

Julian Göllner

**Konzeptentwicklung einer dynamischen
Prüfvorrichtung zur Untersuchung
mechanischer Eigenschaften von
Hochvoltbatteriemodulen**

Diplomarbeit

Maschinenbau

Technische Universität Graz

Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften

Institut für Fahrzeugsicherheit

Dipl.-Ing. Ellersdorfer Christian

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

Graz, 2014

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

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

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

Graz, am

.....

(Unterschrift)

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei Herrn Dipl. Ing. Christian Ellersdorfer sowie dem gesamten Institut für Fahrzeugsicherheit der Technischen Universität Graz für die Betreuung und Ermöglichung dieser Diplomarbeit bedanken.

Ein ganz besonderer Dank gilt meiner Familie, insbesondere meinen Eltern und meinem Großvater, die mich während meines gesamten Studiums in allen Belangen bestmöglich und großzügig unterstützt haben.

Beim Verfassen dieser Zeilen denke ich an meinen kürzlich verstorbenen, geliebten Vater, wie er mich während des Studiums mit seiner antiautoritären Art, seinem unermüdlichen Optimismus nach Rückschlägen sowie seiner überschwänglichen Freude bei Erfolgserlebnissen begleitet hat und mich so nie das Ziel aus den Augen verlieren ließ.

Vielen Dank!

Diese Arbeit wurde teilweise im Rahmen des Forschungsprojektes „A04 T02 MIBAT“ in Kooperation mit dem Kompetenzzentrum „Das virtuelle Fahrzeug Forschungsgesellschaft mbH“ erstellt. Aus diesem Grund möchte ich mich an dieser Stelle für die Zusammenarbeit bei der Durchführung meiner Diplomarbeit bedanken.

Kurzfassung

Elektromobilität im Straßenverkehr gewinnt – vor allem getrieben durch strenger werdende Umweltauflagen – immer mehr an Bedeutung. Die Technologie ermöglicht eine Reduzierung des CO₂-Ausstoßes im Fahrbetrieb und bietet die Möglichkeit, Unabhängigkeit von fossilen Treibstoffen zu erlangen.

Eine weitreichende Verbreitung der Technologie wird aber durch einige Faktoren gebremst. So wäre es unter anderem wünschenswert, dass die Sicherheit von elektrischen Energiespeichern, wie sie in Elektrofahrzeugen verbaut werden, erhöht wird. Von ihnen gehen bei mechanischen Beschädigungen, wie sie in Unfallsituationen auftreten können, erhebliche Gefahren aus. Dabei kann es unter bestimmten Umständen zum „thermischen Durchgehen“ der Batteriezellen kommen, was zum Brand oder einer Explosion des Energiespeichers führen kann. Um das Risiko so gering wie möglich zu halten, werden die Energiespeicher in aktuellen Elektrofahrzeugen weitestgehend nicht in den Crashzonen untergebracht. Die Batteriesysteme werden zusätzlich mit konstruktiven Maßnahmen – einer Art Panzerung – geschützt.

Um das Sicherheitsrisiko eines chemischen Energiespeichers objektiv unter Realbedingungen zu bestimmen, sind neue innovative Testmethoden unerlässlich. Ideal wäre eine Prüfvorrichtung, mit der das Batteriesystem, losgelöst vom Gesamtfahrzeug, hinsichtlich ihres mechanischen Verhaltens beurteilt werden kann. Neben der eigentlichen Gefahrenbewertung können die generierten Daten auch für die Validierung von numerischen Berechnungsmodellen herangezogen werden.

In dieser Arbeit wird eine solche Prüfmethode für die Abbildung von Crashbelastungen auf Energiespeichersysteme vorgestellt. Zu Beginn wurde eine Recherche über den Stand der Technik, das heißt, wie die Sicherheit von Akkumodulen aktuell untersucht wird, durchgeführt. Das Gefahrenpotenzial der Technologie wird aufgezeigt und ein Sicherheitskonzept für die entwickelte Prüfmethode wurde ausgearbeitet. Die Ableitung der Crashbelastungen, welche gleichzeitig Randbedingungen des Prüfstandes darstellen, erfolgte mithilfe von Gesamtfahrzeugsimulationen. Mit diesen Randbedingungen und einem zusätzlich entwickelten Anforderungskatalog wurden Konzepte erstellt und bewertet. Das vielversprechendste Konzept wurde konstruiert und aufgebaut. Für den objektiven Prüfstandkonzeptnachweis wurden Tests, basierend auf definierten Lastfällen mit geladenen und ungeladenen Hochvoltbatteriemodulen, durchgeführt. Mit den Ergebnissen der Tests konnte die Tauglichkeit des entwickelten Prüfstandkonzeptes erfolgreich nachgewiesen werden.

Mit der neuen, vorgestellten Prüfmethode kann schon früh im Entwicklungsprozess die Sicherheit von Batteriesystemen einfach und kostengünstig überprüft und verbessert werden. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Methode flexibel hinsichtlich der Integration unterschiedlichster Belastungsszenarien ist und bei zukünftigen Batteriesystemen auch das Abprüfen von Belastungszuständen, die beispielsweise in Crashzonen auftreten, erlaubt.

Abstract

Attention of e-mobility is being pushed by stricter environmental regulations. The technology allows a reduction of CO₂ emission in road traffic and offers the possibility to become independent from fossil fuels.

The wide spread of the technology is still hold up by various factors. Among others it would be desirable to improve the safety of chemical energy storage systems used in electric vehicles. There is a significant risk of danger when these high voltage battery modules are damaged mechanically in traffic accidents. Under certain circumstances such damage may cause a so called „thermal-runaway“, which can lead to fire or explosion of the battery cells. To keep risks as low as possible the batteries in actual vehicles are placed beyond crash affected areas. In addition to that battery systems are reinforced with armour-like protection.

New innovative test methods are needed to determine objectively the safety hazard of chemical energy storage devices. It would be ideal to investigate the mechanical behaviour of battery systems in crash situations apart from the entire vehicle. On the one hand the recorded data is useful for the evaluation of dangers and on the other hand it is needed for the validation of numerical simulation models.

In this thesis such a test environment is introduced. It allows the exposure of high voltage battery systems to realistic crash loads. At the beginning a research on the state of the art of battery test methods was done. Potential risks were discussed and a safety concept for the regarded test environment was elaborated. Numerical simulations with entire vehicles were performed to derive crash equivalent loads on the energy storage. Based on these loads and a set of requirements various concepts were outlined. The most promising concept was designed and built up. Tests based on defined loading cases were executed with charged as well with discharged high voltage battery modules. With the results of these tests it was possible to successfully prove the capability of the developed concept test environment.

The introduced test method offers an inexpensive way to review and improve the safety of high voltage battery systems in an early stage of the development process. In addition to that the method is flexible so that various load cases can be implemented. Another advantage is that it is possible to test future coming battery modules with loads that occur in crash affected areas.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Elektromobilität und Sicherheit.....	1
1.2	Aufgabenstellung und Zielsetzung	4
1.3	Vorgehensweise	6
1.4	Prüfverfahren für Lithium-Ionen-Akkus	7
1.4.1	Existierende Prüfverfahren in Normen und Richtlinien	7
1.4.2	Zusätzliche Prüfverfahren	11
2	Stand der Technik – Batterieprüfanlagen.....	13
2.1	Batterietests des TÜV Süd.....	13
2.2	Prüfumgebung der Firma CETECOM	17
3	Sicherheit.....	18
3.1	Gefahrenpotenzial der Lithium-Ionen-Technologie	18
3.1.1	Chemische Gefahren	19
3.1.2	Thermische Gefahren	20
3.1.3	Elektrische Gefahren	20
3.1.4	Mechanische Gefahren.....	20
3.2	Sicherheitsvorkehrungen für die betrachtete Prüfumgebung	21
4	Methodik	22
4.1	Vorgehensweise zur Durchführung von Modulversuchen.....	22
4.2	Gesamtfahrzeugmodell.....	25
4.3	Energieäquivalenter Ansatz	26
5	Belastungen auf den Energiespeicher	30
5.1	Analyse von Crash Belastungen am Gesamtfahrzeug.....	30
5.2	Gesamtfahrzeugsimulationen zur Ermittlung von Randbedingungen	32
5.2.1	Seitenaufprall auf einen Pfahl nach Euro-NCAP mit 29km/h	33
5.2.2	Frontalaufprall nach Euro-NCAP (USA-IIHS) mit 64km/h	40
5.2.3	Frontalaufprall nach US-NCAP (NHTSA) mit 56km/h.....	46
5.2.4	Frontalaufprall nach NHTSA mit 40km/h.....	51
5.3	Zusammenfassung der abgeleiteten Randbedingungen.....	55

6	Prüfumgebung.....	56
6.1	Anforderungen	56
6.2	Möglichkeiten der Realisierung einer dynamischen Prüfumgebung.....	58
6.2.1	Konzept 1 – Druckluftzylinder	59
6.2.2	Konzept 2 – Wagen geführt	59
6.2.3	Konzept 3 – Schienen-Schlitten-System.....	60
6.2.4	Konzept 4 – Methode nach TÜV Süd	61
6.2.5	Konzept 5 – Methode der Firma Cetecom	62
6.3	Gewähltes Konzept.....	63
6.3.1	Prüfablauf	64
6.3.2	Energieeintrag in das Akkumodul	65
6.4	Prüfaufbau und Komponenten	66
6.4.1	Stoßwagen.....	66
6.4.2	Aufbauten an der Barriere.....	67
6.4.3	Bremseinrichtung.....	68
6.4.4	Positionierung der Kameratechnik	72
6.5	Messtechnik.....	73
6.5.1	Wegmessung.....	73
6.5.2	Kraftmessung.....	76
6.5.3	Geschwindigkeitsmessung	76
6.5.4	Gewicht des Stoßwagens	77
6.5.5	Spannungsmessung	77
6.5.6	Beschleunigungsmessung.....	77
7	Versuche und Ergebnisse	78
7.1	Ziele der Versuchsreihen	78
7.2	Crashumgebung	79
7.3	Gewählter Lastfall	81
7.3.1	Randbedingungen	81
7.3.2	Impaktorform.....	81
7.3.3	Belastung des Moduls.....	82
7.4	Versuche zur Inbetriebnahme der Prüfvorrichtung.....	83
7.4.1	Randbedingungen der Inbetriebnahmeversuche	83
7.4.2	Prüfaufbau mit Modulersatzkörper	84

7.4.3	Aufgezeichnete Daten und Auswertung der Inbetriebnahmeversuche	85
7.5	Ungeladene Modulversuche	90
7.5.1	Randbedingungen der ersten Versuchsreihe.....	90
7.5.2	Verbesserungen zu den Inbetriebnahmeversuchen	90
7.5.3	Prüfaufbau für die ungeladenen Versuche.....	91
7.5.4	Aufgezeichnete Daten und Beobachtungen.....	92
7.5.5	Auswertung der ungeladenen Versuche	97
7.6	Geladene Modulversuche	100
7.6.1	Angepasster Prüfaufbau	100
7.6.2	Verbesserungen zu den ungeladenen Versuchen	101
7.6.3	Randbedingungen für die zweite Versuchsreihe.....	102
7.6.4	Aufgezeichnete Daten und Beobachtungen.....	102
7.6.5	Auswertung der geladenen Versuche	108
8	Zusammenfassung und Ausblick	111
8.1	Durchgeführte Versuche	111
8.2	Verbesserungsmöglichkeiten	112
8.2.1	Lastfälle	112
8.2.2	Barriere	113
8.2.3	Messtechnik.....	113
8.3	Ausblick.....	113
9	Literaturverzeichnis	114
10	Abbildungsverzeichnis	118
11	Tabellenverzeichnis	123
12	Abkürzungsverzeichnis	124

1 Einleitung

Elektromobilität bietet eine Möglichkeit Unabhängigkeit von fossilen Treibstoffen zu erlangen und den Kohlendioxidausstoß von Fahrzeugen im Fahrbetrieb zu senken. [1] [2] Für den Erfolg von Elektromobilität sind verschiedene Faktoren entscheidend. Ein wesentlicher Faktor dabei ist die Sicherheit und Zuverlässigkeit der Technologie zu deren Verbesserung diese Arbeit einen Beitrag leistet.

1.1 Elektromobilität und Sicherheit

Die Elektrifizierung von Kraftfahrzeugen stellt heute neue Anforderungen an Hersteller, Zulieferer und Rettungskräfte, um die Sicherheit des Nutzers sicherzustellen. [3]

Verglichen mit konventionellen Antriebskonzepten ist diese Technologie im modernen Fahrzeugbau noch relativ neu und unerforscht. Mit ihr gehen im Straßenverkehr neue Gefahren einher, die von den Traktionsbatterien auf Lithium-Ionen-Basis ausgehen. In aktuellen Elektro- und Hybridfahrzeugen kommen überwiegend elektrische Energiespeicher (EES) dieser Bauart zur Anwendung.

Der Aspekt „Sicherheit und Zuverlässigkeit“ ist einer der wichtigsten für den Erfolg von Elektromobilität. Die fünf ausschlaggebenden kritischen Faktoren für die Verbreitung der Technologie sind in Abbildung 1 dargestellt.

