen (gelb) ist in Abbildung 7-38 und Abbildung 7-39 dargestellt.

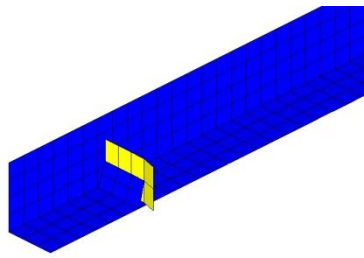


Abbildung 7-38: Alte Zentrierhilfen

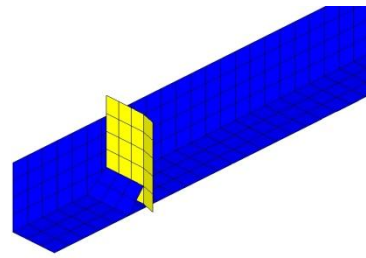


Abbildung 7-39: Neue Zentrierhilfen

Erst diese Veränderungen führten zu einer ausreichenden Robustheit, um den gewählten Beschleunigungspuls zu überstehen. Die Simulationsergebnisse der einzelnen Veränderungsstufen werden im folgenden Kapitel beschrieben.

7.4.4 Simulationsergebnisse Beschleunigungspuls Niederflurbatterie

Der erste Simulationsloop (ohne die oben beschriebenen Veränderungen) zeigte, dass nur eine Blechstärke von 2 mm für Gehäuse und Deckel in Frage kommen kann, da bei dünneren Blechstärken zu große Deformationen auftraten. Geringere Blechstärken konnten keine ausreichende Stabilität aufweisen. Daher wurde bei den beiden darauffolgenden Loops nur noch mit einer Blechstärke von 2 mm gerechnet. Die Gewichtsersparnis mit einer Blechstärke von 1,5 mm bei Deckel und Gehäuse beträgt in etwa 25-30 kg. Dies entspricht nur rund 5 % des Gesamtgewichtes.

In den folgenden Bildern der Simulationsergebnisse ist die Vergleichsspannung nach Mises dargestellt. Die Legende in N/mm^2 ist in Abbildung 7-40 erkennbar. Als Maximum wurde die $R_{p0,2}$ -Dehngrenze bei 320 N/mm^2 gewählt. Das bedeutet, dass ab $284,4 \text{ N/mm}^2$ Vergleichsspannung rot dargestellt wird. Die Screenshots wurden alle bei $t=27 \text{ ms}$ erstellt, das heißt bei annähernd maximaler Beschleunigung und daraus resultierender maximaler mechanischer Spannung in den Bauteilen.

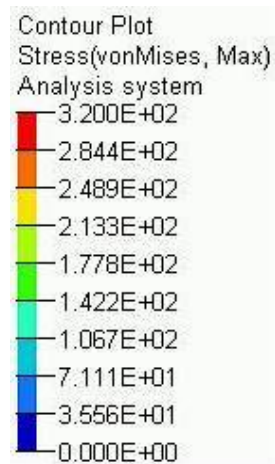


Abbildung 7-40: Legende für die Simulationsergebnisse

Die Ergebnisse der ersten Simulation mit 2 mm Deckel- und Gehäusestärke, kleinen längsseitigen Halterungen und kleinen Zentrierhilfen sind exemplarisch für eine Seite in negativer Acc X in Abbildung 7-41 dargestellt. In der unteren Ecke erkennt man die hohen Belastungen durch die Zentrierhilfe. Am Deckel erkennt man eine Aufbiegung infolge der hohen Belastungen durch die Halterung.

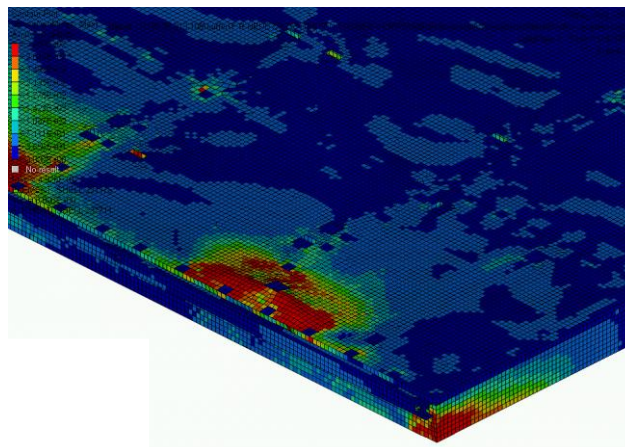


Abbildung 7-41: Erstes Simulationsergebnis mit kleinen Zentrierhilfen und Halterungen

Zu Anschauungszwecken ist in Abbildung 7-42 die zu diesem Simulationsergebnis gehörende Halterung dargestellt sowie in Abbildung 7-43 die zugehörige Zentrierhilfe.

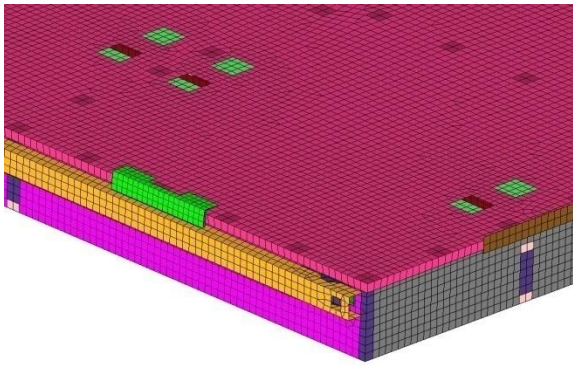


Abbildung 7-42: FE-Modell mit alter Halterung

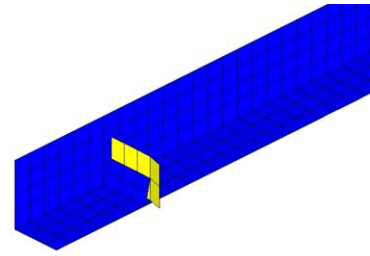


Abbildung 7-43: Alte Zentrierhilfen

Danach wurden, wie oben beschrieben, die Deckelhalterung verlängert und die Zentrierhilfen entfernt. Das Simulationsergebnis sieht man in Abbildung 7-44. Die zugehörige Halterung sieht man in Abbildung 7-45. In der unteren Ecke tritt durch die Entfernung der Zentrierhilfen so gut wie keine Belastung mehr auf. Jedoch ist am Deckel keine nennenswerte Besserung gegeben und der Deckel biegt sich noch immer auf. Die positive Wirkung durch die Vergrößerung der Halterungen und der negative Effekt durch die Entfernung der Zentrierhilfen heben sich gegenseitig auf.

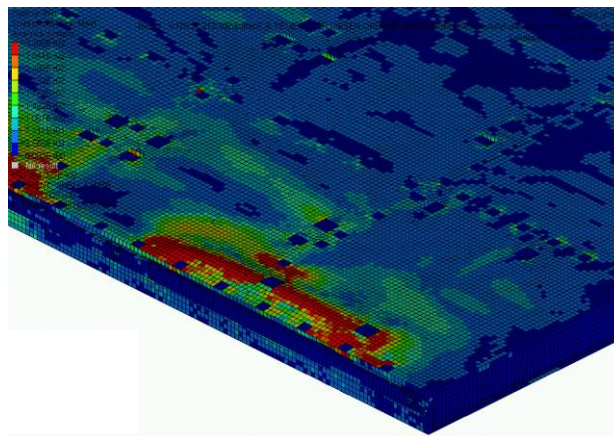


Abbildung 7-44: Zweites Simulationsergebnis mit vergrößerten Halterungen und ohne Zentrierhilfen

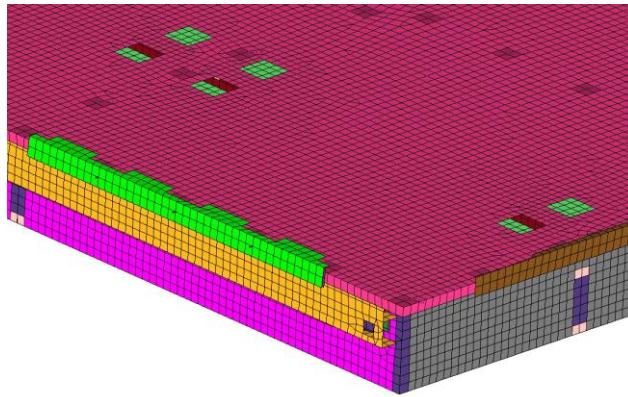


Abbildung 7-45: FE-Modell mit neuer Halterung

Die letzte Konstruktionsänderung betraf den Batterieträger und die Wiedereinführung von größeren Zentrierhilfen. Das Simulationsergebnis sieht man in Abbildung 7-46, die zugehörigen Kräfteinleitungen in Abbildung 7-47 und Abbildung 7-48.

Die geringere Belastung des Deckels ist deutlich zu erkennen und es kommt nur zu einer minimalen Aufbiegung. Ebenfalls ist die Belastung an der unteren Ecke deutlich geringer als beim ersten Simulationsergebnis.

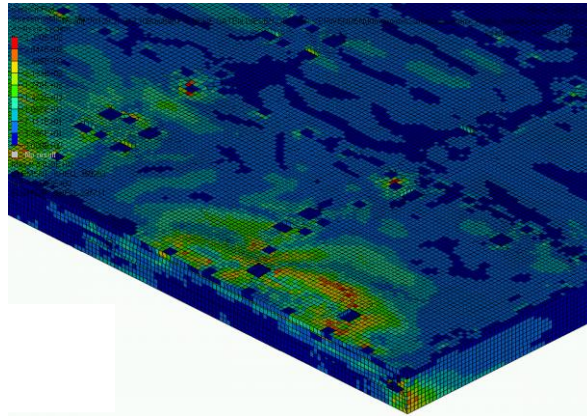


Abbildung 7-46: Letztes Simulationsergebnis mit vergrößerten Zentrierhilfen und Halterungen

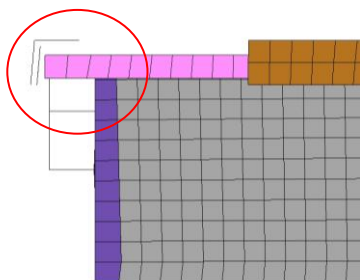


Abbildung 7-47: FE-Modell mit neuem Träger

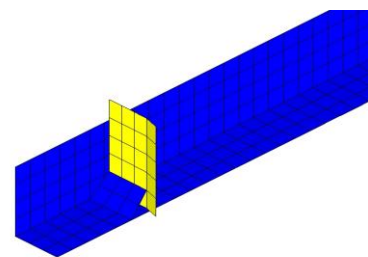


Abbildung 7-48: Neue Zentrierhilfen

Die höchste Vergleichsspannung nach Mises tritt nach dem Simulationsmodell mit ca. 390 bis 430 N/mm² in den Zwischenplatten ohne Falz und daher ohne Verschraubung mit dem Gehäusedeckel auf, das bedeutet bei jedem zweiten Blech. Dies ist in Abbildung 7-49 ersichtlich. Dabei ist, wie zuvor schon erwähnt, zu berücksichtigen, dass die Modellbildung, vor allem die der Batteriemodule, nur begrenzt die Elastizität berücksichtigt. Dadurch kommt es zu höheren Kräfteinleitungen in diese Unterteilungsbleche. Wie zuvor schon erwähnt, wurde auch auf die Modellierung des Sylomer-Schaumstoffs, welcher auf die Module gepresst wird und dadurch einen veränderten Kraftfluss bewirkt, verzichtet.

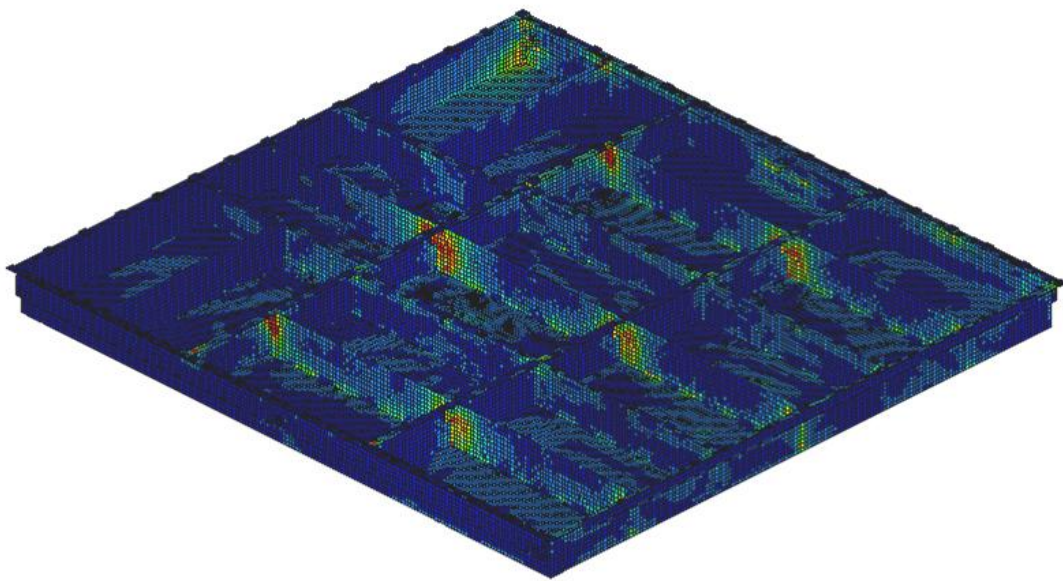


Abbildung 7-49: Letztes Simulationsergebnis innen

Die Kraftwirkung auf den Wechselrahmen kann im vorliegenden Lastfall mit ca. 162 kN angenommen werden. Die Berechnung geht davon aus, dass der Wechselrahmen ausgelegt von [27] unter diesen Belastungen eine ausreichende Festigkeit und Steifigkeit zeigt. Dies betrifft vor allem auch die Verschlussmechanik (Bolzen, Hebel, Aktuator, ...).

Diese Simulationen können nur spezielle Lastfälle abdecken. In der Realität können eine Vielzahl anderer Unfallszenarios vorkommen, die durch diese Beschleunigungspulse nicht abgedeckt sind.

7.4.5 Simulationsergebnisse Ausgasen der Module

Die Fragestellung für diese Analyse lautete: Was würde bei einem eventuellen Ausgasen passieren, falls keine Entgasungslöcher in der Batterie vorgesehen wären? Für diese Simulation wurde das bestehende Batteriemodell stark vereinfacht. Es besteht nur noch aus einfachen Quadern. Die Schraubenverbindungen und Schweißverbindungen wurden alle entfernt, und die Nodes an den Kanten wurden äquivalent gesetzt. Auch die Batteriedummies wurden auf einfache Quader reduziert, wobei jeweils zwei Modulfächer zusammengefasst wurden. Die anderen Zwischenplatten, die ebenso wichtig für das Simulationsergebnis sind, weil sie den Boden verstärken, wurden nur angedeutet. Alle Löcher und Öffnungen wurden verschlossen. In Abbildung 7-50 ist das Simulationsmodell dargestellt. Dabei ist ein Quader geöffnet. Man erkennt die angedeutete Zwischenplatte in türkis und den vereinfachten Batteriedummie.

Das Ausgasen von jeweils zwei Modulen (96 Zellen) wurde für jeden Quader, als geschlossenes Kontrollvolumen, über die Funktion `*AIRBAG_SIMPLE_AIRBAG_MODEL` definiert. Angenommen wurde dabei, dass reine Luft bei 300 K ausströmt. Als Wert für die Ausgasmenge wurde der Richtwert 1,2 l/Ah von Abbildung 4-5 auf Seite 31 verwendet. Eine Zelle hat eine Ladung von 20 A/h. Mit einer Luftdichte von 1,2 kg/m³ und einer angenommenen Ausströmzeit von 5 s folgt 592,96 x 10⁻³ kg/s. Siehe hierzu Berechnung (5).

$$\dot{m} = \frac{96 \times 1,2 \times 20 \times 1,2 \times 10^{-6}}{5} = 592,96 \times 10^{-6} \text{ t/s} \quad (5)$$

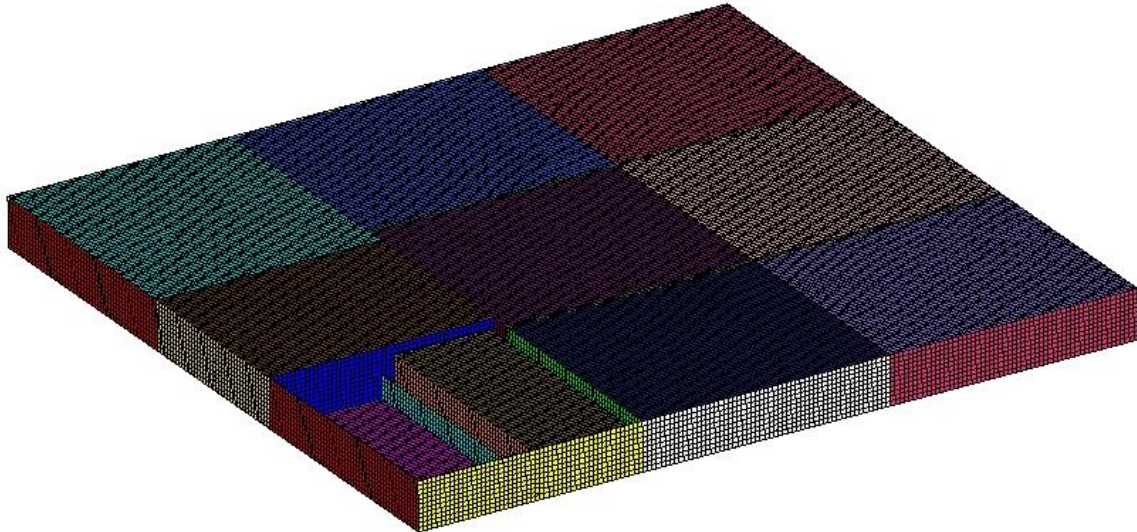


Abbildung 7-50: Vereinfachtes Simulationsmodell Ausgasen

Das Simulationsergebnis sieht man in Abbildung 7-51. Wobei zu sagen ist, dass durch die Berechnung der Gasströmung als konstantes Druckmodell mittels idealer Gasgleichung keine Gasdynamik berücksichtigt wird. Das Ergebnis dieser Prinzipsimulation ist, dass die Batterie bei druckdichter Ausführung aller Wahrscheinlichkeit nach platzt bzw. explodiert. Um eine Gefährdung von Menschen zu vermeiden, sind unbedingt Ausgasöffnungen vorzusehen. Wobei die Öffnungen das ausströmende Gas von den Insassen wegleiten sollen.

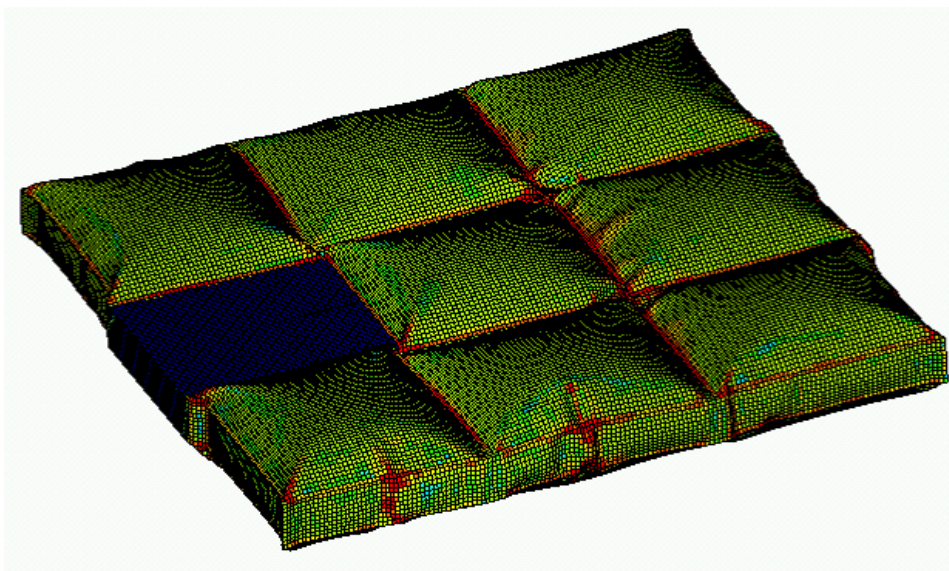


Abbildung 7-51: Simulationsergebnis Ausgasen

8 Zellenversuche - Mechanischer Schock

Da in dem Testprotokoll der verwendeten Lithium-Ionen-Polymer-Zellen [10], wie in Kapitel 2.10.3 auf Seite 25 beschrieben wurde, kein Beschleunigungstest durchgeführt wurde, war es nötig, die Reaktion der Zellen auf Beschleunigung zu überprüfen. Weiters war es notwendig, die Polykarbonatplatten der Module und die Zellenverklebungen zu überprüfen. Für die experimentelle Belastung der Zellen bzw. Module wurde, wie für die virtuelle Überprüfung des Gehäuses, die akzeptable Pulsform des Mid-1 Puls des FreedomCAR Abuse Test Manual for Electric and Hybrid Electric Vehicle Applications [7] gewählt. Für die Pulsbeschreibung wird auf Kapitel 7.4.1 auf Seite 87 verwiesen.

Für die Tests wurde noch ein Teilmodell eingeführt und mit Zwölferpaket benannt. Dieses befindet sich zwischen Einzelzelle und Modul und umfasst 12 Einzelzellen. Vier solche Zwölferpakete bilden zusammen ein Modul (Abbildung 8-1). Dieses Teilmodell wurde eingeführt und - im Gegensatz zum Modul - geladen getestet, damit das Schadensrisiko durch eine eventuelle Ausgasung nicht zu hoch ist.

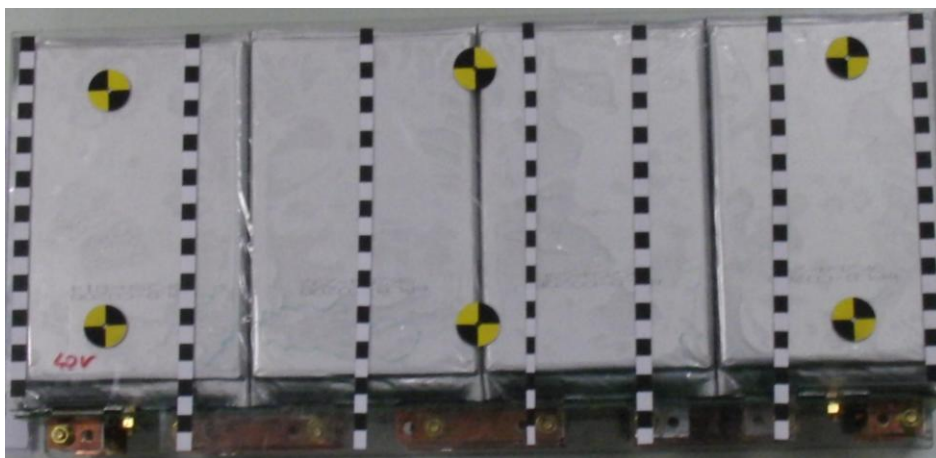


Abbildung 8-1: Batteriemodul aufgebaut aus vier Zwölferpaketen

Die Versuchsmatrix ist in Tabelle 8-1 dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass die Beschleunigungsrichtung immer aus Sicht der Einzelzelle angegeben ist. Die Tests wurden auf einem Hyper-G[®] Schlitten durchgeführt.

Tabelle 8-1: Versuchsmatrix

Herstellungsebene	Beschleunigungsrichtung	Ladezustand
Einzelzelle	Längsrichtung	geladen
Einzelzelle	Querrichtung	geladen
Zwölferpaket	Längsrichtung	geladen
Zwölferpaket	Querrichtung	geladen
Modul	Längsrichtung	ungeladen
Modul	Querrichtung	ungeladen

8.1 Vorbereitungen

Es wurde ein Prüfstands Aufbau konstruiert. Neben Kostenaspekten waren die Hauptanforderungen kompakte Bauweise und einfacher Umbau mit wenigen Handgriffen für die verschiedenen Größen bzw. Einsetzrichtungen der Prüflinge. Der Aufbau wurde in dem CAD-Programm Catia gezeichnet und am Institut für Fahrzeugsicherheit gebaut. In Abbildung 8-2 ist der Versuchsaufbau exemplarisch für die Einzelzelle in Längsrichtung dargestellt und in Tabelle 8-2 werden die Bauteile beschrieben. Der Pfeil zeigt die Beschleunigungsrichtung für diesen Fall an.

Tabelle 8-2: Hauptbestandteile des FE-Modells der Krafteinleitungen

Positionsnummer	Anzahl	Bestandteil
1	1	U-Profil lang
2	1	Grundplatte
3	1	Lochplatte des Hyper-G [®] Schlittens (bestand)
4	1	U-Profil kurz
5	1	Winkel als Herausfallsicherung
6	1	Einzelzelle
7	1	Bremsstütze

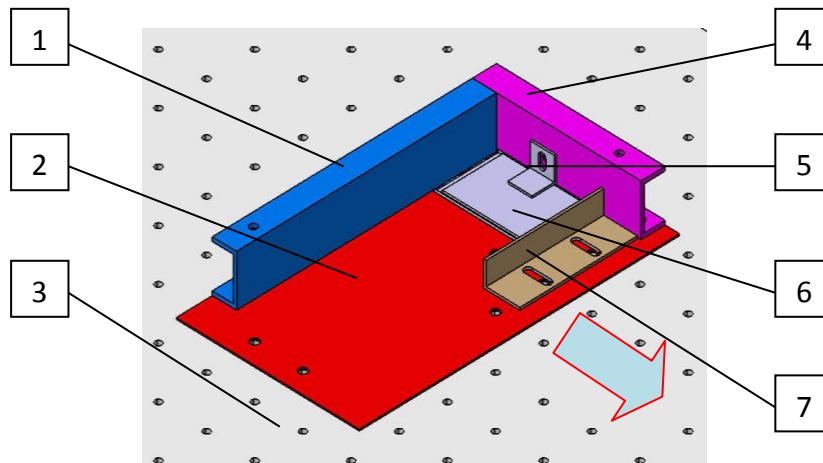


Abbildung 8-2: Konstruktion Einzelzelle Längsrichtung

Die Bremsstütze diente lediglich dazu, die Prüflinge beim Abbremsen des Schlittens nach dem Puls vor dem Herausfallen zu schützen. Der Winkel als Herausfallsicherung wurde bei den Tests mit Zwölferpaketen und Modulen entfernt. Stattdessen wurde ein Stab mit Rechteckquerschnitt mit den oberen Flanschen der U-Träger verschraubt (siehe Bohrungslöcher). Unter die Herausfallsicherung für die Module wurde ein Schaumstoff geklemmt und beim U-Träger wurde eine Polykarbonatplatte eingeklemmt, damit auf das Modul durch die Rundung des U-Trägers keine Vertikalkraft wirkt. Des Weiteren wurden ein Versuchsprotokoll und eine Checkliste angefertigt.

8.2 Durchgeführte Versuche

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die durchgeführten Versuche analysiert und beschrieben. Die Analyse betrifft hier die Pulsdauer und die erreichte Geschwindigkeit. Die Definition im FreedomCAR Abuse Test Manual for Electric and Hybrid Electric Vehicle Applications lautet: "The shocks are specified in terms of velocity change and maximum duration. Shock duration is defined as the time between the first and last time the shock pulse crosses the 10% peak level..." [7] Das bedeutet für Mid 1 Puls, wie in Tabelle 2-3 auf Seite 23 ersichtlich, eine Geschwindigkeitsänderung von 11,1 m/s, eine maximale Dauer von 65 ms und eine minimale Beschleunigung von 30 G ($294,3 \text{ m/s}^2$) für 16 ms. Für die Diagramme in den nachfolgenden Unterkapiteln wurden die Rohdaten mit dem CFC 180 Filter gefiltert.

8.2.1 Einzelzelle Längsrichtung

Ein Foto der Einzelzelle in Längsrichtung sieht man in Abbildung 8-3, den Beschleunigungsverlauf in Abbildung 8-4 und den Geschwindigkeitsverlauf in Abbildung 8-5. Die maximale Dauer wird mit rund 48,8 ms nicht überschritten. Die minimale Dauer der Beschleunigung mit über 30 G wird mit rund 16,5 ms nicht unterschritten. Die erreichte Geschwindigkeit wird mit rund 10,9 m/s um rund 0,2 m/s unterschritten. Dies entspricht einer Abweichung vom Sollwert von rund 1,8 %.