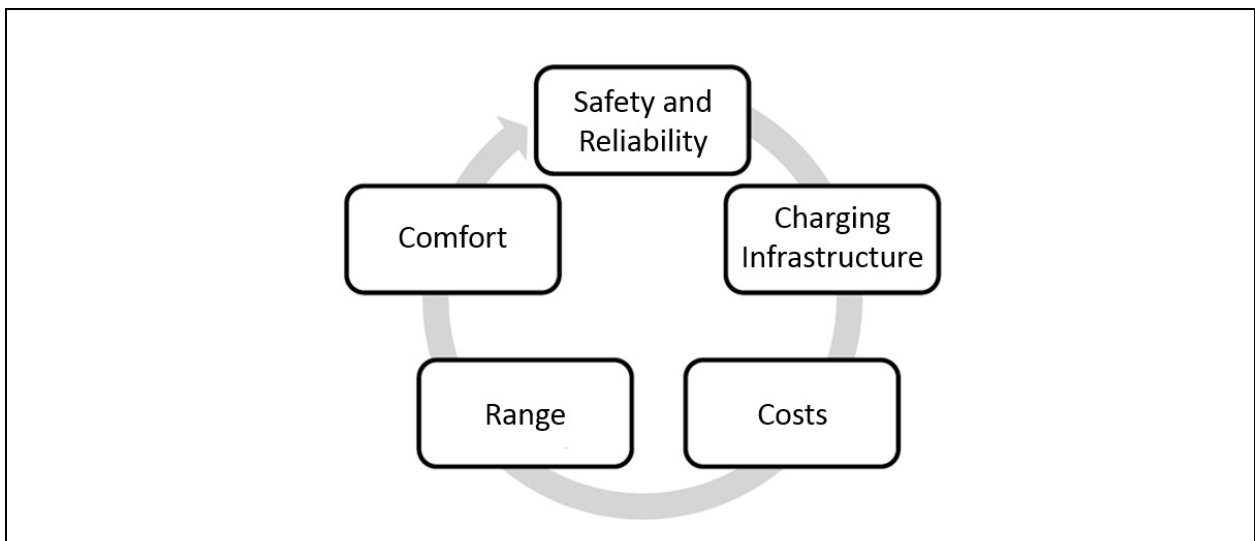


Abbildung 1: Kritische Faktoren für den Erfolg von Elektromobilität [3]

Nutzer schienen bisher, laut den Ergebnissen einer Nutzerbefragung im Zuge einer Feldstudie von BMW aus den Jahren 2010 und 2011, den Sicherheitsaspekten der neuen Technologie weniger kritisch gegenüberzustehen. Im Bericht „Normen bringen die Zukunft in Fahrt“ von PwC et al. [3] wird vermutet, dass sie sich von der neuen

Technologie erwarten, dass die hohen Sicherheitsstandards für konventionelle Fahrzeuge auch bei Elektrofahrzeugen angewandt werden. Ebenso sind sicherheitskritische Aspekte eines Elektrofahrzeuges vielen Nutzern nicht bekannt. In diesem Bericht wird auch erwähnt, dass sicherheitsrelevante und elektromobilitätsspezifische Ereignisse, wie zum Beispiel ein Brand der Traktionsbatterie nach einem Unfall, die Einstellung der Nutzer abrupt ändern kann. Sicherheitskritische Themen können in den Fokus der Öffentlichkeit gelangen und die Etablierung von Elektromobilität am Markt erheblich beeinträchtigen. [3] [4]

So zum Beispiel ist in den USA 21 Tage nach einem Crashtest am Gelände der National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) in Wisconsin im Mai 2011 ein Fahrzeug vom Typ Chevrolet Volt des Herstellers General Motors in Brand geraten. Als Brandherd konnte dabei die Traktionsbatterie ausgemacht werden. [5]

Eben genau solche Zwischenfälle haben in der jüngsten Vergangenheit weltweit für Aufsehen gesorgt und dadurch zu mehr Skepsis gegenüber dieser neuen Art der Mobilität geführt.

Ein anderer Fall aus China (Mai 2012) zeigt, dass bei einem Unfall mit drei Todesopfern ein Elektrofahrzeug des Typs e6 des Herstellers BYD in Brand geriet. Dieser Brand ging ebenfalls vom elektrischen Energiespeicher aus und wurde in den Schlagzeilen der Weltpresse thematisiert. [6]

Jüngst gibt es jedoch auch positive Nachrichten die der Verbreitung von Elektrofahrzeugen neuen Schwung geben können.

Laut einer Pressemitteilung vom 19. August 2013 des zu diesem Zeitpunkt sehr erfolgreichen Herstellers von Elektrofahrzeugen „Tesla Motors“ erreichte das Fahrzeugmodell Tesla Model S (Limousine) bei der NHTSA-Crashbewertung fünf Sterne. Dies stellt das Beste jemals bei einem NHTSA-Test erreichte Ergebnis dar. Der Tesla Model S besitzt eine größere Knautschzone in der Fahrzeugfront als Fahrzeuge mit konventionellem Antrieb, was der Sicherheit bei Hochgeschwindigkeits-Frontalaufprällen zugutekommt. Dies ist aufgrund des Fehlens des bei Verbrennungsmotoren üblichen, großen Motorblocks möglich. Für den Pfahl-Seitenaufprall-Test hat Tesla Motors Aluminiumträger in die Seiten des Fahrzeugs integriert. Bei Heckaufprällen sorgt eine doppelte Stoßstange für zusätzliche Sicherheit. Der Tesla Model S besitzt außerdem eine verstärkte B-Säule und aufgrund der Einbaulage der Akkus im Fahrzeugboden einen sehr geringen Schwerpunkt. Diese Vorkehrungen tragen positiv zur Sicherheit beim Überschlagstest bei. [7]

Diese Maßnahmen sind – zusätzlich zum schweren Batteriesystem – mit ein Grund dafür, dass der Tesla Model S im Vergleich zu konventionellen Limousinen vergleichbarer Größe ein sehr hohes Leergewicht von 2108kg aufweist. [8]

Einige Tage nach Bekanntgabe dieser positiven Nachricht gingen jedoch Berichte und Fotos eines brennenden Fahrzeugs vom Typ Tesla Model S um die Welt. Obwohl der Brand laut Statement von Elon Musk, CEO von Tesla Motors, auf ein seltenes und äußerst ungewöhnliches Ereignis zurückzuführen ist, brach der Aktienkurs des börsennotierten Unternehmens nach Bekanntwerden des Vorfalls um 12 Prozent ein und vernichtete somit einen Börsenwert von in etwa drei Milliarden Dollar. Das Fahrzeug war vor dem Brand auf einer Autobahn mit einem auf der Straße liegenden Objekt kollidiert. Dieses verkeilte sich zwischen Unterboden und Fahrbahn und bohrte sich in eines der Akkumodule des Fahrzeuges was schlussendlich zum Brand führte. [9] [10]

Wie sensibel auf solche Nachrichten reagiert wird, zeigt wie wichtig diese Thematik für Automobilhersteller und die Verbreitung der Elektromobilität im Allgemeinen ist.

Um solche Zwischenfälle in Zukunft verhindern zu können, muss alles daran gesetzt werden, dass die neuen Anforderungen und Risiken, die von solchen elektrischen Energiespeichern ausgehen, besser erforscht werden, um die Sicherheit erhöhen zu können. Um das zu erreichen, sollten die Traktionsbatterien der Fahrzeuge idealerweise bereits während des Entwicklungsprozesses getrennt vom Gesamtfahrzeug mit realen Belastungen getestet werden. Dazu müssen schnellstmöglich neue Testvorschriften und Sicherheitsstandards erarbeitet werden, da die geltenden nur unzureichend jene Belastungen abdecken, die bei Unfällen auftreten können. Um solche dynamischen, crashähnlichen Belastungen abbilden zu können werden neue Prüfvorrichtungen benötigt. Damit wird es möglich, früh im Entwicklungsprozess maßgeblich zur Verbesserung der Sicherheit der Fahrzeuge und der Lithium-Ionen-Technologie beizutragen. Mit den aktuell verfügbaren Prüfmethode ist es nur bedingt möglich – ohne einen Gesamtfahrzeugcrash durchzuführen – Traktionsbatterien von Elektro- oder Hybridfahrzeugen realistischen Belastungen auszusetzen.

1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Konzeptentwicklung einer innovativen dynamischen Prüfumgebung mit welcher Hochvoltbatteriesysteme, wie sie in Elektro- und Hybridfahrzeugen Anwendung finden, auf ihr Verhalten bezüglich des Einwirkens mechanischer Belastungen getestet werden können. Dies sollte getrennt vom Gesamtfahrzeug mit realistischen Belastungen – so wie sie beispielsweise bei einem Unfall auftreten – geschehen. In dieser Arbeit erfolgte die Auslegung auf Hochvoltbatteriemodule (im Folgenden auch als „Modul“ oder „Akkumodul“ bezeichnet), welche mehrere Akkuzellen enthalten. In einem Elektrofahrzeug sind wiederum mehrere dieser Module verbaut welche im Begriff „Akkupack“ oder „Pack“ vereint werden. Abbildung 2 zeigt ein solches Modul (10 Zellen), um ein Bild davon zu erhalten welche Art von Energiespeichern untersucht wurde. Priorität bei der Entwicklung dieser Prüfumgebung hatte die Flexibilität des Versuchsaufbaus. Mittels geringfügiger Änderungen sollte die Prüfumgebung an Module verschiedener Hersteller und individuelle Lastfälle angepasst werden können.



Abbildung 2: Beispiel für ein Akkumodul der Firma Johnson Controls [11]

Der Untersuchungsbereich sollte auch eine Recherche über die aktuelle Situation im Bereich der Normen und Prüfvorschriften, über den aktuellen Stand der Technik von Prüfanlagen sowie die Ausarbeitung eines Sicherheitskonzeptes umfassen. Einen weiteren Schwerpunkt bildete die Analyse von Belastungen die während eines Unfalls auf den Energiespeicher wirken, um Lastfälle definieren zu können.

Verschiedene Konzepte sollten erstellt und bewertet werden. Schlussendlich war es das Ziel, das Konzept mit der besten Bewertung auszuarbeiten, die Prüfumgebung aufzubauen, in Betrieb zu nehmen und damit sowohl Versuche mit ungeladenen als auch mit geladenen Akkumodulen durchzuführen. Mithilfe eines umfangreichen Messkonzeptes sollten Kraft-Weg-Kurven aus den Versuchen abgeleitet werden, um die in die Module eingebrachte Energie zu bestimmen. Die gewonnenen Daten sollten auch dazu dienen, Simulationsmodelle validieren und verbessern zu können. Zudem sollten die Versuche mit Hochgeschwindigkeitskameras festgehalten und Daten wie

Temperatur und Spannung zur Untersuchung des thermischen bzw. elektrischen Verhaltens der Energiespeicher aufgezeichnet werden. Die Versuchsergebnisse sollten darüber hinaus diskutiert und mögliche Verbesserungsvorschläge erläutert werden.

Aus der Aufgabenstellung ergeben sich Anforderungen, die vom in dieser Arbeit entwickelten Prüfkonzept erfüllt werden müssen:

- Variabilität und Flexibilität des Versuchsaufbaus
- Aufbau für verschiedene Energiespeicher und Lastfälle adaptierbar
- Ableitung realistischer Belastungen auf den Energiespeicher mittels Finite-Elemente-Gesamtfahrzeugsimulationen
- Versuche auf Modulebene
- Gleichzeitiges Wirken von Beschleunigungen und Verformungen; Eine zeitliche Variabilität und Zuordenbarkeit von Beschleunigungs- und Deformationsphase ist notwendig
- Umfangreiches Messkonzept: Kraftmessung, Wegmessung, Spannungsmessung, Temperaturüberwachung, Videoaufzeichnung
- Widerstandsfähigkeit gegenüber Gefahren, die von den Energiespeichern ausgehen
- Umfassendes Sicherheitskonzept

1.3 Vorgehensweise

In einem ersten Schritt wurde eine Literaturrecherche über Normen und Richtlinien zu mechanischen Tests sowie über aktuell vorhandene Prüfumgebungen durchgeführt. Der Fokus lag hier auf dynamischen Tests. Ebenfalls behandelt wurden das Gefahrenpotential der hier betrachteten Batterietechnik sowie die Ausarbeitung eines Sicherheitskonzeptes für den geplanten Prüfstand.

Danach ist eine umfassende Analyse von Belastungen, die während eines Unfalls auf den Energiespeicher wirken können, durchgeführt worden. Mithilfe von Gesamtfahrzeugsimulationen konnten Belastungen abgeleitet und Randbedingungen für die Auslegung des Prüfstandkonzeptes gewonnen werden. Mit diesen Randbedingungen und den Anforderungen, die sich aus der Aufgabenstellung ergeben, wurde ein Anforderungskatalog erstellt.

Verschiedene Möglichkeiten zur Umsetzung der Prüfumgebung wurden betrachtet und einer Bewertung unterzogen. Das Konzept, das aufgrund eines definierten Anforderungsprofils am besten abgeschnitten hat, wurde zusammen mit einem umfassenden Messkonzept ausgearbeitet. Die Prüfumgebung wurde konstruiert, aufgebaut und für Versuche mit ungeladenen und geladenen Akkumodulen in zwei Versuchsreihen herangezogen.

Eine ausführliche Auswertung der Versuche, welche beispielsweise die Ermittlung von Kraft-Weg-Kurven beinhaltet, wurde durchgeführt. Diese werden in weiterer Folge in einem anderen Forschungsprojekt für die Validierung von Simulationsmodellen der Energiespeicher benötigt. In einer Zusammenfassung wurden die Versuchsergebnisse diskutiert und ein Ausblick auf Weiterentwicklungen gegeben.

1.4 Prüfverfahren für Lithium-Ionen-Akkus

Sicherheitstechnische Prüfungen von Lithium-Ionen-Akkus sind unumgänglich um für Elektrofahrzeuge ein ähnliches Sicherheitsniveau zu erreichen, wie es bei konventionell angetriebenen Fahrzeugen heute Standard ist. Es werden Tests an Einzelzellen, Modulen, Batteriepacks und Crashversuche mit Gesamtfahrzeugen durchgeführt. Dazu ist es notwendig bereits vorhandene Normen und Richtlinien zu berücksichtigen. Normen und Richtlinien bezüglich eines dynamischen Tests mit den Anforderungen – wie z.B. bisher nicht berücksichtigte Crashbelastungen abzubilden – die in dieser Arbeit beschrieben werden, waren zum Zeitpunkt des Verfassens keine bekannt. Solche Tests sind jedoch sehr wichtig um die Prüflinge realen, derzeit nicht vorgeschriebenen, Unfallbelastungen auszusetzen. Viele bestehende Vorgaben bzw. Richtlinien werden gegenwärtig überarbeitet oder von Grund auf neu erstellt.

Im Folgenden soll ein grober Überblick über Tests und Vorschriften, wie sie zurzeit für elektrische Energiespeicher bestehen, gegeben werden.

1.4.1 Existierende Prüfverfahren in Normen und Richtlinien

Prüfverfahren für EES in Elektro- und Hybridfahrzeugen können laut verschiedener Normen in Teilbereiche gegliedert werden. Diese Einteilung fällt meist ähnlich aus und umfasst z.B. in der Norm UL1642 drei Teilbereiche: Mechanical, Electrical, Environmental. Diese sind wiederum in verschiedene Testkonfigurationen unterteilt (siehe Tabelle 1).

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

Tabelle 1: Einteilung von Prüfverfahren nach UL1642 [12]

Da es sich in dieser Arbeit um die Beschreibung einer mechanischen Testmöglichkeit handelt, wird nur auf die **mechanischen Tests** genauer eingegangen. Diese sind für crashtechnische Untersuchungen am relevantesten. Alle mechanischen Tests werden derzeit auf unterschiedlichen Ebenen (Zell-, Modul- und Packebene) durchgeführt.

Eine weitere Unterteilung der mechanischen Tests ist meist in quasi-statische und dynamische Belastung möglich. Dabei zählen die sogenannten Crush- und Penetrationstests als quasi-statisch und die Impact-, Vibrations-, Fall- und Shocktests

als dynamisch. Die dynamischen Tests weisen im Unterschied zu den quasi-statischen Tests wesentlich höhere Belastungsgeschwindigkeiten auf. Da in dieser Arbeit die Entwicklung einer dynamischen Prüfumgebung behandelt wird, wird im Folgenden wiederum nur auf **dynamische Tests** eingegangen.

Im „FreedomCAR Abuse Test Manual for Electric and Hybrid Electric Vehicle Applications“ werden für die Tests verschiedene Abuse Levels angegeben, die den zu erwarteten Schaden am EES nach einem Versuch widerspiegeln. [13]

- Level 1: Der Versuchskörper sollte im Wesentlichen intakt bleiben.
- Level 2: Der Versuchskörper ist möglicherweise nicht mehr funktionstüchtig. Es sollte jedoch keine Gefahr für den Menschen bestehen.
- Level 3: Der Versuchskörper wird nach dem Versuch höchstwahrscheinlich nicht mehr funktionstüchtig sein.

Zur Quantifizierung und Evaluierung der Ergebnisse der Missbrauchstests empfiehlt die Freedom Car Richtlinie die von EUCAR herausgegebenen Hazard Levels (siehe Tabelle 2). Bei Batterien, die in einem Fahrzeug verbaut werden, ist ein möglichst niedriger Hazard Level anzustreben.

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.e., no flying parts).
6	Rupture	No explosion, but flying parts of the active mass.
7	Explosion	Explosion (i.e., disintegration of the cell).

Tabelle 2: EUCAR-Hazard-Levels [13]

Im Folgenden werden einige Beispiele für mechanische Tests mit dynamischer Belastung beschrieben.

Impact Test:

Der „Impact“-Test wird in der Norm UL 1642 und UN38.3 beschrieben und ist in Abbildung 3 dargestellt. Ein zylinderförmiger Impaktor (Durchmesser 15,9mm) wird horizontal auf dem Zentrum einer Batteriezelle platziert. Ein Gewicht (9,1kg) wird aus einer Höhe von 610 +/- 25mm auf den Impaktor fallen gelassen und dadurch der Prüfkörper belastet. Dieser Test soll einen Aufprall simulieren. Die Reaktion des Prüflings auf die Impaktbelastung soll untersucht werden. [12] [14]

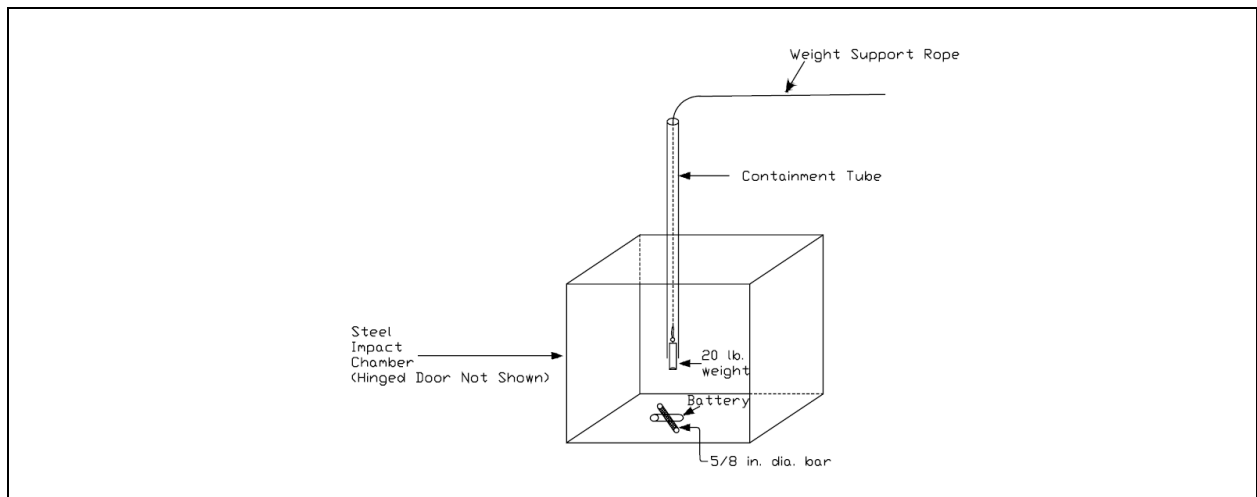


Abbildung 3: Schematische Darstellung eines Impact-Tests [12]

Shock-Tests:

Mit Schocktests sollen Beschleunigungsbelastungen die während der Lebensdauer von Batteriezellen wirken können (z.B.: Crash, Stöße) abgebildet werden. Solche Beschleunigungstests kommen in mehreren Normen mit ähnlichen Beschleunigungswerten und Einwirkdauern auf Zelle oder Modul vor. Die Versuche werden aber auch auf Packebene durchgeführt.

In der Freedom Car Richtlinie wird beispielsweise ein Schocktest ab Modulebene (keine Einzelzellen) beschrieben. Verschiedene Tests mit Abuse Level 1 bzw. 2 werden darin erläutert. Zum Beispiel wirken beim Test mit Abuse Level 1 Beschleunigungen von 25g mit einem Halbsinusverlauf für eine Dauer von 30ms. Für Tests auf Packebene kommen bei der Freedom Car Richtlinie dieselben Beschleunigungswerte zum Tragen, wie bei Versuchen auf Modulebene. [13]

In UN 38.3 wird ein Test beschrieben, welcher mögliche Schläge während der Beförderung eines EES simuliert. Zellen oder Batterien werden einem halbsinusförmigen Schlag mit einer Spitzenbeschleunigung von 150g und einer Pulsdauer von 6ms ausgesetzt. Bei größeren Zellen bzw. Batterien kommt eine Beschleunigung von 50g mit einer Pulsdauer von 11ms zur Anwendung. [14]

Als weiteres Beispiel dient ein Test auf Packebene nach ISO 12405-1. Dieser ist gedacht für Packs die an festen Punkten des Aufbaus bzw. am Rahmen eines

Fahrzeugs befestigt werden. Es soll beispielsweise die Beschleunigungsbelastung beim Überfahren eines Bordsteins mit hoher Geschwindigkeit dargestellt werden. Die Folge der hohen Beschleunigungen könnten Beschädigungen an Bauteilen des Energiespeichers sein. Als Beispiel wird in der Norm eine Beschleunigung von 500m/s^2 für eine Dauer von 6ms mit halbsinusförmigem Verlauf angegeben. [15]

Vibrations-Tests:

Vibrationstests werden wiederum in verschiedenen Normen und Vorschriften behandelt. Die Norm ISO 12405-1 beschreibt beispielsweise Schwingungstests mit denen die Prüfkörper bezüglich Fehlfunktionen und Bruchschäden, die durch Vibration hervorgerufen werden, untersucht werden. Belastungen auf das Batteriesystem, wie sie unter anderem bei einer Schlechtwegfahrt oder durch Vibrationen des Antriebstrangs auftreten können, werden getestet. Zu den möglichen Folgen dieser Tests zählen die Unterbrechung der Spannung oder der Bruch von Kontakten. Die Dauer dieser Tests beträgt zwischen 12 und 21 Stunden bei Frequenzen im Bereich von 7-200Hz, die Beschleunigungswerte werden abhängig von der Belastungsrichtung angegeben. [15]

In UN38.3 werden ebenfalls Schwingungstests beschrieben die Vibrationen während des Transports simulieren. Die Vibration soll einen sinusförmigen Verlauf aufweisen und in einem Zeitraum von 15 Minuten einen logarithmischen Sweep zwischen 7Hz und 200Hz und wieder zurück zu 7Hz durchlaufen. Der Zyklus soll 12-mal innerhalb von drei Stunden für drei verschiedene Positionen des Prüflings durchlaufen werden. [14]

Drop-Tests:

In Abbildung 4 ist der Falltest aus der Freedom Car Richtlinie dargestellt. Es handelt sich um einen zerstörerischen Test mit Abuse Level 3. Das heißt, dass der Versuchskörper höchstwahrscheinlich nach dem Versuch nichtmehr funktionstüchtig sein wird. Batteriepacks werden im freien Fall aus einer vorher definierten Höhe auf ein zentral positioniertes zylindrisches Objekt mit einem Radius von 150mm (Radius eines Telefonmastes) fallengelassen. Die definierte Höhe soll 10m nicht überschreiten und mögliche reale Lastszenarien, die bei der Herstellung, Montage und im Betrieb von elektrischen Energiespeichersystemen auftreten können, widerspiegeln. [13]

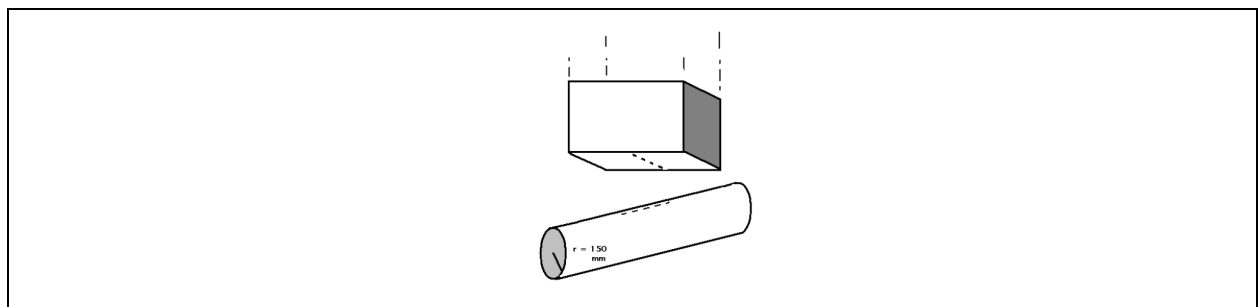


Abbildung 4: Schematische Darstellung eines Falltests [13]

1.4.2 Zusätzliche Prüfverfahren

Mechanische Versuche, wie oben beschrieben, stellen die Basis für die sichere Integration von Hochvoltbatterien in Fahrzeugen dar. Die meisten dieser Tests stellen Transportvorschriften dar. Neben diesen vorgeschriebenen Überprüfungen werden noch weitere durchgeführt. Im Folgenden werden zwei Arten solcher Verfahren behandelt. Einerseits gibt es Tests für die Entwicklung und Validierung von Simulationsmodellen von Akkus auf Zell- oder Modulebene. Andererseits werden mögliche zusätzliche Testkonfigurationen für Akkumodule angesprochen die noch nicht durch normative oder vorgeschriebene Prüfmethode abgedeckt sind. [16]

Tests zur Validierung von Simulationsmodellen:

Zahlreiche Simulationswerkzeuge werden bereits eingesetzt um Kosten und Zeit in der Fahrzeugentwicklung zu verringern. So ist beispielsweise die Anwendung von Finite-Elemente-Methoden im Bereich der Crashesicherheit weit verbreitet. Um diese Werkzeuge auch bei der Entwicklung von Elektrofahrzeugen einsetzen zu können sind aussagekräftige, numerische Simulationsmodelle der Hochvoltsystemkomponenten (z.B. Akkumodule) unabdingbar. Für die Entwicklung und Validierung von solchen Modellen, mit denen es möglich ist ihr Verhalten bezüglich des Einwirkens von mechanischen Belastungen vorherzusagen, sind reale Tests notwendig. Wichtig für die Validierung von FE-Modellen sind genau definierte Randbedingungen dieser Tests. Dadurch können Parameter in der Simulation bestimmt werden. Diese Versuche sollten mit ungeladenen als auch mit geladenen Batterien durchgeführt werden, da sich mechanische Eigenschaften und das Volumen der Energiespeicher mit dem Ladezustand ändern. [16] [17]

Ein einfacher Aufbau der Prüfumgebung ist ein wichtiger Aspekt bei Validierungsversuchen um eine gute und eindeutige Abbildbarkeit von Randbedingungen des Versuchs in der Simulation zu ermöglichen. Die Anzahl der unbekanntenen Größen sollte so gering wie möglich gehalten werden.