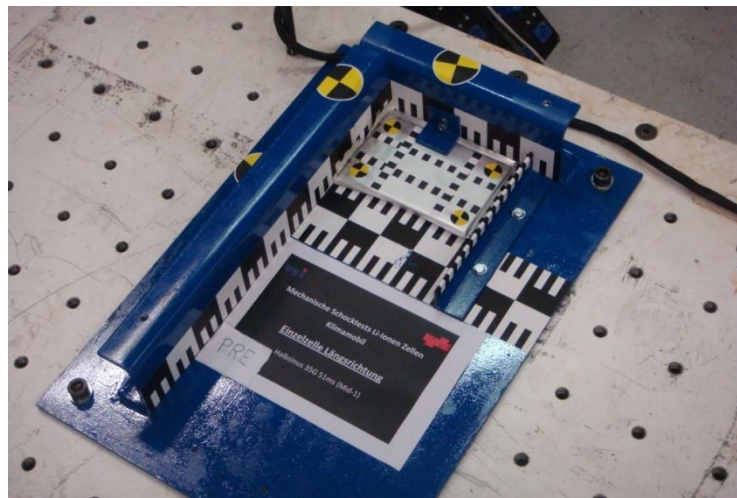


Abbildung 8-3: Versuchsfoto Einzelzelle Längsrichtung

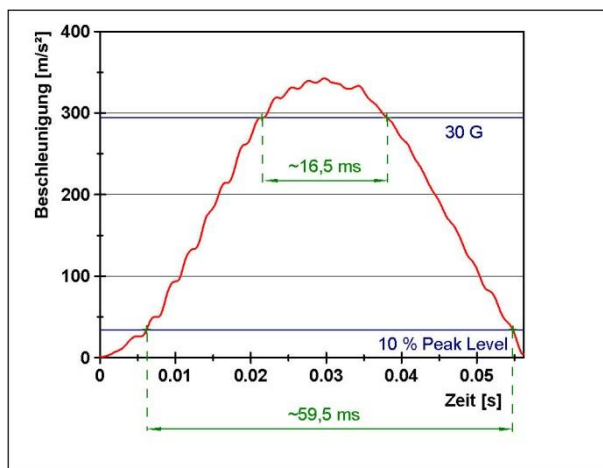


Abbildung 8-4: Beschleunigung Einzelzelle längs

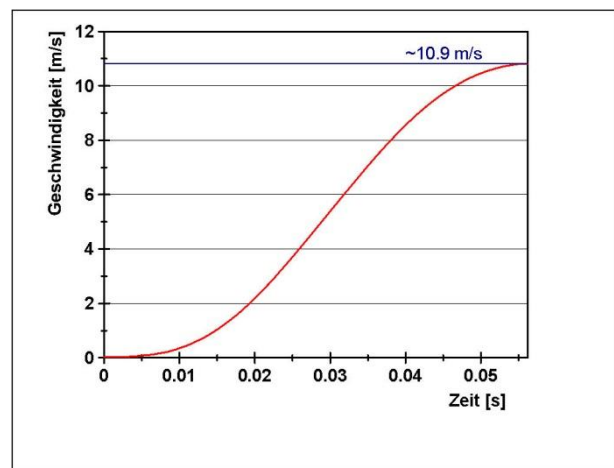


Abbildung 8-5: Geschwindigkeit Einzelzelle längs

Das Ergebnis ist als komplett unauffällig zu werten. (Hazard Level 0) Es kam zu keiner Deformation und zu keinem Spannungsabfall zwischen den Messungen vor und nach den Tests.

8.2.2 Einzelzelle Querrichtung

Ein Foto der Einzelzelle in Querrichtung sieht man in Abbildung 8-6, den Beschleunigungsverlauf in Abbildung 8-7 und den Geschwindigkeitsverlauf in Abbildung 8-8. Die maximale Dauer wird mit rund 49,0 ms nicht überschritten. Die minimale Dauer der Beschleunigung mit über 30 G wird mit rund 16,9 ms nicht unterschritten. Die erreichte Geschwindigkeit wird mit rund 11,0 m/s um rund 0,1 m/s unterschritten. Dies entspricht einer Abweichung vom Sollwert von rund 0,9 %.

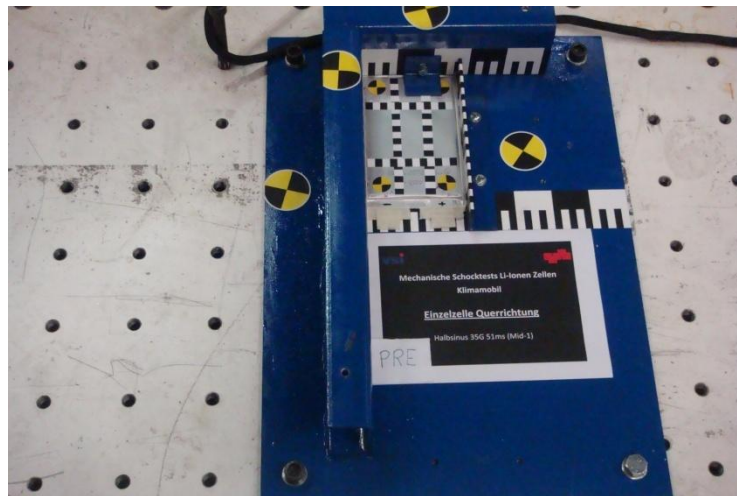


Abbildung 8-6: Versuchsfoto Einzelzelle Querrichtung

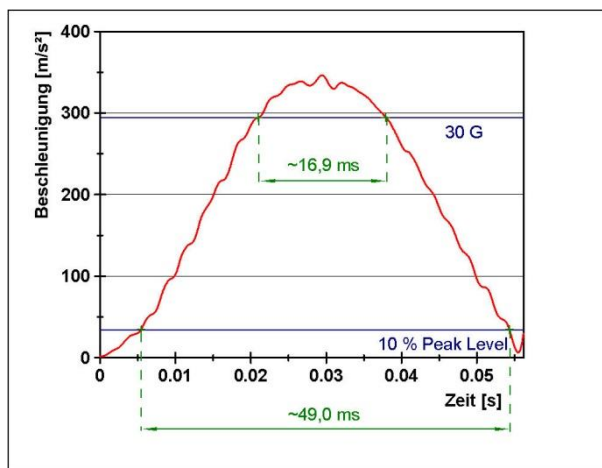


Abbildung 8-7: Beschleunigung Einzelzelle quer

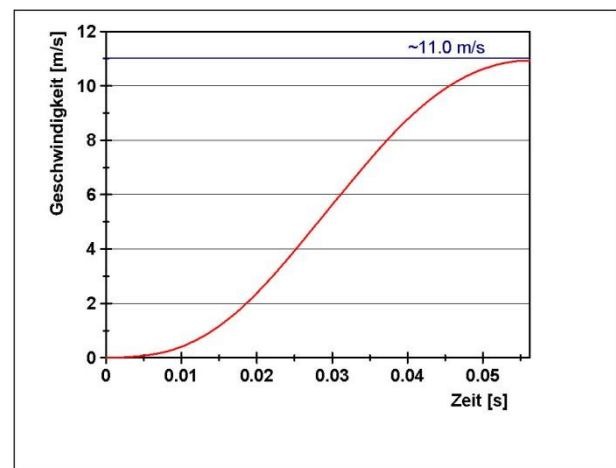


Abbildung 8-8: Geschwindigkeit Einzelzelle quer

Das Ergebnis ist ident mit jenem vom vorherigen Test (Hazard Level 0).

8.2.3 Zwölferpaket Längsrichtung

Ein Foto des Zwölferpakets in Längsrichtung sieht man in Abbildung 8-9, den Beschleunigungsverlauf in Abbildung 8-10 und den Geschwindigkeitsverlauf in Abbildung 8-11. Die maximale Dauer wird mit rund 48,8 ms nicht überschritten. Die minimale Dauer der Beschleunigung mit über 30 G wird mit rund 16,4 ms nicht unterschritten. Die erreichte Geschwindigkeit wird mit rund 11,0 m/s um rund 0,1 m/s unterschritten. Dies entspricht einer Abweichung vom Sollwert von rund 0,9 %.



Abbildung 8-9: Versuchsfoto Zwölferpaket Längsrichtung

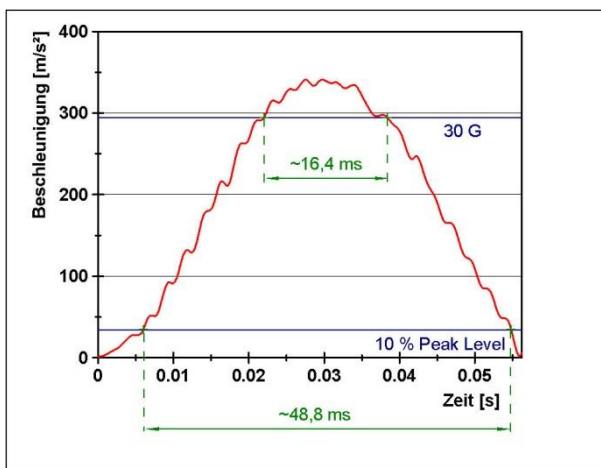


Abbildung 8-10: Beschleunigung Zwölfer längs

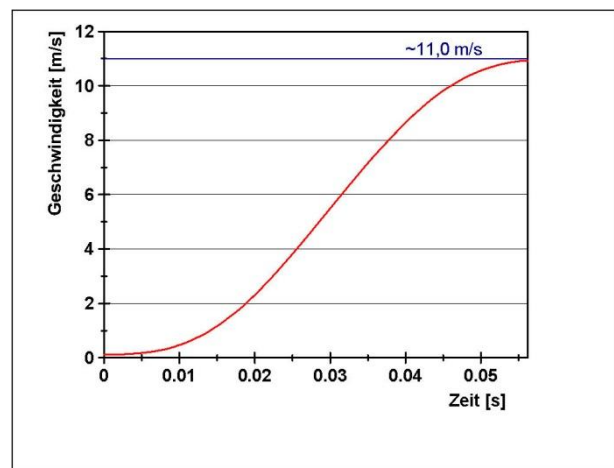


Abbildung 8-11: Geschwindigkeit Zwölfer längs

Das Ergebnis ist ident mit jenen von den vorherigen Tests (Hazard Level 0).

8.2.4 Zwölferpaket Querrichtung

Ein Foto des Zwölferpakets in Querrichtung sieht man in Abbildung 8-12, den Beschleunigungsverlauf in Abbildung 8-13 und den Geschwindigkeitsverlauf in Abbildung 8-14. Die maximale Dauer wird mit rund 48,8 ms nicht überschritten. Die minimale Dauer der Beschleunigung mit über 30 G wird mit rund 15,8 ms um rund 0,2 ms unterschritten. Dies entspricht einer Abweichung vom Sollwert von rund 1,25 %. Die erreichte Geschwindigkeit wird mit rund 11,0 m/s um rund 0,1 m/s unterschritten. Dies entspricht einer Abweichung vom Sollwert von rund 0,9 %.

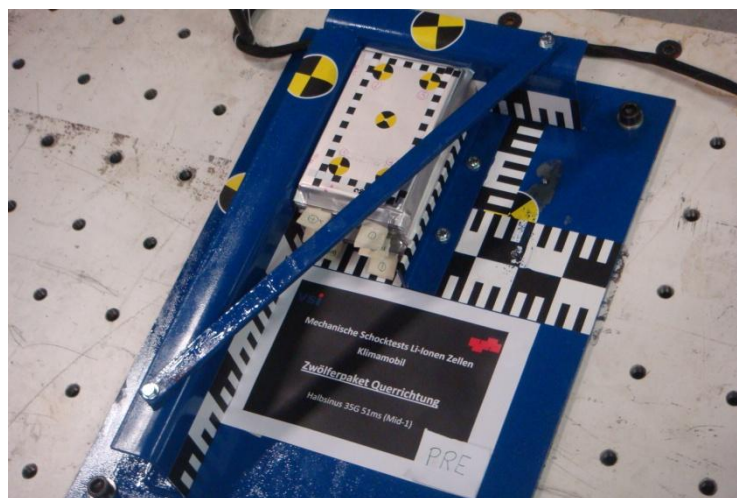


Abbildung 8-12: Versuchsfoto Zwölferpaket Querrichtung

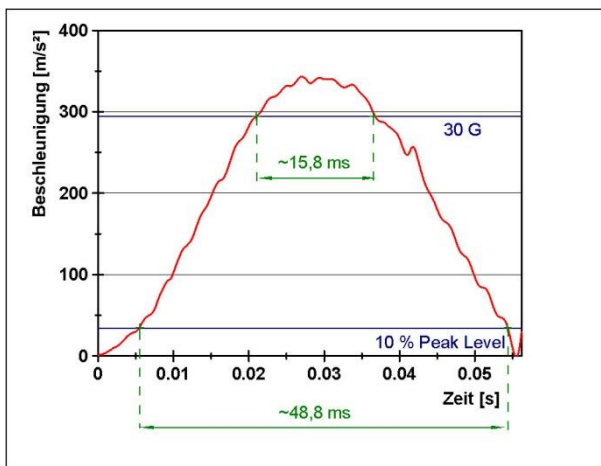


Abbildung 8-13: Beschleunigung Zwölfer quer

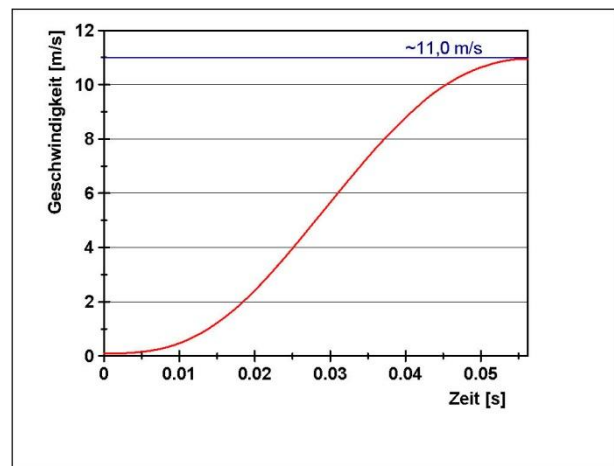


Abbildung 8-14: Geschwindigkeit Zwölfer quer

Das Ergebnis ist wieder mit Hazard Level 0 zu bewerten.

8.2.5 Modul Längsrichtung

Ein Foto des Moduls in Längsrichtung sieht man in Abbildung 8-15, den Beschleunigungsverlauf in Abbildung 8-16 und den Geschwindigkeitsverlauf in Abbildung 8-17. Die maximale Dauer wird mit rund 48,8 ms nicht überschritten. Die minimale Dauer der Beschleunigung mit über 30 G wird mit rund 15,2 ms um rund 8 ms unterschritten. Dies entspricht einer Abweichung vom Sollwert von rund 5 %. Die erreichte Geschwindigkeit wird mit rund 10,9 m/s um rund 0,2 m/s unterschritten. Dies entspricht einer Abweichung vom Sollwert von rund 1,8 %.