Grundsätzlich sind bei Validierungstests auch quasi-statische und dynamische Konfigurationen zu unterscheiden. Aufgrund der Einfachheit wird meist mit quasi-statischen Versuchen begonnen die Modelle zu validieren. Dynamische Versuche werden herangezogen, um herauszufinden, ob die Belastungsgeschwindigkeit einen wesentlichen Einfluss auf den Versuchsausgang hat. Beispielsweise bieten geführte Falltests ein hohes Maß an Flexibilität. Änderungen der Geschwindigkeit und der eingebrachten Energie können damit einfach realisiert werden. [16]

Tests mit crashähnlichen Belastungen:

Die bisher genannten Methoden beschreiben zahlreiche mechanische Tests. Jedoch werden Belastungen, wie sie bei Unfällen wirken können, durch diese meist nicht abgedeckt [16]. Bei Crashvorgängen sind Kombinationen verschiedener Belastungen möglich, da es zu hohen Beschleunigungen und gleichzeitiger Verformung von Bauteilen (z.B. des elektrischen Energiespeichers) kommen kann. In den meisten Fällen tritt die Beschleunigungsphase bei Bauteilen, die nicht in den Crashzonen untergebracht sind, zeitlich vor der Deformationsphase auf. Bei genormten Crashtests, die sowohl mit konventionellen als auch mit Elektrofahrzeugen durchgeführt werden, werden solche Belastungen abgebildet. Diese Versuche sind jedoch teuer, aufwendig und unter Umständen auch gefährlich. Ideal sind daher kostengünstigere und nicht so aufwendige Tests bei dem der EES alleine, getrennt vom Gesamtfahrzeug bewertet werden kann. Damit können die Energiespeicher schon früher im Entwicklungsprozess überprüft werden. Dazu müssen realistische Randbedingungen für die entsprechenden Tests auf Komponentenebene definiert werden.

Es sind also Ersatzkonfigurationen notwendig, bei denen losgelöst vom Gesamtfahrzeug reale Belastungen eines Unfalls auf die Energiespeicher aufgebracht werden können.

Um solche – einem Fahrzeugcrash ähnelndere – Belastungen abbilden zu können, wurden für die Entwicklung des Fahrzeugs „Mercedes Benz S400 Hybrid“ (Marktstart 2009) von Justen et al. [18] in Kooperation mit dem TÜV Süd Untersuchungen angestellt. Die Prüfumgebung und deren Leistungsfähigkeit wird im Folgenden Kapitel beschrieben.

2 Stand der Technik – Batterieprüfanlagen

Der Wettbewerb auf dem jungen Markt der mechanischen Traktionsbatterieprüfungen verschärft sich zunehmend. Für Prüfdienstleister ist dies ein wichtiger Zukunftsmarkt und so werden immer mehr Testzentren eröffnet.

Es gibt einerseits Anlagen welche Batteriezellen oder Module mechanisch belasten können und andererseits welche die das elektrische Verhalten von Batterien testen. Die mechanischen Prüfanlagen können in quasi-statische und dynamische Anlagen eingeteilt werden. Erstgenannte funktionieren zumeist auf einem ähnlichen Prinzip wie handelsübliche Pressen, die meist hydraulisch betrieben werden.

Dynamische Batterieprüfstände gibt es zurzeit in Form von Schwingerregern, Schlittenkatapultanlagen und Konstruktionen mit denen Versuche auf Crashbahnen in Hallen oder im Freien durchgeführt werden. Ein Vergleich von solchen Prüfständen, wie sie derzeit bei Prüfinstitutionen in Verwendung sind, ist schwierig, weil Details über dynamische Prüfumgebungen nicht veröffentlicht werden. Es finden sich aber in einigen Veröffentlichungen Informationen über Versuche, in denen solche Prüfstände gezeigt werden.

Im Folgenden werden die zwei zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Arbeit bekannten Testanlagen beschrieben mit denen dynamische, crashähnliche (mit Einschränkungen), Belastungen auf die Batterie abgebildet werden können. Daneben bestehen weitere Testlabore die dynamische Tests (wie zum Beispiel Vibrations- oder Falltests) durchführen, diese sind jedoch für die Art von Prüfumgebung, die in dieser Arbeit behandelt wurde, nicht von Bedeutung, weil diese Tests meist Transportvorschriften und somit keine realen Crashbelastungen darstellen.

2.1 Batterietests des TÜV Süd

Beim TÜV-Süd wurden in Kooperation mit Mercedes-Benz im Zuge der Entwicklung des Fahrzeugs „Mercedes-Benz S400 Hybrid“ (Marktstart 2009) dynamische Batterietests auf einem Testgelände im Freien durchgeführt. Man kam zu dem Schluss, dass sich die bestehenden mechanischen Prüfvorschriften nicht eigneten um die Sicherheit der betrachteten Hochvoltbatteriemodule mit realistischen – einem Fahrzeugcrash ähnelnden – Belastungen zu untersuchen. Justen et al. [18] haben deshalb Untersuchungen angestellt und eine Serie dynamischer Impact-Crashtests durchgeführt um das Sicherheitsniveau der EES in Crashsituationen realistischer zu überprüfen. Es wurden zwei unterschiedliche Testkonfigurationen ausgearbeitet, welche in den folgenden beiden Abbildungen zu sehen sind. [18]

Abbildung 5 zeigt eine Konfiguration in der die sich bewegende Batterie auf einen feststehenden Impaktor trifft.

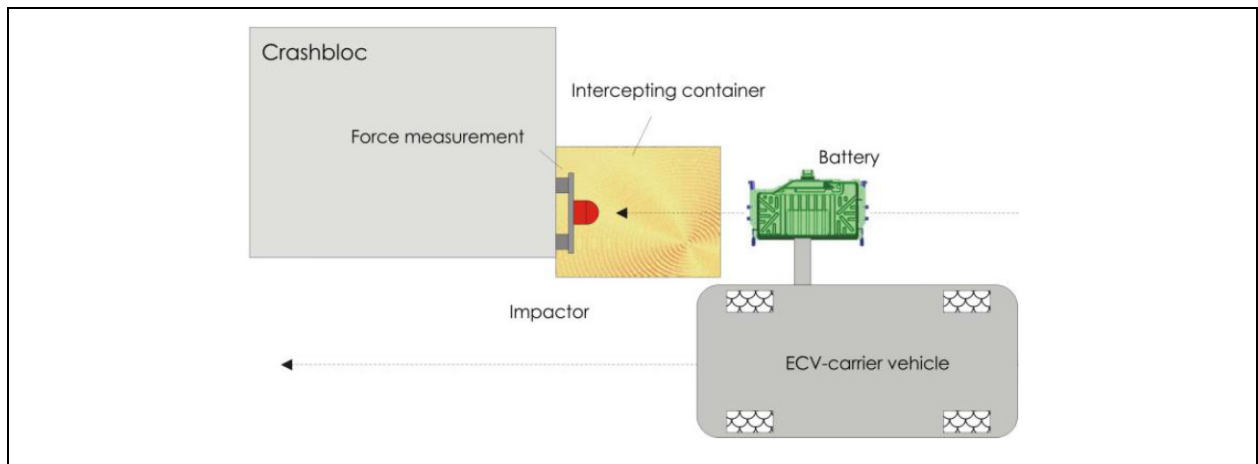


Abbildung 5: Testkonfiguration mit feststehendem Impaktor [18]

In Abbildung 6 ist eine Konfiguration dargestellt, in der die Batterie fest am Crashblock montiert wird und ein bewegter Impaktor in diese einschlägt.

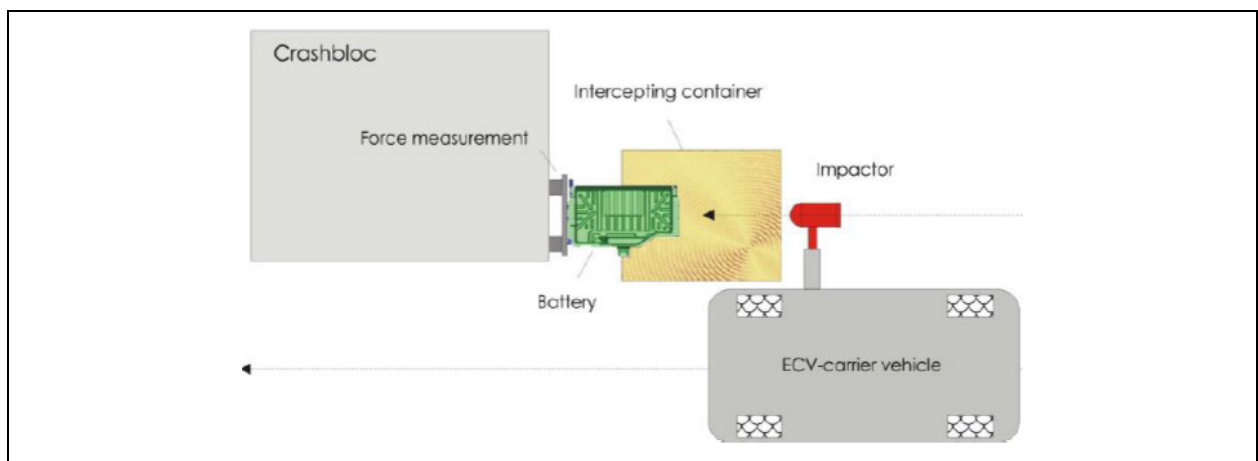


Abbildung 6: Testkonfiguration mit bewegtem Impaktor [18]

Diese zwei unterschiedlichen Konfigurationen sind nötig, um einen großen Spielraum bei den Parametern Aufprallenergie, Geschwindigkeit, Masse und Geometrien zu erreichen. Bei der ersten Konfiguration (siehe Abbildung 5) wirken beim Aufprall der Batterie auf die Crashwand Beschleunigungen und Deformationen gleichzeitig. Eine zeitlich versetzte Abbildung von Beschleunigungs- und Deformationsphase, wie sie bei einem realen Crash auftritt, ist mit diesem Prüfaufbau nicht möglich. Bei der zweiten Konfiguration (siehe Abbildung 6) befindet sich der Impaktor am Fahrzeug. Der Grund dafür ist, dass die Geschwindigkeit, die auf der Anlage des TÜV Süd erreicht werden kann, durch die maximal erreichbare Geschwindigkeit des Trägerfahrzeugs limitiert ist. [18]

Bei kleinen Batterien wäre eine sehr hohe, nicht realisierbare Geschwindigkeit notwendig um die gewünschte Aufprallenergie zu erreichen. Daher wird in diesen Fällen die Variante mit bewegtem Impaktor angewandt. Mit einer hohen Impaktormasse kann bei geringer Geschwindigkeit des Trägerfahrzeuges die benötigte Energie eingebracht werden. Mit dieser Variante kann nur eine Deformation des Versuchsträgers erreicht werden. Die Abbildung von Beschleunigungsbelastungen ist damit nicht möglich. Diese Versuchskonfiguration ist in Abbildung 7 dargestellt. [18]



Abbildung 7: Batterie tests des TÜV Süd mit bewegtem Impaktor [18]

Links im Bild ist das Trägerfahrzeug zu erkennen. Dabei handelt es sich um einen LKW auf dessen Ladefläche ein Tragarm montiert ist. Die bewegte Masse mit Impaktor (oder die Batterie) wird kurz vor dem Aufprall vom Tragarm – der sich nach hinten wegdreht – entkoppelt. Diese bewegt sich frei fliegend auf das fest montierte Akkumodul (oder den Impaktor) zu. Um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten wird das Fahrzeug mit Hilfe eines elektronischen Steuersystems vollautomatisch und ohne Fahrer gesteuert. Da das Fahrzeug jedoch nicht mechanisch geführt wird, ist von Abweichungen in der Treffgenauigkeit im Bereich von einigen Zentimetern auszugehen. Bei diesen Versuchen sind Geschwindigkeiten bis 55km/h, Massen bis 500kg sowie resultierende Energien von knapp 60kJ möglich. Die Reaktionskräfte wurden gemessen und die Intrusionen an den Akkumodulen im Anschluss an die Versuche bestimmt. [18]

Als Impaktor stehen mehrere geometrische Formen zur Verfügung die mit einer variablen Masse bestückt werden, um die Energie des Aufpralls variieren zu können. Die verschiedenen Impaktoren sind in Abbildung 8 dargestellt. [18]

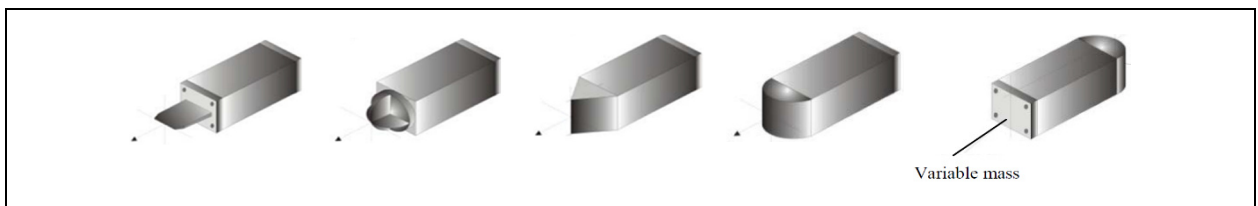


Abbildung 8: Verschiedene Impaktorformen mit variabler Masse (TÜV Süd) [18]

Getestet wurden verschiedene Typen der zu diesem Zeitpunkt in Mercedes-Benz Hybrid- und Elektrofahrzeugen verbauten Hochvoltbatteriemodule. Für Lastfälle, in denen Batterien verformt werden, wurden Randbedingungen mithilfe von Crashsimulationen abgeleitet. Deformationsenergien wurden in Simulationen bestimmt und die äquivalente kinetische Energie beim Komponententest abgebildet. Bei einer ersten Testreihe wurden Energien im Bereich von 3-6kJ in die geladenen EES eingebracht. In einer zweiten Reihe wurde die Belastung erhöht und die Batterien mit bis zu 9kJ belastet. [18]

Keiner der Prüflinge zeigte nach den Versuchen, trotz den hohen aufgetretenen Kräften und Deformationen, elektrische oder thermische Reaktionen (z.B. Kurzschluss, Brand). Es muss dazu erwähnt werden, dass die getesteten Energiespeicher mit ihrer stabilen, schützenden Ummantelung geprüft wurden. Für eine detailliertere Auswertung der Versuche wird auf Justen et al. [18] verwiesen. Die Versuche bestätigten die Vermutung, dass es Unterschiede im Kraftverlauf zwischen quasi-statischer und dynamischer Belastung gibt und es deshalb dringend notwendig ist, dass realistische Tests für Traktionsbatterien auf Komponentenebene festgelegt werden, um dieses Verhalten besser zu untersuchen. [18]

Anzumerken ist, dass mit dem gezeigten Prüfkonzept von Justen et al. [18] nur bedingt reale Crashbelastungen abgebildet werden. Bei der Konfiguration in Abbildung 5 wirken Beschleunigung und Deformation gleichzeitig. Bei einem realen Crash wirkt die Beschleunigung schon vor einer möglichen Verformung, eine zeitliche Zuordnung dieser Größen beim gezeigten Prüfkonzept ist aber nicht möglich. [18]

2.2 Prüfumgebung der Firma CETECOM

Das Unternehmen CETECOM führt dynamische Tests (Crash und Schock) mit Batteriezellen oder Batteriemodulen auf einer hauseigenen Crashbahn in einer speziell ausgerüsteten Halle durch (siehe Abbildung 9).



Abbildung 9: Dynamische Prüfumgebung der Firma CETECOM [19]

Laut Website der Firma CETECOM können Prüflinge bis zu einem Gewicht von 200kg und mit einer maximalen Geschwindigkeit von 57km/h getestet werden. Es handelt sich um eine Schienenanlage. Der Schlitten besitzt Abmessungen von 800x1000mm und die Antriebskraft beträgt 600kN. Es können Beschleunigungen von bis zu 60g aufgebracht werden und Batterien bis zum Impact belastet werden. Ein Crashblock mit einem Gewicht von 8t steht für die Crashversuche zur Verfügung. [20]

Mit dem Schlitten können Batteriemodule gegen die Crashwand geschleudert werden. Eine ausreichende Reproduzierbarkeit der Versuche scheint nicht gegeben, da der Prüfkörper nicht bis zum Aufprall mechanisch geführt wird. Stattdessen bewegt sich dieser in einer Parabel, frei fliegend auf die Crashwand zu. Dabei kann es zu Abweichungen in der Bewegung der Prüfkörper kommen. Zudem fallen die getesteten Batterien nach den Versuchen unkontrolliert zu Boden, was zu weiteren unkontrollierten Belastungen führt.

Wie bei der vorher gezeigten Prüfumgebung des TÜV Süd können mit dieser Anlage zwar Beschleunigungen und Verformungen während des Aufpralls abgebildet werden, eine zeitliche Zuordnung der beiden Größen ist aber nicht möglich.

3 Sicherheit

Der Schutz von Mensch, Infrastruktur und Umwelt hat natürlich auch bei der Durchführung von Versuchen mit Hochvoltbatterien oberste Priorität.

Im diesem Kapitel wird auf die Gefahren im Umgang mit elektrischen Energiespeichern der Lithium-Ionen-Technologie eingegangen. Aufgrund von Vorteilen wie höhere Energiedichte, Leistung und Lebensdauer gegenüber anderen Technologien wird die Verwendung dieser Art von Energiespeichern in Elektro- und Hybridfahrzeugen momentan favorisiert. Es fehlt jedoch an umfassender Erfahrung im Bereich der Sicherheitsprüfungen und an wirksamen Schutzmaßnahmen im Testbereich.

Im Folgenden sollen allgemeine Gefahren zusammengefasst und auf jene näher eingegangen werden, die in direktem Zusammenhang mit der zu entwickelnden Prüfumgebung stehen. Werden Versuche durchgeführt, so ist ein umfassendes Sicherheitskonzept als Teil der jeweiligen Prüfeinrichtung zu sehen. Das Thema Sicherheit ist weit umfassender als es in dieser Arbeit behandelt werden kann. In der Konzeptentwicklung, wie sie hier beschrieben wird, stand die Funktionalität im Vordergrund, während bei der Durchführung der später gezeigten Versuche stets die Sicherheit höchste Priorität hatte.

3.1 Gefahrenpotenzial der Lithium-Ionen-Technologie

Das hohe Gefahrenpotenzial beim Testen der Hochvoltbatterien ergibt sich durch hohe Spannungen, interne und externe Kurzschlüsse, Explosionen und Brand beziehungsweise durch Austritt von toxischen Gasen, die sich wiederum auf die hohe Energiedichte, den leichtentzündlichen Elektrolyten sowie auf die Toxizität bestimmter Inhaltsstoffe zurückführen lassen. Abbildung 10 zeigt solche heftigen und gefährlichen Reaktionen einer Batteriezelle vom Typ 18650 bei mechanischer Beschädigung. In Akkupacks von Elektrofahrzeugen sind jeweils sehr viele – bis zu mehreren tausend Stück – dieser Zellen verbaut.



Abbildung 10: Reaktionen einer Zelle während eines Nagelpenetrationstests [21]

Die Wahrscheinlichkeit für Explosionen und Brand steigt mit dem erhöhten Ladezustand der Batteriezellen, weil eine größere Energiemenge für Reaktionen zur Verfügung steht. Dieser Zustand wird im Englischen als „State of Charge (SOC)“ bezeichnet und in Prozent angegeben. Ein SOC von 0% entspricht einer ungeladenen, ein SOC von 100% einer vollständig geladenen Zelle. Kurzschlüsse sind auch bei ungeladenen Zellen möglich, da Li-Ionen Zellen immer eine gewisse Grundspannung aufweisen.

Gefahrenquellen, die von Li-Ionen-Batterien ausgehen, können wie folgt eingeteilt werden: [16]

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

3.1.1 Chemische Gefahren

Wenn eine Li-Ionen-Batteriezelle ausgast, Leck schlägt oder Feuer fängt, können gesundheitsschädliche Substanzen austreten. Dies stellt eine große Gefahr für die Umgebung des Energiespeichers dar. Durch das Austreten derartiger Substanzen können weitere gefährliche Reaktionen ausgelöst werden. Einige Bestandteile von Batterien sind bereits in geringen Dosen hochgiftig. [16]

Bei lithiumbasierten Batterien reagiert beispielsweise das gängige Leitsalz LiPF₆ bei Kontakt mit Wasser (z.B.: Luftfeuchtigkeit, Kühlwasser oder Löschwasser) zu Fluorwasserstoff, Phosphoroxyfluorid oder Lithiumphosphid – allesamt Stoffe, die sehr giftig, ätzend bzw. hochentzündlich sind. Weitere Inhaltsstoffe des Energiespeichers reagieren mit dem Luftsauerstoff zu Kohlenwasserstoffverbindungen, welche ebenfalls giftig und entzündlich sind. In der näheren Umgebung besteht also im Schadensfall höchste Brandgefahr. Abhängig von der Konzentration der jeweiligen Stoffe fällt die unmittelbare Gefährdung für Mensch und Umwelt unterschiedlich aus. Bei ausreichender Verdünnung mit Umgebungsluft oder ausreichend Abstand zur Batterie, ist die Gefahr deutlich niedriger, unverdünnt stellen diese Stoffe jedoch ein großes Risiko dar. [22]

3.1.2 Thermische Gefahren

Aufgrund thermischer Belastung kann es zur Beschädigung von Li-Ionen-Zellen kommen. Dies äußert sich durch Versagen von Bauteilen im Zelleninneren, durch Selbstentzündung oder durch eine Explosion der Zelle. Ein solches unkontrollierbares „Durchgehen“ der Zelle wird als „Thermal Runaway“ bezeichnet und tritt bei Temperaturen von etwa 180°C auf. Tritt dieser Fall ein, besteht die Gefahr, dass auch benachbarte Zellen Schaden nehmen und ebenfalls unkontrollierbar werden. [16]

3.1.3 Elektrische Gefahren

Die meisten Elektro- und Hybridfahrzeuge werden heute mit Hochvolt-Systemen ausgerüstet. Werden Einzelzellen untersucht, erscheint die elektrische Spannung von einigen wenigen Volt nicht besonders hoch und die Gefährdung spielt dadurch eine eher untergeordnete Rolle. Sie ist aber trotzdem nicht zu vernachlässigen. Besondere Vorsicht ist speziell beim Umgang mit Akkumodulen und Akkupacks, die aus vielen dieser Einzelzellen bestehen, geboten. Die hohen Spannungen – bei einem Akkupack bis zu mehreren hundert Volt – stellen eine große Gefahrenquelle dar. Der Schutz vor elektrischem Schlag muss unbedingt sichergestellt sein. Dies betrifft nicht ausschließlich Prüfanlagen und Geräte, sondern auch das Bedienpersonal. [22] [16]

3.1.4 Mechanische Gefahren

Mechanische Gefahren sind hauptsächlich durch die hohe Masse von Batteriemodulen gegeben, welche die Fahreigenschaften des Fahrzeuges und das Verhalten bei Unfällen beeinträchtigen kann. [16]

3.2 Sicherheitsvorkehrungen für die betrachtete Prüfumgebung

Für die Versuche, welche mit der in dieser Arbeit beschriebenen Prüfumgebung durchgeführt wurden, ist eine Reihe von Sicherheitsvorkehrungen getroffen worden um das Personal und die Umgebung bestmöglich, vor den im vorherigen Abschnitt genannten Gefahren, zu schützen:

- Spezielle Schulungen im Umgang mit Hochvoltbatteriemodulen für das Personal.
- Schutzkleidung inkl. Atemschutzmaske und säurebeständiger Handschuhe.
- Greifzangen zur Handhabung der Batteriemodule.
- Isoliertes Werkzeug.
- Freiluftgelände für Versuche mit geladenen Akkumodulen (für Indoorversuche wären sehr aufwendige und kostspielige Sicherheitseinrichtungen notwendig).
- Wärmebildkamera zur Überwachung der Oberflächentemperaturen der Module.
- Hochleistungsgebläse zur Verdünnung der entstehenden Gase.
- Brandschutz für die verwendete Messtechnik.
- Verschließbarer Sicherheits-Edelstahltank zum Lagern der Akkumodule vor und nach den Versuchen. Dient zum Auffangen von auslaufenden Substanzen und schützt die Umgebung vor Gefahren die von beschädigten Modulen ausgehen.

4 Methodik

In diesem Kapitel wird eine allgemein gültige Vorgehensweise beschrieben, wie Modulversuche mit möglichst realitätsnahen Randbedingungen verwirklicht werden können.

Für die in dieser Arbeit beschriebenen Versuchsreihen ergaben sich bei der Ableitung dieser Randbedingungen Vereinfachungen und eine Abänderung bzw. Ergänzung der beschriebenen Vorgehensweise. Dies war aus verschiedenen Gründen, die im folgenden Abschnitt (Kapitel 4.2-4.3) erläutert werden, notwendig.

4.1 Vorgehensweise zur Durchführung von Modulversuchen

Zunächst wurde betrachtet, wie es grundsätzlich möglich ist Belastungen, die während eines genormten Crashtests oder während realer Unfälle auf den EES wirken, ableiten zu können um somit realistische Randbedingungen für einen Modulversuch, getrennt vom Gesamtfahrzeug, zu erhalten.

Um solche Belastungen zu ermitteln, können Crashversuche mit elektrischen Fahrzeugen durchgeführt oder verschiedene Lastkonfigurationen mittels numerischen Modellen simuliert und berechnet werden.

An Hybrid- oder Elektrofahrzeugen, die sich noch in einem frühen Entwicklungsstadium befinden, ist es schwierig reale Versuche durchzuführen, da meist noch keine Versuchsfahrzeuge zur Verfügung stehen.

In diesen Phasen der Entwicklung bietet sich deshalb die Untersuchung von Lastfällen und Belastungen auf den EES mittels numerischen Finite-Elemente-Simulationen an. Diese können kostengünstig und mit geringem Zeitaufwand durchgeführt werden. Mit den Belastungen, die aus solchen Simulationen abgeleitet werden, können Randbedingungen für ein mögliches Prüfstandkonzept definiert werden. In weiterer Folge können Versuche auf Komponentenebene durchgeführt werden.

Abbildung 11 veranschaulicht die Vorgehensweise für ein solches Verfahren.