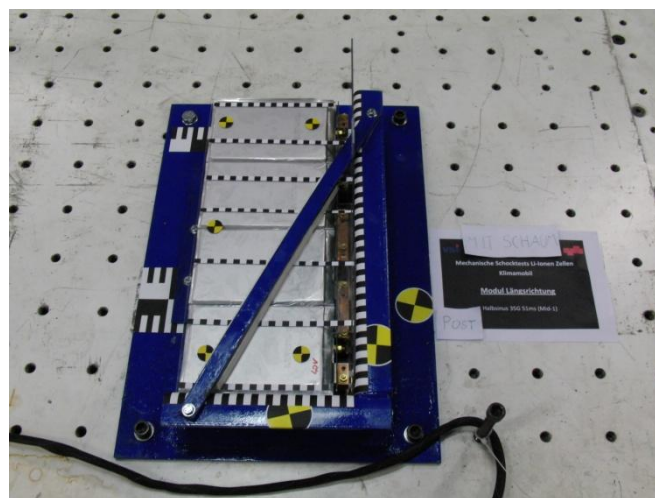


Abbildung 8-15: Versuchsfoto Modul Längsrichtung

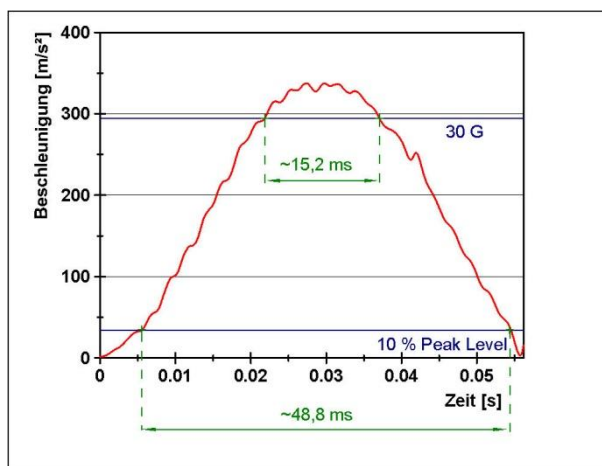


Abbildung 8-16: Beschleunigung Modul längs

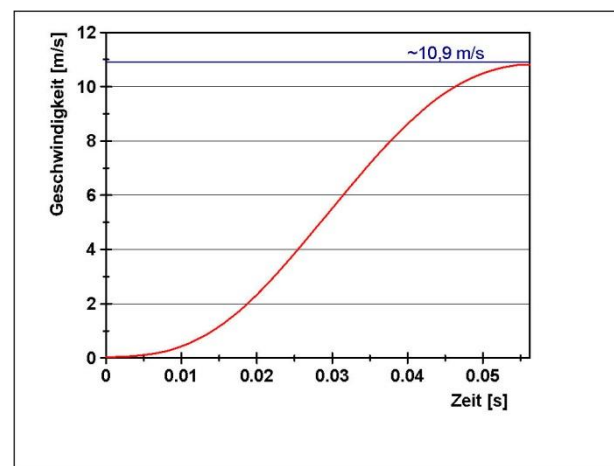


Abbildung 8-17: Geschwindigkeit Modul längs

Das Ergebnis ist als komplett unauffällig zu werten. (Hazard Level 0). Es kam zu keiner Deformation und zu keinem Spannungsabfall. Da die Module nicht tiefentladen wurden, war Spannung vorhanden, obwohl sie entladet waren.

8.2.6 Modul Querrichtung

Ein Foto des Moduls in Querrichtung sieht man in Abbildung 8-18, den Beschleunigungsverlauf in Abbildung 8-19 und den Geschwindigkeitsverlauf in Abbildung 8-20. Die maximale Dauer wird mit rund 48,7 ms nicht überschritten. Die minimale Dauer der Beschleunigung mit über 30 G wird mit rund 16,0 ms nicht unterschritten. Dies entspricht einer Abweichung vom Sollwert von rund 5 %. Die erreichte Geschwindigkeit wird mit rund 10,8 m/s um rund 0,3 m/s unterschritten. Dies entspricht einer Abweichung vom Sollwert von rund 2,7 %.

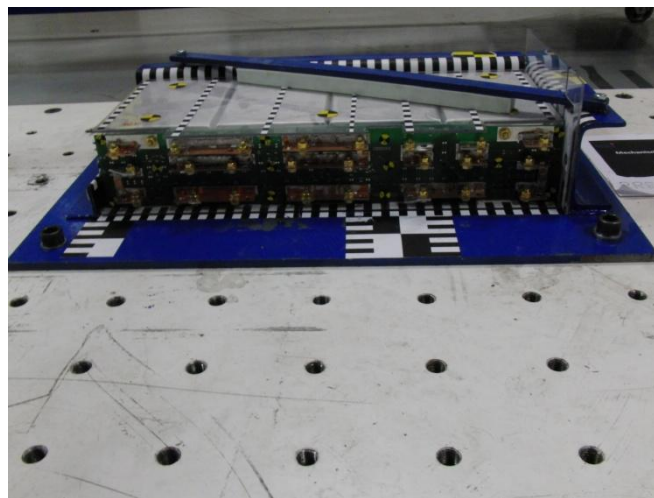


Abbildung 8-18: Versuchsfoto Modul Querrichtung

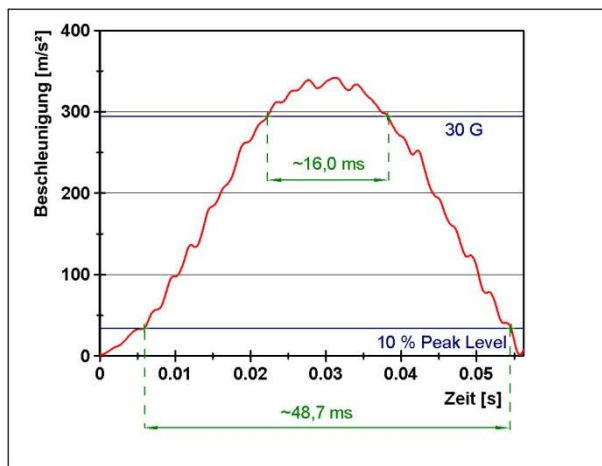


Abbildung 8-19: Beschleunigung Modul quer

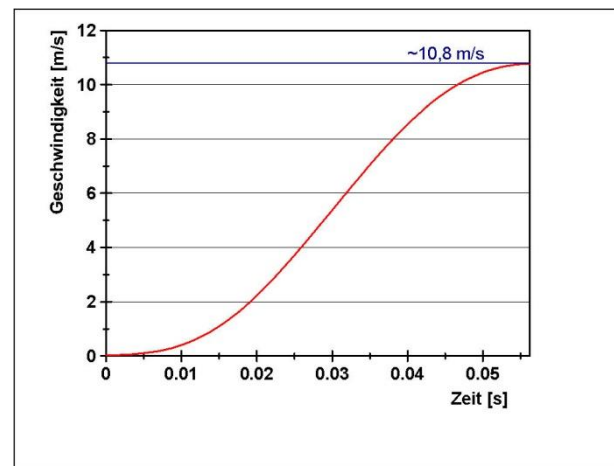


Abbildung 8-20: Geschwindigkeit Modul quer

Das Ergebnis ist gleich zu bewerten wie beim Versuch Modul in Längsrichtung (Hazard Level 0).

9 Weiterer Versuch und Verfassen einer Publikation

Es wurde ein Versuch zur Vertiefung der Kenntnis über das Batterieverhalten durchgeführt. Weiters wurde noch eine Publikation für eine Konferenz verfasst.

9.1 Penetration einer Zelle

Eine vollständig geladene Lithium-Ionen-Polymer-Zelle wurde mit einem Dorn angestochen, um die Auswirkungen dieses Kurzschlusses festzustellen. Dabei wurde kein Wert auf die Durchführung nach einer Testvorschrift gelegt, sondern das Ziel war, einen Kurzschluss zu provozieren. Eine Bildfolge des Versuchs sieht man in Abbildung 9-1. Es wurde ungefähr bis zur Zellenmitte gestochen. Bei der ersten Penetration erwärmte sich der Dorn leicht (linkes Bild). Beim Entfernen des Dorns entwich weißes Gas aus der Stichstelle. Bei der zweiten Penetration wurde, durch Rotieren des Dorns, ein heftiger Kurzschluss verursacht. Die Zelle blähte sich auf (mittleres Bild), platzte an einer Seite auf und es entwickelte sich eine große Stichflamme (rechtes Bild). Insgesamt brannte die Zelle für ca. 40 Sekunden.



Abbildung 9-1: Bildfolge Anstechen einer Zelle

9.2 Verfassen einer Publikation

Für die ICRASH 2010 Konferenz in Washington DC wurde eine Publikation verfasst. Diese Publikation ist vollständig im Anhang ab Seite 117 zu finden.

10 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die vorliegende Arbeit hat die Integration des EESS in Prototypen-Busse für den täglichen Linienbetrieb mit Nullemissionen unterstützt. Die Arbeit bestand darin, die Projektpartner bei fahrzeugsicherheitstechnischen Fragen zu unterstützen. Dabei wurde eine mechanisch crashsichere Integration unter den ausgearbeiteten Bedingungen realisiert.

10.1 Frontinstallation der Batterie

Die Simulationen zeigten, dass die Einbaulage im ehemaligen Motorraum, ohne Schutzsysteme nicht crashsicher ist. Als Schutzsystem kämen ein FUP-System, wie in der UN ECE 93 für HGVs beschrieben, oder eine Crashbox, wie sie bei Sportwägen zum Einsatz kommt, in Frage. In diesem Fall hätte wahrscheinlich auch eine Leichtkonstruktion Probleme mit dem zulässigen Gesamtgewicht verursacht, weil der gesamte Lastpfad durch das Fahrzeug verstärkt werden hätte müssen.

Zum jetzigen Zeitpunkt ist die chemische Sicherheit von Lithium-Ionen-Zellen noch nicht so weit entwickelt, dass Deformationen der Zellen zugelassen werden können. Den Motor einfach mit der Batterie zu tauschen, wäre für das Fahrzeugpackaging optimal. Im Moment ist es ohne Änderung des Fahrzeugkonzepts nicht möglich, die Batterie dort zu platzieren.

10.2 Installation unter dem Niederflerboden

Dieser Einbauort wurde gewählt, da er sowohl sicherheitstechnisch in Bezug auf die Batterie, als auch für die Gesamtfahrzeugkonzeption die beste Lösung darstellt. Die Simulationen haben gezeigt, dass das Batteriegehäuse einem Beschleunigungsverlauf laut [7], zu verstehen als idealisierter Verzögerungsverlauf eines möglichen Crashes, standhält. Aufgrund der fehlenden Information über die Buskonstruktion war es nicht möglich, mit einem kombinierten Fahrzeugbatteriemodell zu simulieren. Diese Packagingmethode wenden auch die Serienhersteller von BEV und HEV an. Mangels Konstruktionszeichnungen des Niederflurfahrzeugs musste auf eine Simulation in einem Gesamtfahrzeugmodell verzichtet werden.

10.3 Experimentelles Testen

Die Experimente zeigten, dass die Zellen und die Polykarbonatschutzplatten einen mechanischen Schocktest laut [7], zu verstehen als idealisierter Verzögerungsverlauf eines Crashes, mit keinem Funktionsverlust und keiner Beschädigung standhalten. Bei den Tests wurden die Bedingungen verschärft, da die Zellen nicht mit dem Sylomer-Schaum fixiert wurden. Die Tests verliefen unauffällig. Die Zellen zeigten keine Beschädigungen und sind mit Hazard Level 0 zu bewerten.

10.4 Resume

Die Crashesicherheit der implementierten Batterie wurde verbessert. Jedoch konnten nur wenige Lastfälle überprüft werden und nicht alle möglichen Crashszenarios mit den Simulationen abgedeckt werden. Die verwirklichte Konzeptlösung konnte nicht im Gesamtfahrzeug untersucht werden und die verwendete Batterie konnte nicht auf Packebene getestet werden.

11 Ausblick

In einer Zeit der CO₂ Emissionsreduktion und beginnender Knappheit von fossilen Kraftstoffen werden alternative Antriebssysteme immer mehr an Bedeutung gewinnen. Neben Wasserstoffmotoren und Brennstoffzellenfahrzeugen werden BEV und HEV immer überlegenswertere Alternativen zu konventionellen Antrieben mit fossilen Kraftstoffen.

Im Moment wird die EESS von allen Konstrukteuren elektrischer Fahrzeuge mit Lithium-Ionen-Batterien außerhalb der Crashzone verbaut. Es ist wahrscheinlich, dass in Zukunft die Sicherheitsmaßnahmen auf Zellebene und auch auf Packebene verbessert werden können. Eventuell ist es in einigen Jahren möglich, die Batterie in der Deformationszone zu platzieren und im Crashfall als Teil des Lastpfades zu nutzen.

Beim Projekt „Klimamobil – 0-Emissionsfahrzeuge im öffentlichen Nahverkehr“ wurde die Batterie in den beiden fertig konstruierten Bussen installiert und ein Feldtest wurde gestartet.

Mangels Zellen, aus Kostengründen und da keine geeignete Crashanlage zur Verfügung stand, wurden alle Versuche nur auf Zell- und Modulebene durchgeführt. Bei Folgeprojekten werden Versuche auf Packebene nötig sein. Dabei wird es nötig sein, bestehende Crashanlagen mit speziellen Sicherheitseinrichtungen (Rauchabzug, Löschanlage...) auszurichten. Es sollte aus statischen und dynamischen Zellen- und Modulversuchen ein FE-Modell abgeleitet werden. Weiters sollte mit diesen Tests Erfahrungen zu mechanischen Belastungen und deren Gefährdungspotential gewonnen werden. Dadurch könnte man die numerische Auslegung von Lithium-Ionen-Batterien in der Fahrzeugsicherheit bedeutend prognosefähiger machen.

12 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Geöffnete Lithium-Ionen-Polymerzelle	14
Abbildung 2-2: Prinzip der Entlade- und Ladereaktionen in Lithium-Ionen-Zellen [3]	15
Abbildung 2-3: Feuerdreieck und Feuertetraeder [5]	16
Abbildung 2-4: Strukturierte Platte für kontrollierte Quetschung [7]	21
Abbildung 2-5: Falltest [7]	22
Abbildung 2-6: Abmessungen der Lithium-Ionen-Polymer Zellen ePLB C020B [9]	24
Abbildung 3-1: Klimamobil Elektrobus 7,2 Tonnen [12]	27
Abbildung 4-1: Zentrale Einbaumöglichkeit [13]	29
Abbildung 4-2: Unbeschädigte Batterie eines PHEV nach einem Heck-Crashtest [14]	29
Abbildung 4-3: Einbaumöglichkeiten an den Randbereichen des Fahrzeugs [13]	30
Abbildung 4-4: Stabil gekapselte Batterie des Opel Ampera [15]	30
Abbildung 4-5: Ausgasvolumen beim Thermal Runaway von verschiedenen Li-Ionen-Zellen [16]	31
Abbildung 4-6: Space Frame des Steyr 1050 mit Deformationselement (Pfeil) vor der Batterie [17]	32
Abbildung 4-7: Anordnung von Crashesensoren für Rückhaltesysteme [19]	32
Abbildung 4-8: Aluminiumhitzeschild [21]	33
Abbildung 5-1: Batterie im Fahrzeuginnenraum	34
Abbildung 5-2: Batterie am Dach	35
Abbildung 5-3: Batterie im Fahrzeugheck	35
Abbildung 5-4: Nachlaufbatterie im Busanhänger	36
Abbildung 5-5: Batterie im ehemaligen Motorraum	37
Abbildung 5-6: Batterie unter dem Niederflerboden	37
Abbildung 5-7: Genereller Batteriewechselvorgang	38
Abbildung 5-8: Prinzip Wechsel von der Unterseite	39
Abbildung 5-9: Prinzip Wechsel von der Seite	40
Abbildung 5-10: Prinzip Wechsel mittels Kipplade	41
Abbildung 6-1: 3D-Scan des Iveco Fahrgestells	43
Abbildung 6-2: Fahrzeugfront 3D Scan	43
Abbildung 6-3: Bauraum inklusive Batterie	44
Abbildung 6-4: Mock-Up im ehemaligen Motorraum	45
Abbildung 6-5: Lastfall I Frontal Impact	46
Abbildung 6-6: Lastfall II Car to Car Crash	46
Abbildung 6-7: Lastfall III Pole Side Impact	47
Abbildung 6-8: CAD-Batteriemodell	48
Abbildung 6-9: FE-Batteriemodell	48
Abbildung 6-10: Hauptbestandteile des FE-Modells außen	49
Abbildung 6-11: Hauptbestandteile des FE-Modells innen	49
Abbildung 6-12: CAD-Batteriepaket	50

Abbildung 6-13: FE-Batteriepaket	50
Abbildung 6-14: Zwischenplatten und Schweißverbindungen	51
Abbildung 6-15: Gehäuse und Deckel	52
Abbildung 6-16: Batteriehalterung	53
Abbildung 6-17: Batteriehalterung verschweißt	53
Abbildung 6-18: Ergebnis Mechanische Schocktests	54
Abbildung 6-19: Trapezblech der Trennwände	54
Abbildung 6-20: Ergebnis Drop Tests	55
Abbildung 6-21: Iveco Daily 35 C 14 Plattform	56
Abbildung 6-22: Iveco Daily 35 C 14 CAD-Modell	56
Abbildung 6-23: Iveco Daily 35 C 14 FE-Modell	56
Abbildung 6-24: Hauptbestandteile des FE-Modells.....	57
Abbildung 6-25: Befestigung Querträger	59
Abbildung 6-26: Befestigung Querträger Detail.....	59
Abbildung 6-27: Iveco Daily 35 C 14 FE-Modell	60
Abbildung 6-28: Angenommene Massenverteilung des kleineren Busses inklusive Batterie	60
Abbildung 6-29: Anordnung der Rigids und Massenpunkte	61
Abbildung 6-30: Integration des Batteriemodells	62
Abbildung 6-31: Ausgangslage 30 km/h und 40 % Überdeckung	63
Abbildung 6-32: Ergebnis 30 km/h und 40 % Überdeckung	64
Abbildung 6-33: In Konstruktionszeichnung eingepasste Batterie	65
Abbildung 6-34: NCAP Fronttest Mercedes Viano [24].....	65
Abbildung 6-35: Frontal Underrun Protection System [25]	66
Abbildung 6-36: Crashbox des Gumbert Apollo [26]	66
Abbildung 7-1: CAD-Batteriemodell.....	68
Abbildung 7-2: FE-Batteriemodell.....	68
Abbildung 7-3: Hauptbestandteile des FE-Batteriemodells außen	69
Abbildung 7-4: Hauptbestandteile des FE-Batteriemodells innen	69
Abbildung 7-5: Entgasungslöcher mit Gummistoppeln	71
Abbildung 7-6: Entgasungslöcher im FE-Modell	71
Abbildung 7-7: Positionen der Schrauben	72
Abbildung 7-8: Detail Schraubenverbindung Deckel	72
Abbildung 7-9: Befestigung kleiner Deckel großer Deckel CAD-Modell.....	73
Abbildung 7-10: Befestigung kleiner Deckel großer Deckel FE-Modell.....	73
Abbildung 7-11: Detail Befestigung kleiner Deckel großer Deckel FE-Modell	73
Abbildung 7-12: Außenschachtel CAD-Modell.....	74
Abbildung 7-13: Außenschachtel FE-Modell.....	74
Abbildung 7-14: Außenschachtel mit Nuten CAD-Modell.....	75
Abbildung 7-15: Zwischenplatte CAD-Modell	75

Abbildung 7-16: Außenschachtel mit Nuten FE-Modell.....	76
Abbildung 7-17: Zwischenplatte FE-Modell	76
Abbildung 7-18: Träger am Gehäuse CAD-Modell	78
Abbildung 7-19: Träger am Gehäuse FE-Modell	78
Abbildung 7-20: Batteriedummie FE-Modell	79
Abbildung 7-21: Batteriedummie mit PC-Schutz FE-Modell	80
Abbildung 7-22: Sylomer-Schaumstoff	81
Abbildung 7-23: CAD-Modell der Batteriehalterung.....	82
Abbildung 7-24: Hauptbestandteile des FE-Modells der Krafteinleitungen	83
Abbildung 7-25: Halterung Ausschubseitig CAD-Modell.....	84
Abbildung 7-26: Halterung Ausschubseitig FE-Modell.....	84
Abbildung 7-27: Halterung Längsseitig CAD-Modell	85
Abbildung 7-28: Halterung Längsseitig FE-.....	85
Abbildung 7-29: Halterung Längsseitig CAD-Modell	86
Abbildung 7-30: Halterung Längsseitig FE-.....	86
Abbildung 7-31: Mid-1 Puls Beschleunigung.....	87
Abbildung 7-32: Mid-1 Puls Geschwindigkeit	88
Abbildung 7-33: Mid-1 Puls Weg.....	88
Abbildung 7-34: FE-Modell mit alter Halterung.....	90
Abbildung 7-35: FE-Modell mit neuer Halterung.....	90
Abbildung 7-36: FE-Modell mit altem Träger.....	90
Abbildung 7-37: FE-Modell mit neuem Träger.....	90
Abbildung 7-38: Alte Zentrierhilfen	91
Abbildung 7-39: Neue Zentrierhilfen	91
Abbildung 7-40: Legende für die Simulationsergebnisse.....	92
Abbildung 7-41: Erstes Simulationsergebnis mit kleinen Zentrierhilfen und Halterungen.....	92
Abbildung 7-42: FE-Modell mit alter Halterung.....	93
Abbildung 7-43: Alte Zentrierhilfen	93
Abbildung 7-44: Zweites Simulationsergebnis mit vergrößerten Halterungen und ohne Zentrierhilfen	93
Abbildung 7-45: FE-Modell mit neuer Halterung.....	94
Abbildung 7-46: Letztes Simulationsergebnis mit vergrößerten Zentrierhilfen und Halterungen	94
Abbildung 7-47: FE-Modell mit neuem Träger.....	94
Abbildung 7-48: Neue Zentrierhilfen	94
Abbildung 7-49: Letztes Simulationsergebnis innen	95
Abbildung 7-50: Vereinfachtes Simulationsmodell Ausgasen.....	97
Abbildung 7-51: Simulationsergebnis Ausgasen	97
Abbildung 8-1: Batteriemodul aufgebaut aus vier Zwölferpaketen.....	98
Abbildung 8-2: Konstruktion Einzelzelle Längsrichtung	100
Abbildung 8-3:Versuchsfoto Einzelzelle Längsrichtung.....	101

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 8-4: Beschleunigung Einzelzelle längs.....	101
Abbildung 8-5: Geschwindigkeit Einzelzelle längs.....	101
Abbildung 8-6: Versuchsfoto Einzelzelle Querrichtung.....	102
Abbildung 8-7: Beschleunigung Einzelzelle quer.....	102
Abbildung 8-8: Geschwindigkeit Einzelzelle quer	102
Abbildung 8-9: Versuchsfoto Zwölferpaket Längsrichtung	103
Abbildung 8-10: Beschleunigung Zwölfer längs	103
Abbildung 8-11: Geschwindigkeit Zwölfer längs.....	103
Abbildung 8-12: Versuchsfoto Zwölferpaket Querrichtung.....	104
Abbildung 8-13: Beschleunigung Zwölfer quer	104
Abbildung 8-14: Geschwindigkeit Zwölfer quer	104
Abbildung 8-15: Versuchsfoto Modul Längsrichtung.....	105
Abbildung 8-16: Beschleunigung Modul längs	105
Abbildung 8-17: Geschwindigkeit Modul längs.....	105
Abbildung 8-18: Versuchsfoto Modul Querrichtung.....	106
Abbildung 8-19: Beschleunigung Modul quer.....	106
Abbildung 8-20: Geschwindigkeit Modul quer.....	106
Abbildung 9-1: Bildfolge Anstechen einer Zelle	107

13 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: EUCAR Hazard Levels [7]	19
Tabelle 2-2: Tests nach dem FreedomCar Abuse Test Manual [7]	20
Tabelle 2-3: Mechanische Schocktests [7]	23
Tabelle 2-4: Technische Daten der Lithium-Ionen-Polymer Zellen ePLB C020B [9]	23
Tabelle 5-1: Bewertung der Einbaumöglichkeiten	38
Tabelle 6-1: Hauptbestandteile des FE-Modells	48
Tabelle 6-2: Materialwerte für den gewählten Batteriepaketwerkstoff	50
Tabelle 6-3: Materialwerte für die Batteriehalterung und deren Verschweißung	53
Tabelle 6-4: Hauptbestandteile des FE-Modells	57
Tabelle 6-5: Materialwerte für den gewählten Längs- und Querträgerwerkstoff [22]	58
Tabelle 6-6: Wahre Spannungs-Dehnungskurve für den gewählten Längs- und Querträgerwerkstoff [22]	58
Tabelle 6-7: Materialwerte für den gewählten Schraubenwerkstoff	59
Tabelle 6-8: Reibungswerte der Kontakte	62
Tabelle 7-1: Hauptbestandteile des FE-Batteriemodells	68
Tabelle 7-2: Materialwerte für EN 1.4301 [28]	70
Tabelle 7-3: Wahre Spannungs-Dehnungskurve für EN 1.4301 [28]	70
Tabelle 7-4: Materialwerte für den gewählten Schraubenwerkstoff	72
Tabelle 7-5: Materialwerte für den Batteriedummiewerkstoff	79
Tabelle 7-6: Materialwerte für die Polykarbonatplatten	81
Tabelle 7-7: Hauptbestandteile des FE-Modells der Krafteinleitungen	83
Tabelle 7-8: Kontakte FE-Modell der Batterie inklusive der Batteriebefestigung	86
Tabelle 7-9: Simulationsmatrix	89
Tabelle 8-1: Versuchsmatrix	99
Tabelle 8-2: Hauptbestandteile des FE-Modells der Krafteinleitungen	99

14 Literaturverzeichnis

- [1] <http://www.bmvit.gv.at/innovation/verkehrstechnologie/a3plus/index.html> Zugriff am 27-4-2010
- [2] <http://batteryuniversity.com/partone-5-german.htm> Zugriff am 27-4-2010
- [3] Winter M, Möller K-C. Primäre und wiederaufladbare Lithium-Batterien. Script zum Praktikum Anorganisch-Chemische Technologie; Institut für Chemische Technologie Anorganischer Stoffe; 2006
- [4] Koller S. Elektrochemische Energiespeicher/ -wandler für HEV und EV. Script zur Vorlesung Innovative Fahrzeugantriebe.; Institut für Chemische Technologie von Materialien; 2010
- [5] <http://www.blaulicht.at> Zugriff am 28-4-2010
- [6] Hollmotz L, Hackmann M. Lithium-Ionen-Batterien - Anforderungen und Risiken beim Einsatz aus dem Blickwinkel der Kraftfahrzeugsicherheit; 7. VDI-Tagung Fahrzeugsicherheit; 2009
- [7] Doughty DH, Crafts CC. FreedomCAR Electrical Energy Storage System Abuse Test Manual for Electric and Hybrid Electric Vehicle Applications SAND2005-3123; Sandia National Laboratories; 2006
- [8] Berger T. Fraunhofer Institut für angewandte Elektrochemie, Erhalt am 2-10-2009
- [9] EIG. PRODUCT SPECIFICATION for Rechargeable Lithium Ion Polymer Battery Model: ePLB C020B; EIG Ltd.; 2008
- [10] EIG. Performance Test Lithium Polymer secondary battery C020B; Korea Electrotechnology Research Institute; 2010
- [11] Unkelhaeuser T, Smallwood D. United States Advanced Battery Consortium Electrochemical Storage System Abuse Test Procedure Manual SAND99-0497; Sandia National Laboratories; 1999
- [12] Projektinformation intern; Kutsenits Handels- und Bus-Konstruktions GmbH
- [13] Sommer U. Vortragsunterlagen: Randbedingungen und Strategien für elektrische Mobilität unter Berücksichtigung von Sicherheitsaspekten; Grazer Safety Update 2009; 2009
- [14] <http://www.automotivetestingtechnologyinternational.com> Zugriff am 12-10-2009
- [15] Kinsky T. Opel Ampera Elektrofahrzeug mit Reichweitenverlängerer; Grazer Safety Update 2009; 2009
- [16] Projektinformation intern; Austrian Institute of Technology
- [17] Simon P. Methoden zur Entwicklung einer Kleinserien-Leichtfahrzeugstruktur in Space Frame Technologie; Grazer Safety Update 2009; 2009
- [18] <http://www.autobild.de/artikel/crashtest-toyota-prius-1002172.html> Zugriff am 19-10-2010
- [19] <http://www.volkswagen.at> Zugriff am 5-5-2010
- [20] <http://www.articlefield.com/59217/hitachi-developed-a-plug-in-hybrid-with-lithium-ion-battery-pneumatic-cylinder/> Zugriff am 19-10-2010
- [21] <http://www.isa-racing.com> Zugriff am 5-5-2010
- [22] Projektinformation intern; Vehicle Safety Institut TU Graz
- [23] <http://www.ncac.gwu.edu/vml/models.html> Zugriff am 14-5-2010
- [24] <http://www.euroncap.com> Zugriff am 10-10-2009
- [25] <http://www.volvotrucks.com> Zugriff am 12-10-2009
- [26] <http://www.metawell.com> Zugriff am 13-10-2009
- [27] Projektinformation extern; Firma RTC Slowenien
- [28] Projektinformation extern; ThyssenKrupp Nirosta GmbH

Anhang:

Anhang A Verwendete Software und Hardware

Anhang B Publikation für die ICRAASH Konferenz

Anhang C Aufbau eines Batteriemoduls

Verwendete Software und Hardware

Alle erstellten CAD-Zeichnungen dieses Kapitels wurden in dem Programm CATIA Version 5.17 erstellt. CAD-Daten von [16] und von [27] wurden in einer ProEngineer Version erstellt und im Stepfile-Format übergeben. Alle FE-Modelle und Simulationsanalysen wurden in dem Programmpaket Altair HyperWorks 10.0 erstellt. Pre-Processing wurde in HyperMesh durchgeführt und Post-Processing in HyperView. Die Simulationen wurden mit dem sowohl expliziten als auch impliziten FE-Solver LS-DYNA Version mpp971s R2 Revision 7600.1116 (Analyse ehemaliger Motorraum) bzw. LS-DYNA Version mpp971s R4.2.1 Revision 53450 (Analyse unter dem Niederflurboden) mit der expliziten Standardmethode auf einem Clusterrechner berechnet. Clusterdaten für die Analyse ehemaliger Motorraum siehe Tabelle A. Clusterdaten für die Analyse unter dem Niederflurboden siehe Tabelle B. Die Textfiles als Input für LS-DYNA wurden mit dem Editor TextPad Version 4.7.3 bearbeitet.