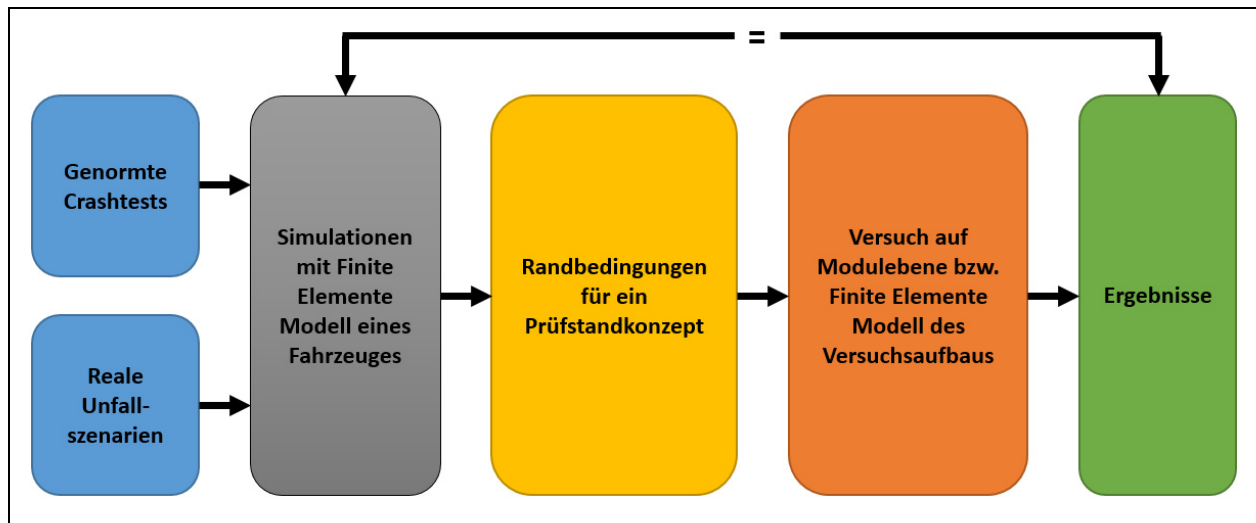


Abbildung 11: Vorgehensweise zur Durchführung von Modulversuchen

Wie in der Abbildung zu sehen, stand zu Beginn die Untersuchung von möglichen Unfallkonfigurationen, welche die Grundlage für die in weiterer Folge abgeleiteten Belastungen bildeten. Genormte Crashtests (z.B. New Car Assessment Programme – NCAP) und reale Unfallszenarien stellen solche Konfigurationen dar (blaue Felder).

Randbedingungen für Crashtests sind in Normen und Vorschriften beschrieben und können somit relativ einfach in einer Gesamtfahrzeugsimulation nachgebildet werden. Für eine Gesamtfahrzeugsimulation, welche noch nicht behandelten, aber ebenso relevanten Unfällen gleichen soll, müssen erst Randbedingungen durch Auswertung von Unfalldatenbanken gewonnen werden.

Mit den gewonnenen Informationen können diese Crashkonfigurationen mit Finite-Elemente-Modellen verschiedener Fahrzeugmodelle in einer Gesamtfahrzeugsimulation nachgestellt werden (graues Feld in Abbildung 11).

Abhängig davon welches Gesamtfahrzeugmodell betrachtet wird, ändern sich die Ergebnisse die aus einer solchen Simulation abgeleitet werden.

Von einem aktuellen Elektrofahrzeug können die realitätsgetreuesten Ergebnisse erwartet werden. Sie besitzen im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen angepasste Crashstrukturen. Zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Arbeit stand kein solches Fahrzeugmodell öffentlich zur Verfügung. Es wurde jedoch eine Methode entwickelt um mit einem konventionellen Fahrzeug Belastungen, die auf darin verbaute Akkumodule wirken würden, abzuleiten. Diese Methode wird in Kapitel 4.3 vorgestellt.

Die aus den Simulationen gewonnenen Belastungen, die auf den elektrischen Energiespeicher wirken, stellen Randbedingungen für Ersatzversuche auf Pack- bzw. Modul-Ebene dar (gelbes Feld in Abbildung 11). Damit wird es möglich die

Batteriemodule bzw. die Batteriepacks getrennt vom Gesamtfahrzeug zu testen und früh im Entwicklungsprozess Aussagen über die Sicherheit der Batterien im Fahrzeug zu treffen (oranges Feld). So lassen sich auch verschiedene Einbaulagen und Einbausituationen testen und die Ergebnisse (grünes Feld) mit den Simulationen vergleichen. Es ergibt sich ein Kreislauf in dem die Finite-Elemente-Modelle der Batterien und die Modulversuche ständig weiterentwickelt und verbessert werden können. Eine Absicherung von Konzepten in einem frühen Entwicklungsstadium wird dadurch möglich, weil Batteriesysteme unabhängig und für sich alleine entwickelt werden können.

Mit dem aus den Untersuchungen gewonnenen Wissen soll es in Zukunft möglich werden Verformungen an den Akkumodulen bei Unfällen bis zu einem bestimmten Grad zuzulassen. Dadurch ergibt sich bei zukünftigen Konzeptentwicklungen ein Potential für eine Gewichtsreduzierung durch eine Reduzierung oder den Verzicht von zusätzlichen Maßnahmen zum Schutz der Akkumodule.

4.2 Gesamtfahrzeugmodell

Für die Gesamtfahrzeugsimulationen wurde ein frei verfügbares Finite-Elemente-Modell des Fahrzeuges „Toyota Yaris 2010“ [23] verwendet (siehe Abbildung 12). Dieses Modell wird vom National Crash Analysis Center (NCAC) der George Washington University in den USA zur Verfügung gestellt. Dabei handelt es sich um ein herkömmliches Fahrzeug mit konventionellem Verbrennungsmotor als Antrieb. Das Modell entspricht einer detailgetreuen Nachbildung des Originals, welches aus insgesamt 974,383 Elementen besteht. [23]

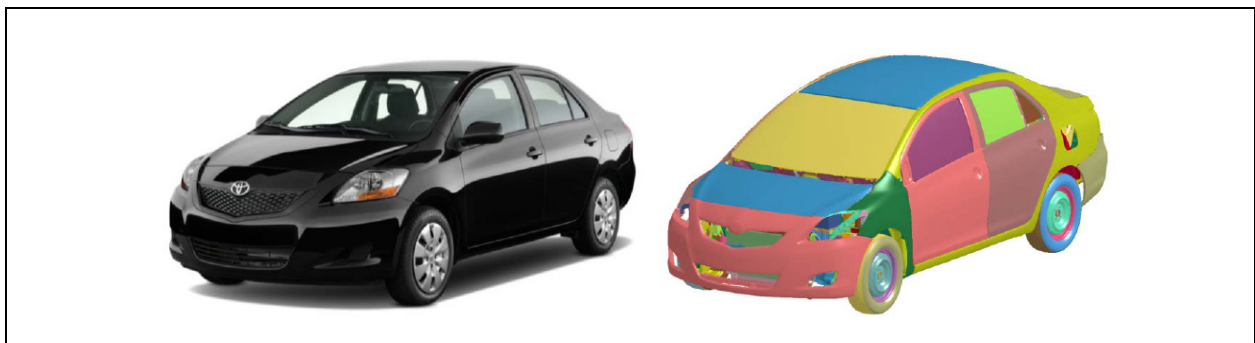


Abbildung 12: Original und Finite-Elemente-Modell des „Toyota Yaris 2010“ (Limousine) [23]

Das Simulationsmodell wurde mit mehreren realen Crashtests validiert: [23] [24]

- 56 km/h – Frontalaufprall mit voller Überdeckung (NHTSA Tests 5677 und 6221)
- 64 km/h – versetzter Frontalaufprall (IIHS Test CEF0610)
- 40 km/h – Frontalaufprall mit voller Überdeckung (NHTSA Test 6069)

Bei den Validierungstests für dieses Modell handelt es sich durchwegs um Frontalaufprallkonfigurationen, für Seiten- oder Heckaufprälle wurde es nicht überprüft.

Da ein Modell eines konventionellen Fahrzeuges herangezogen werden musste, war es notwendig, bei der Ableitung von Belastungen einige Vereinfachungen vorzunehmen. Die Konstruktion von Elektrofahrzeugen unterscheidet sich von herkömmlichen Fahrzeugen, da die Energiespeicher geschützt werden müssen, um keine Verformungen zuzulassen. Das bedeutet, dass die Crashstrukturen nicht vergleichbar sind mit jenen eines Elektrofahrzeugs.

Aus den Untersuchungen mit dem vorhandenen Modell können mithilfe des nachfolgend gezeigten Ansatzes jedoch auch wichtige Parameter abgeleitet werden, die Rückschlüsse auf die Belastungen der im Fahrzeug verbauten Hochvoltbatterien zulassen.

4.3 Energieäquivalenter Ansatz

Ein sogenannter „energieäquivalenter Ansatz“ wurde gewählt, um aus der Simulation mit einem Fahrzeug mit konventionellem Antrieb Belastungen auf den Energiespeicher ableiten zu können. Dies war notwendig, da wie bereits erwähnt, kein FE-Modell eines Elektro- oder Hybridfahrzeugs zur Verfügung stand.

Bauteile des Fahrzeugs wurden untersucht, die sich an einer typischen Einbaulage eines EES befinden. Wie in Abbildung 13 ersichtlich, kann dies zum Beispiel der Bereich des Mitteltunnels im Fahrzeugboden (rot) oder die Wanne des Reserverades im Heckbereich (blau) sein, wo die Hochvoltbatterien bei aktuellen Elektro- bzw. Hybridfahrzeugen typischerweise untergebracht sind.

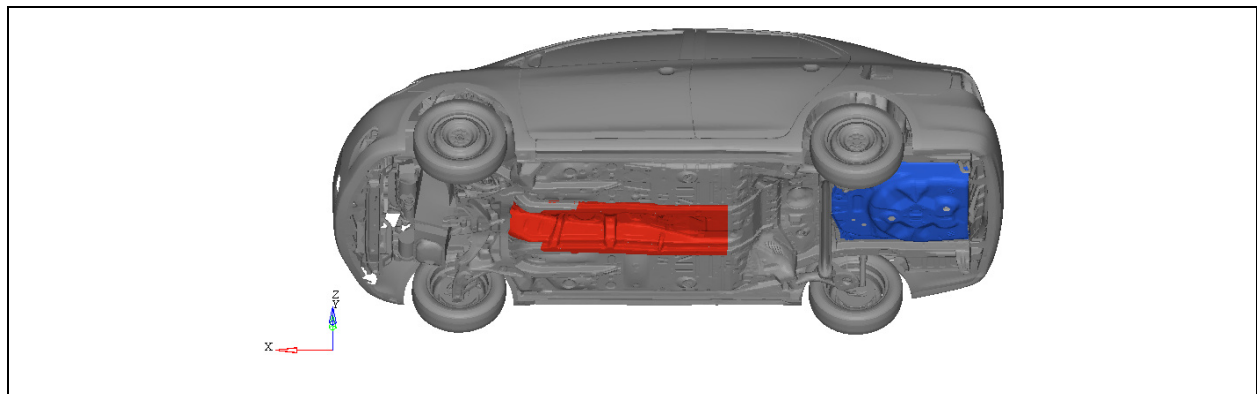


Abbildung 13: Mögliche Einbaulagen eines Akkupacks im Modell des Toyota Yaris 2010

Der „energieäquivalente Ansatz“ nimmt an, dass die Deformationsenergie die auf diese Bauteile bei einem Unfall wirkt, auch auf ein anstelle dessen verbautes Akkupack wirken würde. Das Deformationsbild ergibt sich dabei ähnlich, die Verformung ist aber aller Wahrscheinlichkeit nach weniger stark ausgeprägt, da sich ein elektrischer Energiespeicher in der Regel viel steifer verhält als beispielsweise der Mitteltunnel eines konventionellen Fahrzeugs.

Es ist aufgrund der beschriebenen Energieäquivalenz nicht notwendig in das konventionelle Fahrzeugmodell einen elektrischen Energiespeicher zu integrieren. Dies wäre sehr aufwendig und das Modell nicht mehr valide. Daher wird das vorhandene Fahrzeugmodell und somit auch das für das Fahrzeug optimale Crashmanagement nicht verändert. Die in die betrachteten Bauteile eingebrachte Deformationsenergie kann als Randbedingung für einen Modulversuch herangezogen werden. Die erhaltenen Belastungen stellen aufgrund der getroffenen Vereinfachungen eine Annäherung an die realen Bedingungen in einem Elektrofahrzeug dar. Eine Flexibilität im Versuchsaufbau wird bei der Ableitung von Belastungen mittels des „energieäquivalenten Ansatzes“ vorausgesetzt, um, falls aktuelle E-Fahrzeugmodelle verfügbar werden und damit Simulationen durchgeführt werden, auf geänderte Energieeinträge reagieren zu können.

Die in Elektro- und Hybridfahrzeugen verbauten Packs bestehen aus mehreren aneinandergereihten Akkumodulen. Um nun Belastungen auf ein einziges Akkumodul abzuleiten, wurde von einem Extremfall ausgegangen. Es wird angenommen, dass die üblicherweise vorhandene, schützende Ummantelung des Akkupacks keine Energie abbaut und Null Steifigkeit besitzt. Die gesamte Energie fließt dabei in eines der Akkumodule und teilt sich nicht wie gewöhnlich auf die übrigen auf. Dieses eine Modul wurde in seiner Bewegung in Belastungsrichtung „gesperrt“. Das heißt, dass die Rückwand des Moduls im Versuch an einer unbeweglichen und nicht verformbaren Platte anlag.

Bei den Untersuchungen in dieser Arbeit hat sich durch die Verwendung eines konventionellen Fahrzeugmodells die Möglichkeit ergeben, die Sicherheit von Akkumodulen ohne zusätzliche konstruktive Schutzmaßnahmen im Fahrzeug – wie es sonst bei Elektrofahrzeugen üblich ist – zu untersuchen und damit zu überprüfen ob diese notwendig sind.

Neben der eingebrachten Energie stellt das Verformungsbild ein wichtiges Kriterium dar, um reale Verhältnisse zu schaffen. Die Form des Impaktors hat großen Einfluss auf den Versuchsausgang. Dies ist schematisch in Abbildung 14 dargestellt.