Als Einheiten für die Berechnung wurden nicht die SI-Einheiten verwendet, sondern Millimeter (mm) als Längenmaß, Tonnen (t) als Masseneinheit und Sekunden (s) als Zeitmaß. Diese Einheiten wurden deshalb gewählt, damit die Simulation das Ergebnis für Spannungen in Newton pro Quadratmillimeter (N/mm²) ausgibt.

Tabelle A: Clusterdaten Analyse ehemaliger Motorraum

Platform	OS Level	Compiler
Linux Workstation AMD- Opteron	SuSE 9.1 (MPICH 1.2.6)	PGI pgf90 6.1-4

Tabelle B: Clusterdaten Analyse unter dem Niederflurboden

Platform	OS Level	Compiler
OpenMPI 1.2.5 Xeon64	Linux Red Hat 4 upd 4	Intel Fortran Compiler 10.1

Publikation für die ICRASH Konferenz

Integration of a crashworthy battery in a fully electric city bus

Ch. Breitfuß*, J. Gugler*, W. Sinz*, F. Feist*, H. Lacher**, F.V. Conte **, S. Kutsenits***, E. Kieninger****

*Vehicle Safety Institute, Graz University of Technology, Inffeldgasse 11, 8010 Graz, Austria

**Austrian Institute of Technology, Austria

*** Kutsenits Handels- und BuskonstruktionsgmbH, Austria

**** Filmarchiv Austria, Austria

Abstract - Research on the safety of fully electric vehicles becomes more and more important in recent years. Starting from the safety aspects of hybrid vehicles, more and more focus is placed on fully electric vehicles. This paper focuses on a novel concept for a fully electric city bus and the crashworthy integration of changeable batteries.

The fully electric city bus under study is operated in regular service. The driving profile was evaluated and scenarios for crash hazards were defined. Considering most recent safety measures and draft test procedures the main issues for a crashworthy integration of the battery were derived.

The steady operation of the city buses all over the day requires a changeable battery system as a trade-off between battery weight and payload. Up to three reloading cycles are used to provide the energy for the all day operation.

The changeable battery pack had to be located at an easily accessible and safe position, while still providing the ground-clearance of a low-floor vehicle for easy access and space for a wheelchair. Therefore two approaches were analysed in greater detail. One having the battery in the front area ahead of the firewall and a second concept having the battery pack located under floor.

Analysis of the frontal battery location calls for reinforcements in order to guarantee sufficient safety in frontal impacts. The position under the floor is less critical but requires a slim battery compartment for a low-floor vehicle. Since being the more promising concept, the housing was designed and crash analysis performed for the under-floor approach.

Experimental testing focused on the stability of the selected lithium-ion cells under crash conditions as well as battery modules.

Two different sizes of fully electric city buses were built using the crashworthy battery integration. The two vehicles run for a two year period in a field operational test.

This study was performed within the project „Klimamobil – Local traffic with zero-emission vehicles” funded by the Austrian Federal Ministry for Transport, Innovation and Technology under the “A3 - Austrian Advanced Automotive Technology” program.

Keywords:

Electric Vehicles, Lithium-Ion-Batteries, Zero-Emission, Battery-Safety,

Abbreviations

BEV...	Battery Electric Vehicle	HEV...	Hybrid Electric Vehicle
CAD...	Computer-aided Design	HGV...	Heavy Goods Vehicle
ECE...	Economic Commission of Europe	NCAP...	New Car Assessment Program
EESS...	Electrical Energy Storage System	PC...	Polycarbonate
EUCAR...	European Council for Automotive Research & Development	PTC...	Positive Temperature Coefficient
FMVSS...	Federal Motor Vehicle Safety Standard	SAE...	Society of Automotive Engineers
FreedomCAR...	Cooperative Automotive Research	SEI...	Solid Electrolyte Interphase
FUP...	Frontal Underrun Protection	UL...	Underwriters Laboratories
		UN...	United Nation
		VDA...	Verband der Automobilindustrie

Introduction

Due to recent problems of conventional fuel, like CO₂-emission and starting shortage of fossil fuels, new methods which are more environmentally friendly need to be developed to guarantee the personal

mobility. One of these new technologies is the electric drive used in BEVs and also in HEVs. No matter whether it is a BEV or HEV an electrical storage system with high energy density to reduce the vehicle weight is required. The most promising EESS-type is the Lithium-Ion-Battery with high energy density, little self discharge and no memory effect. Lithium is the lightest metal with the greatest electrochemical potential and has the greatest energy density [1]. But Lithium is also a Material with a very high reactivity. This property and the high energy density lead to a risk using batteries based on Lithium-Ion-technology in vehicle applications.

Lithium-Ion-Battery Safety

One key factor for having competitive electric vehicle is to install a battery system with high energy density, as obvious drawback with the increase of energy density increase the relative risk related to it [4]. Lithium-ion batteries offer the highest energy density commercially available, but due the high reactivity of the compounds within the cell the battery design should carefully investigated all the stresses which affect the safety: electrical (overcharge, overdischarge, forced discharge, internal and external short circuit), mechanical (vibration, drop, acceleration, crush, nail penetration, ect.), and thermal (thermal stability, flame, overheating, ect.) [5].

Even if all those stresses and corresponding tests are apparently different the main failure mechanisms could be summarised in few exothermic reactions: SEI decomposition, reaction of the intercalated lithium at the anode with the electrolyte and the binder, electrolyte decomposition, cathode material decomposition, in specific cases the formation of lithium metal reaction which reacts with the electrolyte [6]. All those reactions release heat which contribute to the increase of the cell temperature which activates other even more exothermal and rapid reactions which lead to the thermal runaway of the cell.

At module or system level the heat release from a cell in thermal runaway status heats the contiguous cells which could also be triggered into a thermal runaway, so that a chain reaction takes place. Even if the chemical phenomena are complex and still under investigation from the application point of view the problem could be simplified as shown in Figure 1. Practically the goal is the design of a battery system which in any condition will not end into a thermal runaway, which is usually temperature triggered. Hence for achieving a safe battery system different measures should be adopted. Firstly, the selection of a cell with suited anode and cathode active materials which releases reduced little heat and minimal amount of oxygen. Secondly, a module and system design with a suited thermal cooling configuration which, in case of single cell thermal runaway, is able to distribute the heat in the contiguous environment without triggering the rest of the cells, so that no chain reaction takes place.

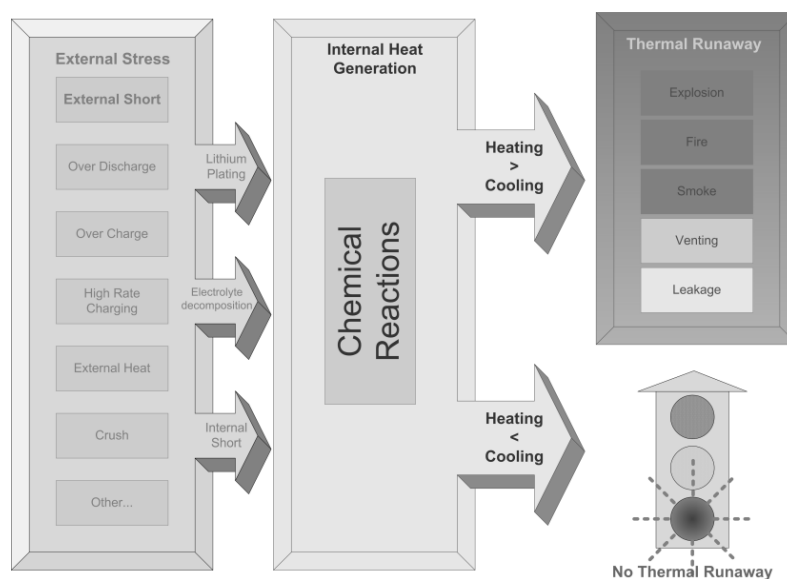


Figure 1. Thermal pathway for lithium ion battery [8]

At cell level various safety measures are adopted, either active or passive ones. For instance as active measure could be mentioned cathode lithium oxide with strong bind with the oxygen so that no or limited release of oxygen is possible. As passive measure could be cited the adoption of a safety valve

which opens at a certain internal pressure, mainly generated by the electrolyte decomposition and gasification, or the adoption of PTC-ceramics, which works fine in low voltage applications but, as described in [7], it is inadequate in the high voltage of a fully electric bus. Other measures are the shut down separator, fire retardant and redox shuttle electrolyte additives.

For assessing the safety performance of the cell specific cell level test are possible, among the previously mentioned the most relevant are the short circuit, the nail penetration, the over test and the overcharge.

At module and system level different measures are possible, among them a key role is played by a suited thermal management, an adequate BMS able to estimate accurately the real state of the battery system.

Then a crash safe lithium-ion battery system should have an insulation system for avoiding the electrical shock of the passengers, and a stable mechanical construction able to minimize the deformation during a crash. This is important for protecting the EESS to mechanical damage like penetration or mechanical overload. At the same time it should be provided safety measures for emergency cases like holes for the leaking gas in the event of venting cells.

Many different test specifications and regulations for EESS exist partly hold in general and partly specialized for automotive applications. Table°1 summarise the most relevant test specifications and regulations for the integration of a battery in a fully electric city bus.

Table°1. Excerpt of the existing regulations and specifications for EESS

FreedomCAR Electrical Energy Storage System Abuse Test Manual for Electric and Hybrid Electric Vehicle Applications
United States Advanced Battery Consortium Electrochemical Storage System Abuse Test Procedure Manual
VDA-Testspezifikation für Lithium-Ion-Batterien für Hybrid- Elektrofahrzeuge
UL 1642 & SU 2054 Lithium Batteries
FMVSS 305, Electric Powered Vehicles: Electrolyte Spillage And Electrical Shock Protection
EUCAR Specification of Test Procedures for High Voltage Hybrid Electric Vehicle Traction Batteries
IEC 62281 Safety of primary and secondary lithium cells and batteries during transport
UN Manual of Test and Criteria Recommendations on the Transport of dangerous goods ST/SG/AC.10/11/Rev.4
SAE J1766 Recommended Practice for Electric and Hybrid Electric Vehicle Battery Systems Crash Integrity Testing

This project was based on the test specifications of the FreedomCAR Electrical Energy Storage System Abuse Test Manual for Electric and Hybrid Electric Vehicle Applications [3]. The tests are divided into four main groups which represent a total of 16 different tests. Table°2 shows the differentiation of the tests.

Table°2. Existing Tests of the FreedomCar Abuse Test Manual

Mechanical Abuse Tests					
Controlled Crush	Penetration	Drop	Immersion	Roll-Over-Simulation	Mechanical Shock
Thermal Abuse Tests					
Thermal Stability	Simulated Fuel Fire	Elevated Temperature Storage	Rapid Charge/Discharge	Thermal Shock Cycling	
Electrical Abuse Tests					
Overcharge/Overvoltage	Short Circuit	Overdischarge/Voltage Reversal		Partial Short Circuit	
Vibration Testing					

As shown in Figure 2 in a lithium-ion battery system could be identified three assembly levels: (1) cell, (2) module and (3) pack. Every test is defined for one, two or all three of these assembly levels. The result of the test can be categorized by the eight EUCAR hazard levels shown in Table^o3.

Table^o3. EUCAR Hazard Levels [3]

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

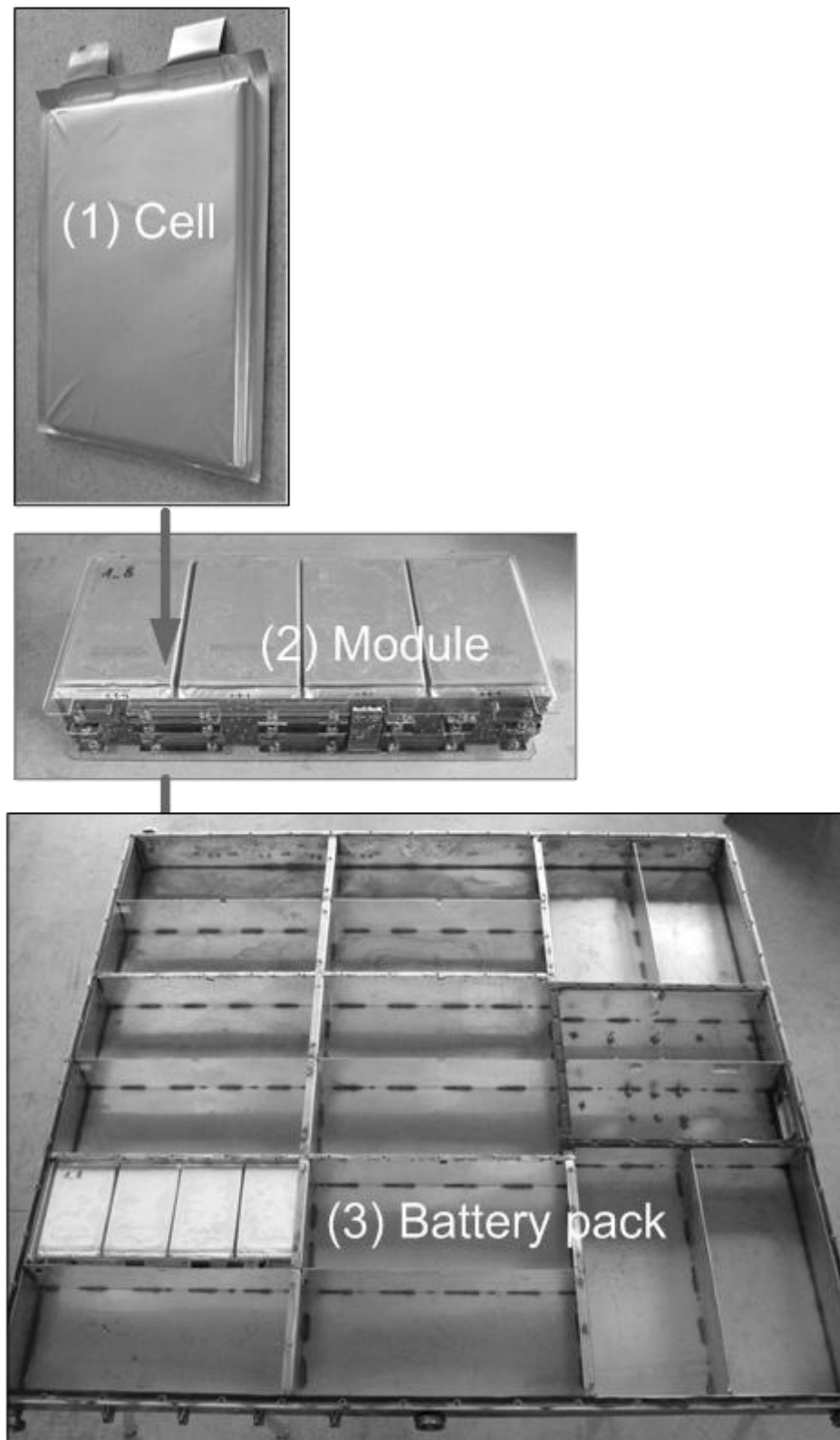


Figure 2. The three battery system levels of the klimamobil full electric city

Aims

The aim of the project was to build two battery electric buses for the line operation in two communities of Austria. The smaller bus has a gross vehicle weight of 3.5 tons and larger bus has a gross vehicle weight of 7.2 tons.

Both buses are based on different sizes of the Iveco Daily series and have the same principal design.

In addition to designing the configuration of transmission and electric engine, the bodywork and other technical details which are typical for automotive engineering, it was necessary to develop a battery case, a battery changing system and checking the crashworthiness of the EESS. The latter points mentioned are the main topics of this paper.

Methods

The paper describes two different mounting positions, which were tested for crash safety with finite element simulation. The first analysed position was in the former engine compartment in the front and the second under the lower floor of the buses.

For the crashworthiness of the lithium-ion-cells and their safety measures experimental testing was accomplished.

Frontal Installation of the Battery Pack

The finite element model used for the analysis of this mounting position was assembled by a battery and a vehicle model. But also the stability of the battery model alone was simulated with some load cases.

The Vehicle model (Figure 3) was based on the chassis frame of the Iveco Daily assembly used for the small bus. This model was a simplified model to study principal tendencies; the final bus layout was planned to be a low-floor vehicle. The simplified model is designed using shell elements. For the material – except the tires and axes – standard construction steel was chosen. The tires and axes were taken from the European Standard EN-1317 test vehicle models of the Politecnico di Milano [2].

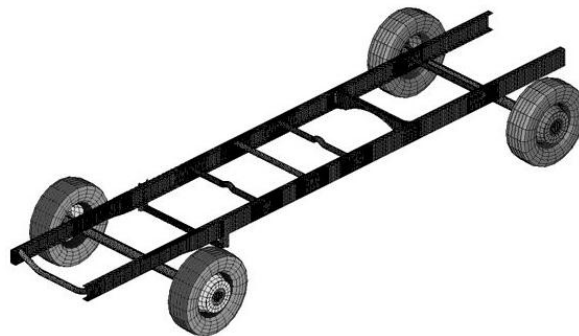


Figure 3. Simplified Finite Element Vehicle Model

The battery layout was based on the available space in the vehicle front. The battery model was abstracted to study fundamental tendencies. The lithium-ion-modules had different amount of cells at this development step and were modelled out of solid elements. The rest of the model was built with shell elements. Figure 4 shows the outside (left) of the battery and the inside (right) with the modules and the inner blades. For the whole model – also the cell modules – standard construction steel was chosen. The only difference for the modelled cell modules is an adapted density to meet the real weight.

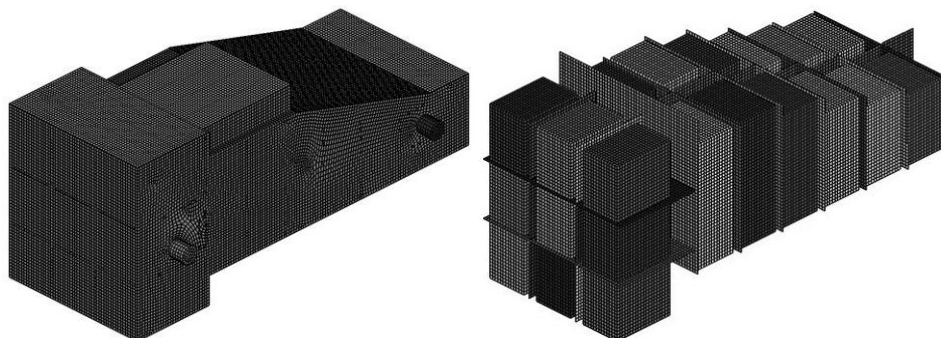


Figure 4. Inner and Outer Finite Element Battery Model

With the combined simulation model - battery and vehicle - four cases basically based on the common tests specified by NCAP, FMVSS and UN ECE but slightly modified were simulated. Those test configurations for the simulation are shown in Table°4.

Table°4. Realized Simulations with the Combined Model

Impact Angle	Impact Speed	Overlap	Barrier Type
	[km/h]	[%]	
Frontal	56	40	Rigid
Frontal	56	100	Rigid
30°	56	100	Rigid
Frontal	30	40	Rigid

The results of the simulation are shown in Figure 5. It is obvious that the battery gets deformed. But the simulation describes a worst-case scenario with no additional protection observed in reality like car body. Only the two main chassis beams protect the battery but these circumstances take the missing load path over the engine into account.

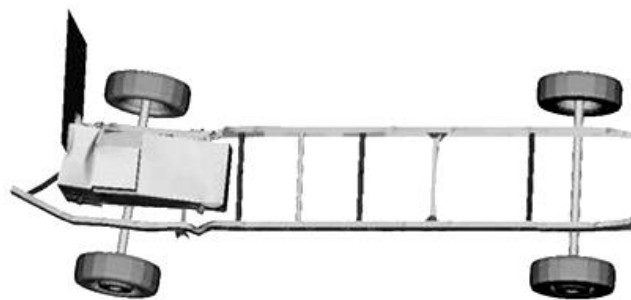


Figure 5. Result of the Frontal Impact with 30km/h and 40% Overlap against a rigid Barrier

Taking only the isolated battery pack into account, two different cases were simulated. Those are the Drop Test and the Mechanical Shock Test according to the FreedomCAR Electrical Energy Storage System Abuse Test Manual for Electric and Hybrid Electric Vehicle Applications already mentioned in Table°2. The results of the simulated load cases of the isolated battery are shown in Figure 6. .

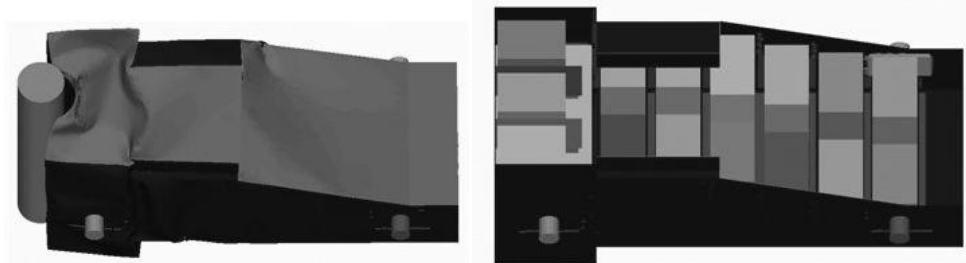


Figure 6. Results of the Drop an Mechanical Shock Test with the Battery

The Drop Test (left) was realized with an equivalent speed of a drop from 10 m height against a rigid cylinder. For the Mechanical Shock Test the Mid-1 acceleration pulse was chosen. See Table°5 for the definitions of the acceleration pulses for Shock Tests in the FreedomCAR Electrical Energy Storage System Abuse Test Manual for Electric and Hybrid Electric Vehicle Applications.

Table°5. Mechanical Shock Tests in the FreedomCar Abuse Test Manual [3]

Level	Velocity [m/s]	Maximum Duration [ms]	Minimum Acceleration	Acceptable Pulse Form
Low	6.7	55	20G for 11ms	25G for 30ms Halfsine
Mid-1	11.1	65	30G for 16ms	35G for 51ms Halfsine
Mid-2	13.3	110	20G for 22ms	25G for 60ms Halfsine

Under the Lower Floor Installation of the Battery Pack

Due to the requirement not to deform the battery in the front position an alternative installation space had to be selected. The most appropriate position with a good protection is a central position in the vehicle. Having a low-floor bus in mind, a very thin battery concept with a large base area mounted under the floor had to be evaluated. This seemed to be a very good solution for the design of the vehicle, weight distribution and gross weight of the bus, accessibility of the battery for changing the battery and battery crash safety. For this concept no suitable vehicle model was available. Therefore the main focus was to the stability of the EESS box numerically. The meshed model outside view (left) and inside view (right) is shown in Figure 7. Figure 7. Inner and Outer Finite Element Battery Model

The whole model is built from shell elements and consists of fifteen 12x4 modules (12 cells with 4 cells grouped together in a module) with inner ribs separating the modules. In the top cover are holes for over-pressure in case of venting cells. The modules are covered with polycarbonate protection blades and the proper position of the modules is done by elastic rubber foam in each axis.

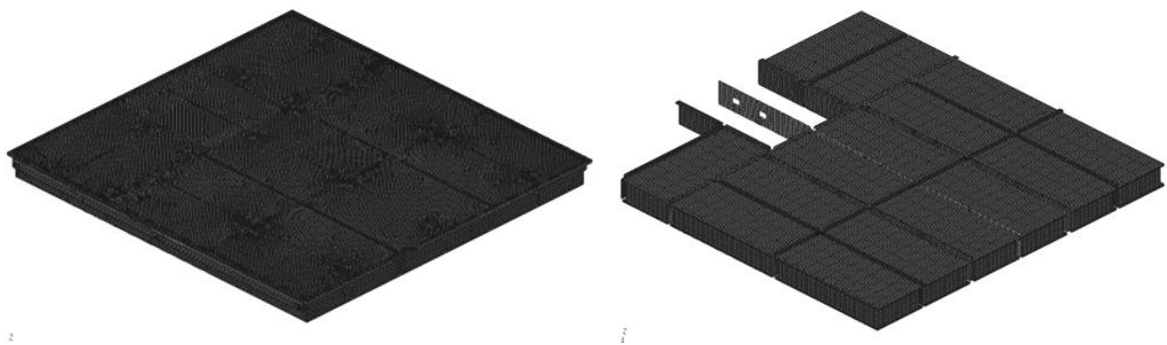


Figure 7. Inner and Outer Finite Element Battery Model

For the material the properties of austenitic stainless steel EN 1.4301 as it is used for the box in reality were used. The lithium-ion-modules – consisting of 12x4 cells plus electronic – are modelled in combination with the polycarbonate protection blades. Material properties are the same than the ones used for the box except for density. The density of the PC is the standard density of this material and the density of the modules is the adapted density for 12x4 cells plus 15% additional weight for electronic divided through the counted volume of the elements with their chosen thickness. Figure 8 shows the modelled Module without (left) and with polycarbonate protection (right).

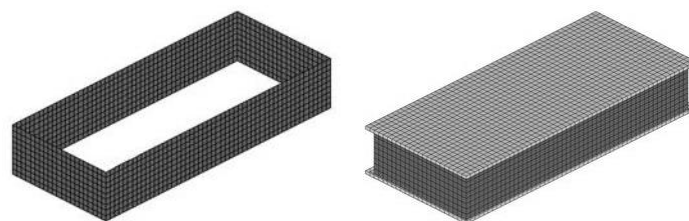


Figure 8. Battery Module without and with Polycarbonate Protection

For contact reasons between the blades and the battery box the polycarbonate blades have one element in a 90 degree angle on the edge. The modules are fixed from top with pressure with the screwed cover over permanent elastic rubber foam inserts called Sylomer®. On the shorter side they are fixed with Sylomer® as well. Modelling the Sylomer® foam was forbear in the sense of simulating a worst case scenario with full pressure on the box and modules.

A problem especially for the smaller bus was the allowed gross weight of 3.5 tons. Therefore simulations with three different material thicknesses were progressed. The Mid-1 pulse was chosen again for the load case, see Table°5. This pulse was applied on both lateral sides, rear and front sides. The pulses were inserted to the battery over the contact surfaces of the changing system. The CAD model of the changing system (left) and the meshed contact surfaces (right) are seen in Figure 9.

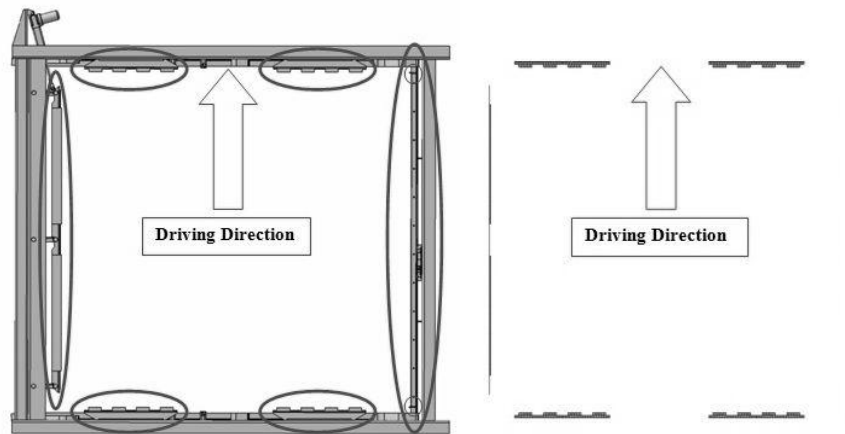


Figure 9. CAD Model and Meshed Contact Surfaces Topview

All realized simulations can be seen in Table°6. It came up that it is not safe to reduce the thickness to less than 2 mm. The weight reduction is very low compared to the total weight of the battery pack, about 5 percent. The availability of thinner steel is much worse, the effective stress in the internal blades is unproportionally higher and the protection against penetrations is better. The cover has to be 2 mm as well because the contact of the changing system and the battery is in longitudinal direction fixed at the cover.

Table°6. Realized Simulations

Box Thickness [mm]	Cover Thickness [mm]	Pulse Direction	Pulse Form
2	2	Front	Mid-1
2	2	Rear	Mid-1
2	2	Left	Mid-1
2	2	Right	Mid-1
1.5	1.5	Front	Mid-1
1.5	1.5	Rear	Mid-1
1.5	1.5	Left	Mid-1
1.5	1.5	Right	Mid-1
1.5	2	Front	Mid-1
1.5	2	Rear	Mid-1
1.5	2	Left	Mid-1
1.5	2	Right	Mid-1

Experimental Testing

The battery modules were modelled simplified. In reality the cells are glued together to a stack of 12 pieces and connected with electronic to three other stacks. Those four stacks are glued to the

polycarbonate protection blades on bottom and on top to build one module. The protection plates on top have pockets for the electric cable. The FE model did not take into account these pockets. Other blades on the sides are used for electrical isolating to the battery box and for inserting the Sylomer® foam. A matrix for experimental testing was planned to find out the stability of the glued areas, the polycarbonate protection blades and the cells. The matrix is shown in Table°7. There was no possibility to test a whole pack so the decision was made to test a cell, a stack with 12 cells and a module with 4x12 cells.

Table°7. Experimental Testing Matrix

Assembly Level	Pulse Direction (Cell Axes)	State of Charge	Pulse Form
Cell	Long Side	Fully Charged	Mid-1
Cell	Broadside	Fully Charged	Mid-1
Stack	Long Side	Fully Charged	Mid-1
Stack	Broadside	Fully Charged	Mid-1
Module	Long Side	Discharged	Mid-1
Module	Broadside	Discharged	Mid-1

The tests were accomplished with a HyperG catapult sled. All test result can be described with the EUCAR Hazard Level 0. *No effect. No loss of functionality.* The stack test along the long side was probably the hardest test because the working surface was the smallest and no polycarbonate protection blades were used.