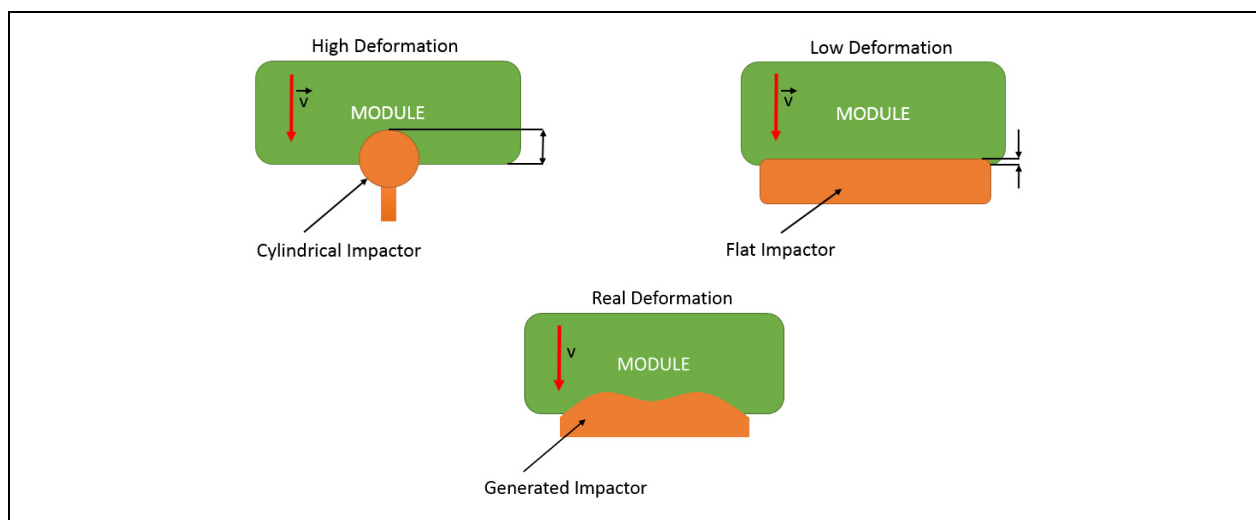


Abbildung 14: Einfluss der Impaktorform auf den Versuchsausgang

So würde beispielsweise bei derselben eingebrachten Energie und gleicher Steifigkeitsverteilung im Modul ein kleiner, zylindrischer Impaktor lokal sehr große Intrusionen am Modul verursachen, während ein großer, flacher Impaktor nur sehr geringe Deformationen hervorruft. Der aus Simulationen generierte Impaktor, auf den das Modul im Versuch auftrifft, muss in etwa dieselbe Form aufweisen wie die Verformung am betrachteten Bauteil. Mit seiner Form bestimmt er die Belastung des Moduls. Das bedeutet aber nicht, dass die Verformung am Modul die gleiche sein muss wie am betrachteten Bauteil.

Als drittes Kriterium wurde die Belastungsgeschwindigkeit als Randbedingung herangezogen. Sie stellt jene Geschwindigkeit dar, mit der sich der betrachtete Bauteil bei einem Crash verformt. Diese muss in Versuchen mindestens eingehalten werden. Die Einhaltung der Belastungsgeschwindigkeit ist wichtig, da, wie bereits erwähnt, eine mögliche Dehnratenabhängigkeit Auswirkungen auf den Versuchsausgang hat.

Für jede Crashkonfiguration ergeben sich demnach drei Randbedingungen mit denen ein Modulversuch aufgesetzt werden kann:

- Eingebrachte Energiemenge
- Deformationsform
- Deformationsgeschwindigkeit

Diese Methodik kann an jedem beliebigen Fahrzeugmodell angewandt werden. Die Ergebnisse sind, wie bereits erwähnt, fahrzeugspezifisch.

Um Belastungen auf die Energiespeicher ableiten zu können, muss deren Einbaulage berücksichtigt werden. Für die Betrachtungen in dieser Arbeit wurde davon ausgegangen, dass sich die Energiespeicher – wie bei vielen aktuellen Elektrofahrzeugen – im Mitteltunnel des Fahrzeuges befinden. In Abbildung 15 ist der Einbau eines Akkupacks im Bereich des Mitteltunnels am Beispiel des Fahrzeugs „Volvo C30 Electric“ zu sehen. Der Mitteltunnel im Fahrzeuginneren wurde im linken Bild mit einem roten Pfeil markiert. Im rechten Bild ist zu sehen wie das Akkupack (schwarz) bei der Montage von unten in den Mitteltunnel gehoben wird.

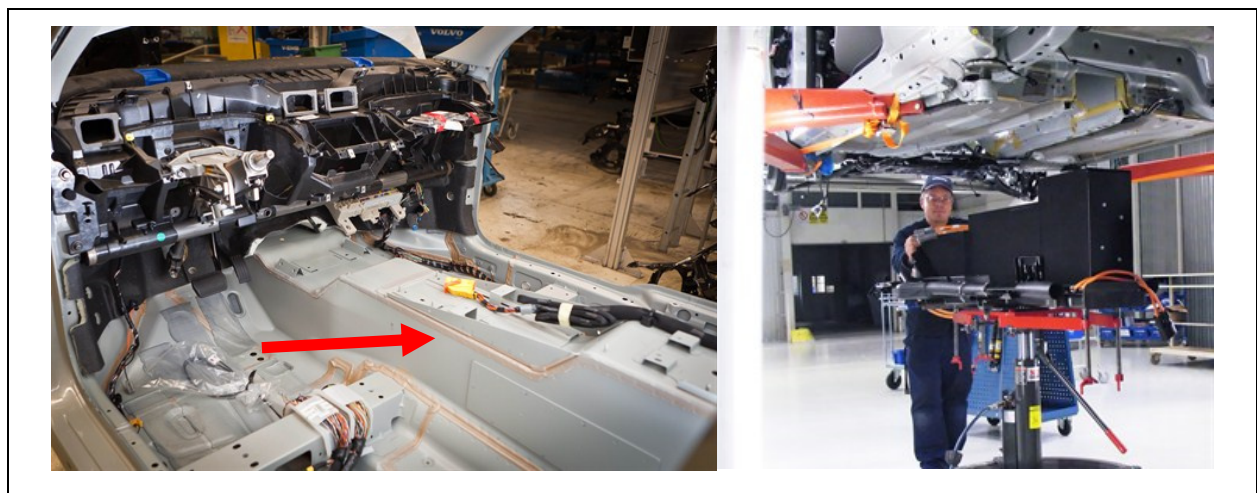


Abbildung 15: Elektrische Energiespeicher im Mitteltunnel des VOLVO C30 Electric [25] [26]

Um die Belastungsrichtung auf ein Akkumodul zu definieren, wurden die verwendeten Module beispielhaft im Bereich des Mitteltunnels des Fahrzeugmodells „Toyota Yaris 2010“ [23] platziert. In Abbildung 16 ist ein CAD-Modell eines Akkumoduls dargestellt. Das Modell enthält zehn Zellen und ähnelt im Grundaufbau jenem, das für die nachfolgend gezeigten Versuche verwendet wurde. Abbildung 16 ist jedoch als Beispiel anzusehen, da das originale Modul aus rechtlichen Gründen in dieser Arbeit nicht gezeigt werden darf.

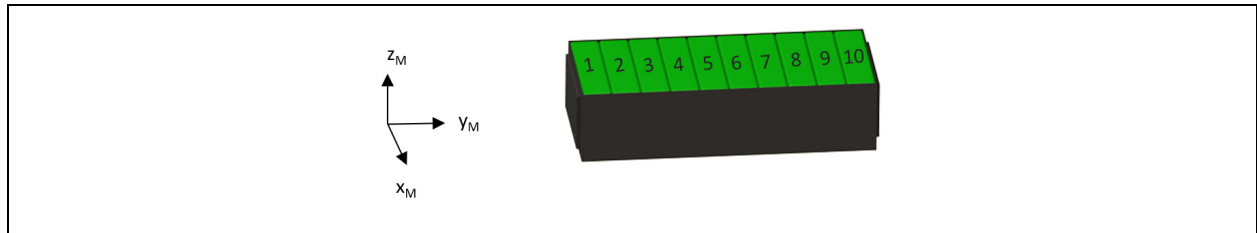


Abbildung 16: CAD-Modell eines Akkumoduls mit 10 Zellen

Die fiktive Unterbringung im Mitteltunnel des Simulationsmodells des „Toyota Yaris“ ist in Abbildung 17 dargestellt. Zu sehen sind acht Module welche längs in Fahrtrichtung angeordnet wurden. Die y_M -Achse des Modulkoordinatensystems zeigt dabei in Fahrzeug X-Richtung, die x_M -Achse in Fahrzeug Y-Richtung.

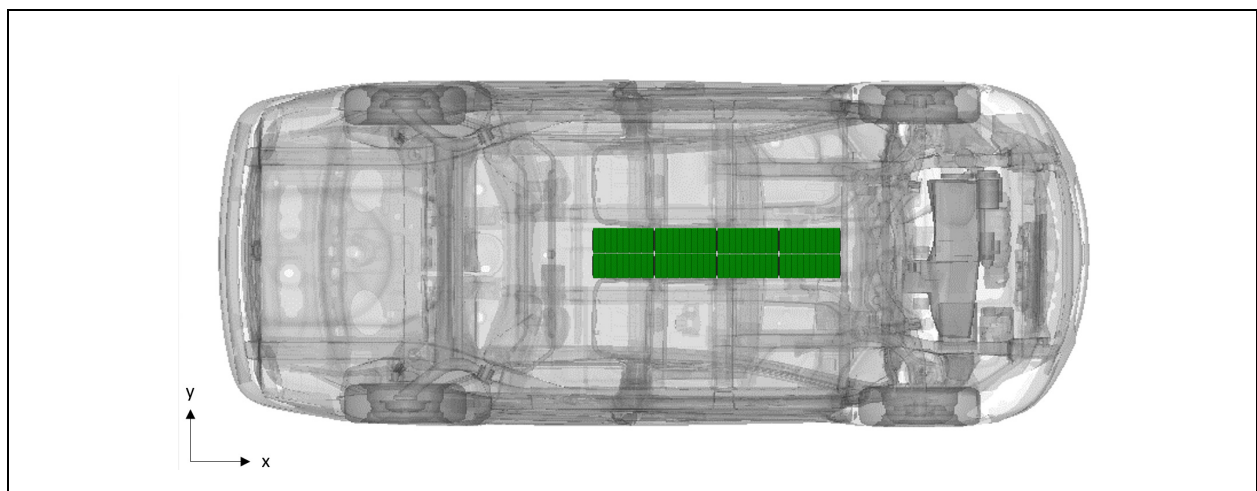


Abbildung 17: Fiktive Unterbringung der Akkupacks im Fahrzeugmodell

5 Belastungen auf den Energiespeicher

Bei der Auslegung von Crashstrukturen stand bisher immer die Minimierung der Verletzungsrisiken für die Fahrzeuginsassen bei Unfällen an allerhöchster Stelle. Durch die Verwendung von elektrischen Energiespeichern im Fahrzeugbau ergeben sich nun für die Insassen mögliche Gefahren, die erst als Folge eines Unfalls auftreten (z.B. ein Brand der Traktionsbatterie). Um den neuen Anforderungen, die sich aufgrund dieser Gefahren ergeben, zu entsprechen, ist es unumgänglich neue Sicherheitskonzepte zu erarbeiten, neue Prüfverfahren zu gestalten und bestehende anzupassen.

Der Entwicklung einer solchen, wie in dieser Arbeit betrachteten Prüfumgebung, ist eine Analyse von grundsätzlichen Belastungen, die während eines Unfalls auf einen elektrischen Energiespeicher in einem Fahrzeug wirken können, vorangegangen. In diesem Kapitel wird auch gezeigt, wie mithilfe von Gesamtfahrzeugsimulationen Randbedingungen für einen Modulversuch abgeleitet werden können.

5.1 Analyse von Crash Belastungen am Gesamtfahrzeug

Bei einem Großteil der Unfälle wirken auf den Energiespeicher hohe Beschleunigungen. Je nach Unfallschwere und -typ können zusätzlich auch Beschädigungen in Form von Eindringen oder Verformen durch sich verschiebende, benachbarte Bauteile bzw. durch Fremdkörper wirken. Genau genommen wirken die Beschleunigungen mehrheitlich zeitlich schon vor und auch noch während der Deformierung.

Die EES sind deshalb in Hybrid- und Elektrofahrzeugen an Stellen im Fahrzeug verbaut, die bei Unfällen einen bestmöglichen Schutz vor Intrusionen und Deformationen bieten. Diese Arten von Beschädigungen sollen verhindert werden um das Risiko des Auftretens von Gefahren (Kurzschluss, „Thermal Runaway“) zu vermindern. Es ist jedoch wichtig, mit neuartigen Prüfverfahren genau jene Lastfälle, bei denen diese Umstände dennoch eintreten können, zu untersuchen.

In diesem Kapitel sollen kritische Belastungen, die für eine sichere Integration von EES sinnvoll erscheinen, ermittelt werden.

Je nachdem wo die Hochvoltbatteriemodule im Fahrzeug verbaut sind, können verschiedene Unfallkonfigurationen von Bedeutung sein. Um die am besten geschützten Stellen im Fahrzeug für die Integration von EES zu erörtern, wurden von Bakker et al. [27] Intrusionen von 9000 Fahrzeugkollisionen (in Farbe) und Intrusionen von genormten Crashtests (gestrichelte Linien) überlagert (siehe Abbildung 18).