Pictures of every test object during the tests in the same order than the test are described in Table°7 shows Figure 10.

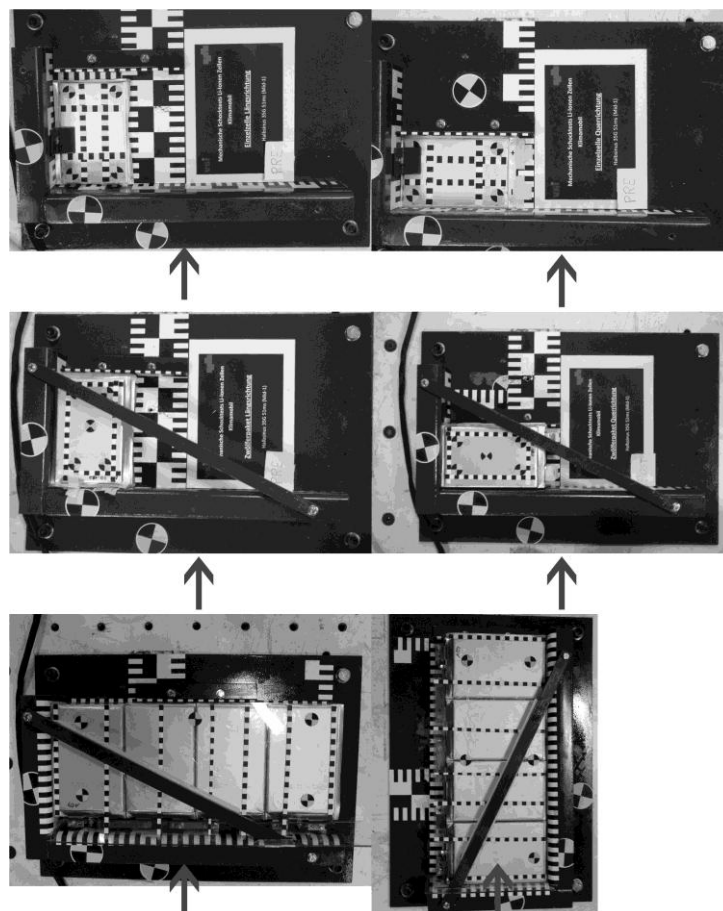


Figure 10. Pictures of the Test Objects during the different Tests

RESULTS AND DISCUSSION

Frontal Installation of the Battery Pack

The simulations showed that the mounting position in the former engine installation space is not safe without a protecting system. This could be a FUP-System described in UN ECE 93 used in HGVs or a crashbox as used in sports cars. In this case a protection system even built in lightweight construction could cause problems for the gross vehicle weight because the whole loadpath through the vehicle has to be strengthened.

At this time chemical safety of lithium-ion-cells is not developed to the point allowing deformation of cells. Replacing the combustion engine in the front by the battery pack would be very packaging efficient. The additional efforts for providing crash safety are contradicting the aims of maximum total weight. At the moment this space is not usable for lithium-ion-batteries without changing the vehicle concept.

Under the Lower Floor Installation of the Battery Pack

The mounting position under the lower floor is as mentioned before an excellent compromise. The simulations showed that the battery box can stand a crash comparable to the consumer protection tests and the legally obligated tests. Because of missing information about the final bus design it was not possible to simulate an integrated battery in the whole vehicle. This packaging for the battery in the centre of the vehicle can also be seen in commercial HEV and BEV.

Experimental Testing

The experimental testing showed that the cells and the protection polycarbonate blades stand a standardized crash without any destruction or loss of functionality in a worst case scenario without the fixing Sylomer[®] foam.

SUMMARY

The work showed that it is possible to design and build a battery pack for buses for everyday line service with zero emissions in a crashsafe way. The changing system for the EESS reduces the comfort of the vehicle in use a little bit but this effort is arguable compared to the advantages of no emissions and no need to refill petrol.

OUTLOOK

In times of reducing CO₂-emission and the beginning shortage of fossil fuels alternative drive systems will get more and more important. Next to hydrogen engines and fuel cell vehicles BEVs and HEVs will be thinkable alternatives to conventional drives with fossil fuel.

At the moment all designers of any kind of electric vehicles with lithium-ion-EESS put the battery outside the crash zone. In future safety measures of the cells and the whole pack will increase. Maybe in a few years it will be possible to place the battery in the deformation zone of the vehicle to use it as a part of the loadpath in the case of a crash.

The battery pack will be installed in the final design of the busses and the fleet operation test will start.

Acknowledgment

The Austrian Ministry for Traffic, Innovation and Technology (BMVIT) advances research and development projects in the fields of innovative drive systems and alternative fuels with the A3plus programme. The target is to create more efficient and more environmentally acceptable traffic for the future.

This study was performed within the project „Klimamobil – Local traffic with zero-emission vehicles“ which is funded by the A3plus programme.

This project was performed by the following partners: Filmarchiv Austria (coordinator), Österreichisches Forschungs- und Prüfzentrum Arsenal GmbH, Fa. Kutsenits Handels- und Bus-Konstruktions GmbH, TU Graz, Institut für Fahrzeugsicherheit, Ökomobil Austria, Ökostrom Vertriebs GmbH, Gemeinde Perchtoldsdorf (ÖBB Postbus GmbH), Gemeinde Hornstein

References

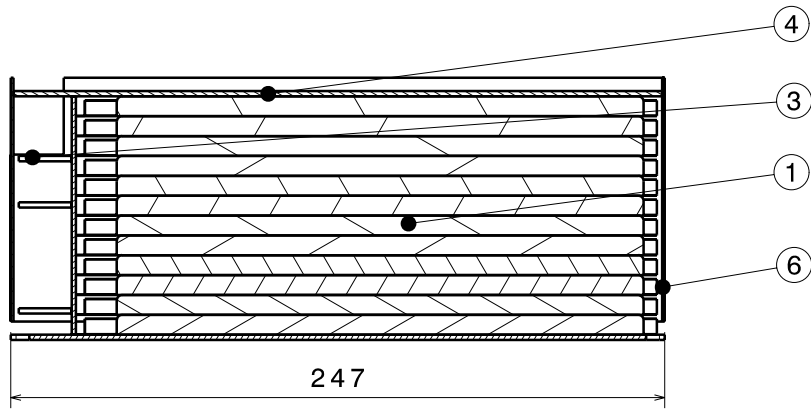
- [1] <http://batteryuniversity.com/partone-5-german.htm> Zugriff am 27-4-2010
- [2] <http://www.ncac.gwu.edu/vml/models.html> Zugriff am 14-5-2010
- [3] Doughty DH, Crafts CC. FreedomCAR Electrical Energy Storage System Abuse Test Manual for Electric and Hybrid Electric Vehicle Applications SAND2005-3123; Sandia National Laboratories; 2006
- [4] Winter M, Möller K-C. Primäre und wiederaufladbare Lithium-Batterien. Script zum Praktikum Anorganisch-Chemische Technologie; Institut für Chemische Technologie Anorganischer Stoffe; 2006
- [5] Biensan Ph., Simon B., Pèrés J.P., et al On Safety of lithium-ion cells, Journal of Power Sources 81-82 (1999) 916-912
- [6] Spotnitz R., Franklin J. Abuse behavior of high-power, lithium-ion cells, Journal of Power Sources 113 (2003) 81-100
- [7] Darcy E., Davies F., Jeevarajan J., et al Lithium-Ion Cell PTC Limitations and Solutions for High Voltage Battery Applications, ECS 203rd Meeting , Paris-France, 2003
- [8] Conte F.V., Sicherheitsrelevantes Design von Lithium-Ionen-Batterien, ATZe Elektronik Ausgabe Nr.: 2009-01
- [9] Conte F.V., Safety as accompanying philosophy in the battery design, Elektrik/Elektronik in Hybrid- und Elektrofahrzeugen, 2009, pp.172-182 ISBN 978-3-8169-2817-1

Aufbau eines Batteriemoduls

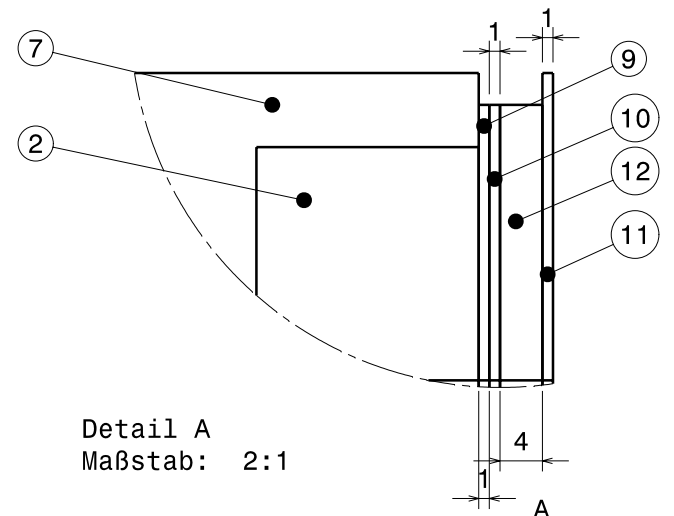
Die Stückliste eines aufgebauten Moduls ist in Tabelle C zu sehen. Die zugehörige Konstruktionszeichnung ist auf der nächsten Seite abgebildet.

Tabelle C: Clusterdaten Analyse ehemaliger Motorraum

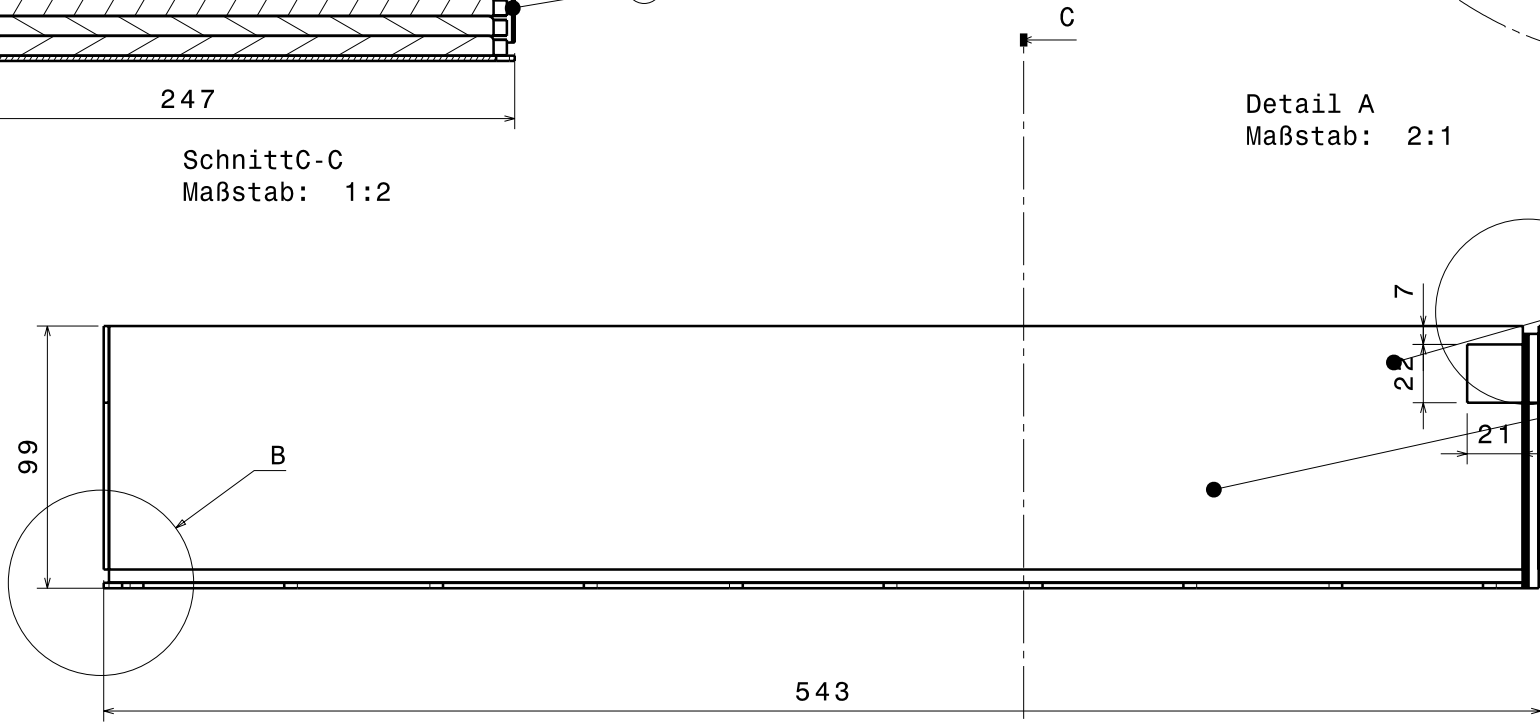
1	2	3	4	5	6
Pos.	Menge	Einheit	Benennung	Sachnummer/Norm - Kurzbezeichnung	Bemerkung
1	48	Stck	Lithium-Ionen-Zelle		
2	1	Stck	Leiterplatte		
3	4	Stck	Kontaktzusammenschluß		
4	1	Stck	PC-Platte oben	h=2mm	
5	1	Stck	PC-Platte unten	h=2mm	
6	1	Stck	PC-Platte hinten	h=1mm	
7	1	Stck	PC-Platte vorne	h=1mm	
8	1	Stck	PC-Platte seitlich rechts	h=2mm	
9	1	Stck	PC-Platte seitlich links	h=1mm	
10	1	Stck	PC-Platte Schaumstoff innen	h=1mm	
11	1	Stck	PC-Platte Schaumstoff aussen	h=1mm	
12	1	Stck	Schaumstoff seitlich		



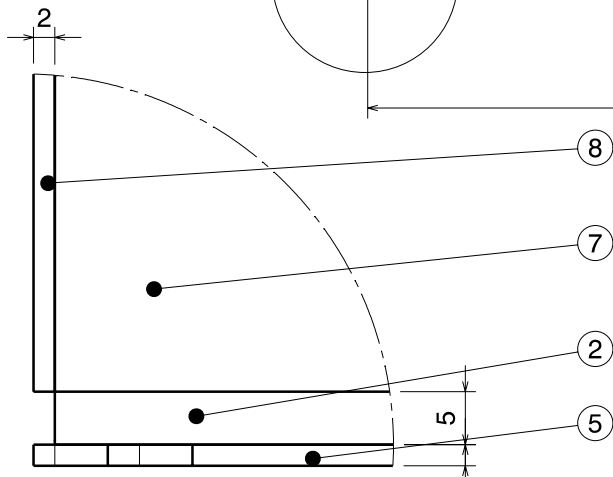
Schnitt C-C
Maßstab: 1:2



Detail A
Maßstab: 2:1



Vorderansicht
Maßstab: 1:2



Detail B
Maßstab: 2:1