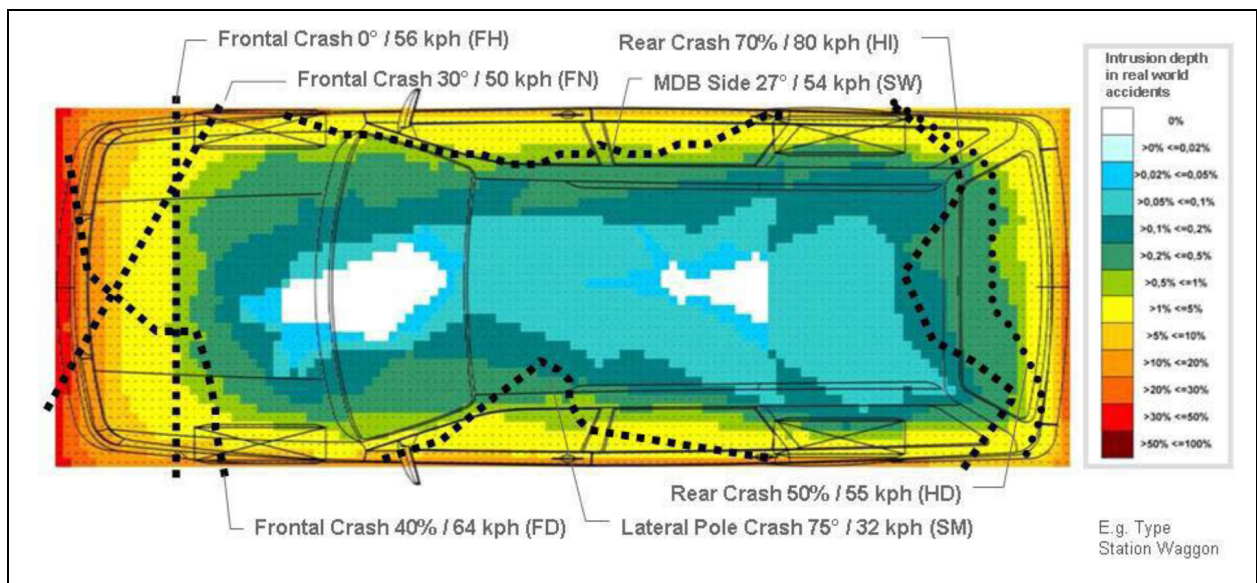


Abbildung 18: Vergleich von Intrusionen bei Crash-Tests und realen Unfällen [27]

Für die Belastungsanalyse in dieser Arbeit wurde, wie bereits erwähnt, von der momentan bei Elektrofahrzeugen weit verbreiteten Einbaulage der Akkumodule im Mitteltunnel des Fahrzeuges ausgegangen. Heckaufprallkonfigurationen schieden daher nach Betrachtung von Simulationen derartiger Konfigurationen für dieses Szenario aus, da sie keine Verformungen am Bauteil „Mitteltunnel“ verursachen. Somit standen Frontal- und Seitenaufprallkonfigurationen mit tiefen Intrusionen am Fahrzeug im Mittelpunkt des Interesses. Tiefe Intrusionen müssen bei der Integration von EES im Fahrzeug berücksichtigt werden, das bedeutet aber nicht, dass alle kritisch für den EES sein müssen.

Wie in Abbildung 18 zu sehen ist eine derartige Konfiguration, mit sehr tiefen Intrusionen, beispielsweise der „Seitenaufprall auf einen Pfahl“. Der genormte, seitliche Crashtest mit MDB-Barriere weist hingegen erheblich geringere Deformationen auf. Die untersuchten Lastfälle werden im nächsten Unterkapitel erläutert.

5.2 Gesamtfahrzeugsimulationen zur Ermittlung von Randbedingungen

In diesem Kapitel wird die Ableitung von Randbedingungen aus verschiedenen Gesamtfahrzeugsimulationen erläutert. Es wurden mit den im vorherigen Kapitel angestellten Überlegungen vier Konfigurationen ausgewählt bei denen Deformationen am Mitteltunnel des Fahrzeuges auftreten. Dazu wird eine Simulationsmatrix erstellt welche diese vier Konfigurationen beinhaltet und die auf genormten Crashversuchen basiert.

Eine solche Matrix lässt sich beliebig ausbauen (zum Beispiel mit realen Unfallszenarien aus der ZEDATU-Datenbank).

In Tabelle 3 ist die Simulationsmatrix dargestellt.

Nr.	Bezeichnung	Art	Geschwindigkeit	Gegner	Überdeckung
1	Euro NCAP	Seite	29km/h	Pole	-
2	Euro NCAP	Frontal	64km/h	Barriere ODB	40%
3	US NCAP	Frontal	56km/h	Wand	100%
4	NHTSA	Frontal	40km/h	Wand	100%

Tabelle 3: Simulationsmatrix zur Ermittlung von Randbedingungen

5.2.1 Seitenaufprall auf einen Pfahl nach Euro-NCAP mit 29km/h

Rund ein Viertel aller schweren bis tödlichen Verletzungen passieren in Europa bei einem Seitenaufprall, indem ein Fahrzeug in die Seite eines anderen oder in ein feststehendes Objekt, wie einen Baum oder Pfahl, fährt. Der Grund dafür sind die meist sehr tiefen Intrusionen. [28]

Im Test wird das zu prüfende Fahrzeug seitwärts auf einem Schlitten mit 29km/h auf einen unbeweglichen Pfahl zu bewegt, welcher relativ schmal ist, sodass er tief in die Fahrzeugseite eindringt. Der Durchmesser beträgt 254mm und der Auftreffpunkt liegt auf Höhe des Fahrers. In Abbildung 19 ist der Prüfaufbau schematisch dargestellt. [28]

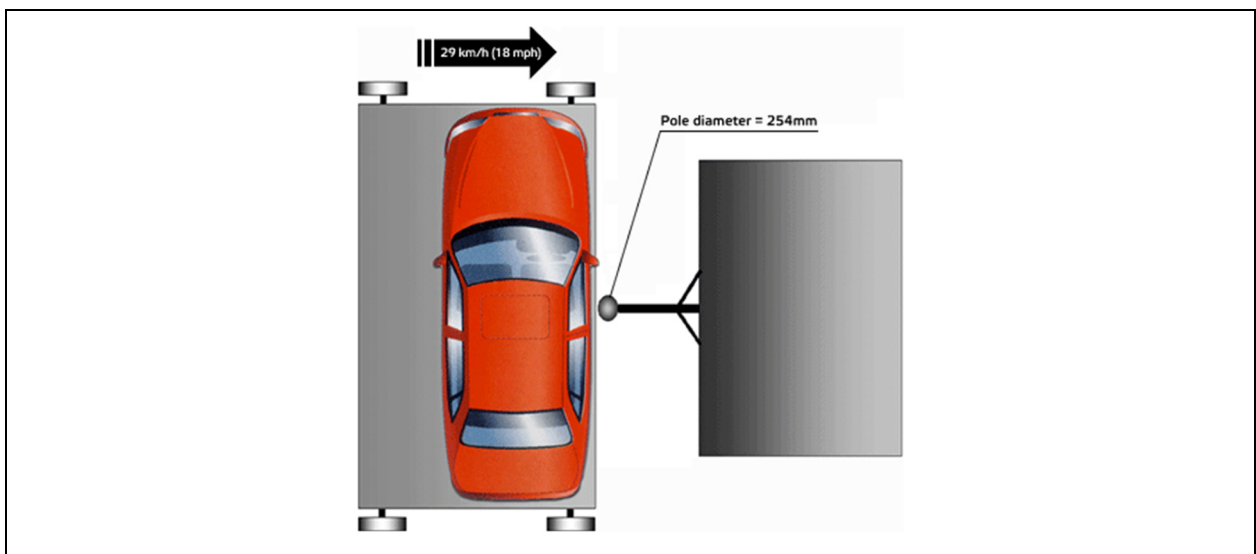


Abbildung 19: Seitenaufprall auf einen Pfahl nach Euro-NCAP [29]

Der Euro-NCAP-Pfahl-Seitenaufpralltest wurde mithilfe einer Simulationssoftware nachgebildet. In Abbildung 20 ist das dazugehörige Simulationsmodell dargestellt. Die tiefen Intrusionen, die der Pfahl seitlich am Fahrzeug verursacht, sind hier deutlich zu erkennen. Das Fahrzeug bewegt sich in seiner Y-Richtung auf den Pfahl zu. Ein 3D-Koordinatensystem (X, Y, Z) ist unten links eingezeichnet.

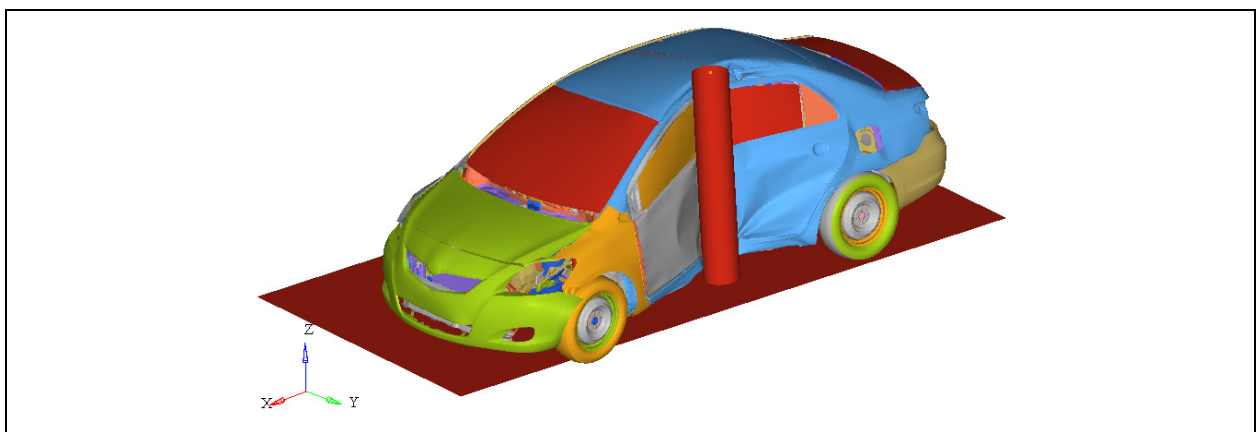


Abbildung 20: Simulationsmodell des Euro-NCAP-Pfahl-Seitenaufpralltests

In Abbildung 21 ist das verformte Fahrzeugmodell in der Simulation des Pfahl-Seitenaufpralltests von unten zu sehen. Man erkennt, wie der Mitteltunnel durch die Intrusion des Pfahls von den umliegenden Bauteilen belastet und deformiert wird.

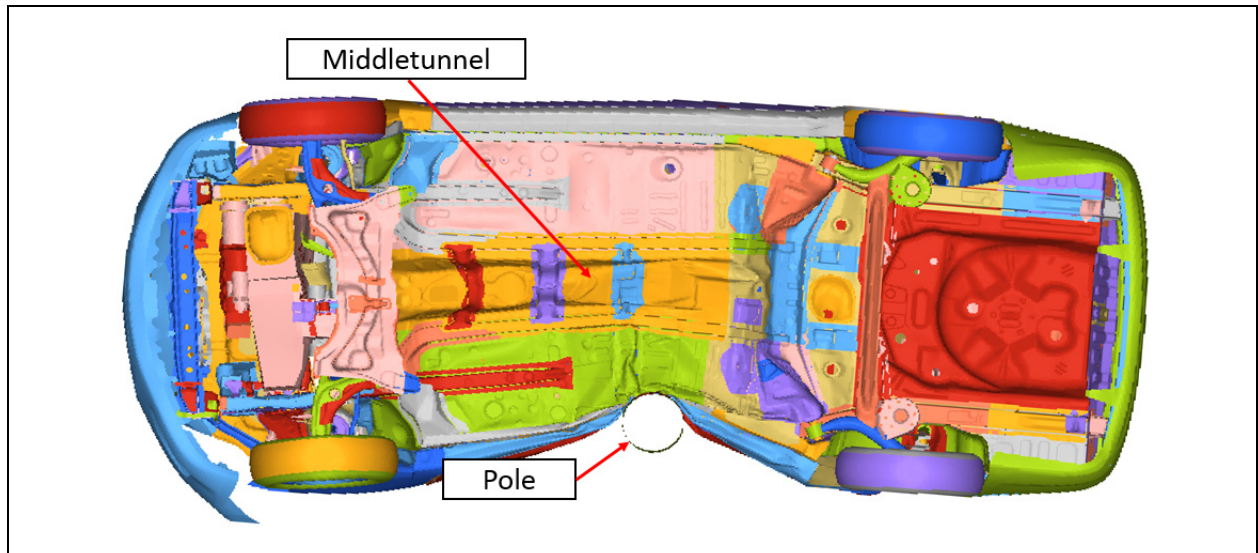


Abbildung 21: Simulationsmodell Toyota Yaris beim Pole-Seitenaufprall (Blick von unten)

Das Modell des „Toyota Yaris 2010“ [23] wurde nicht für einen Seitenaufprall validiert. Um zu überprüfen, ob sich die Intrusion des Pfahls in der Simulation trotzdem in einem realitätsnahen Bereich befindet, wurde das verformte Simulationsmodell mit Abbildung 18 [27] – in welcher die Intrusionen von 9000 Fahrzeugkollisionen und genormten Crashtests dargestellt sind – überlagert. Die markierte gestrichelte Linie stellt dabei die Intrusion eines Seitenaufpralls mit 32km/h und einem Aufprallwinkel von 75° dar, die Intrusion des Pfahls aus der Simulation des Euro-NCAP-Pfahl-Seitenaufpralls mit 29km/h ist ebenfalls zu sehen. Die Verformungen liegen in einem ähnlichen Bereich und es kann somit von aussagekräftigen Ergebnissen ausgegangen werden.

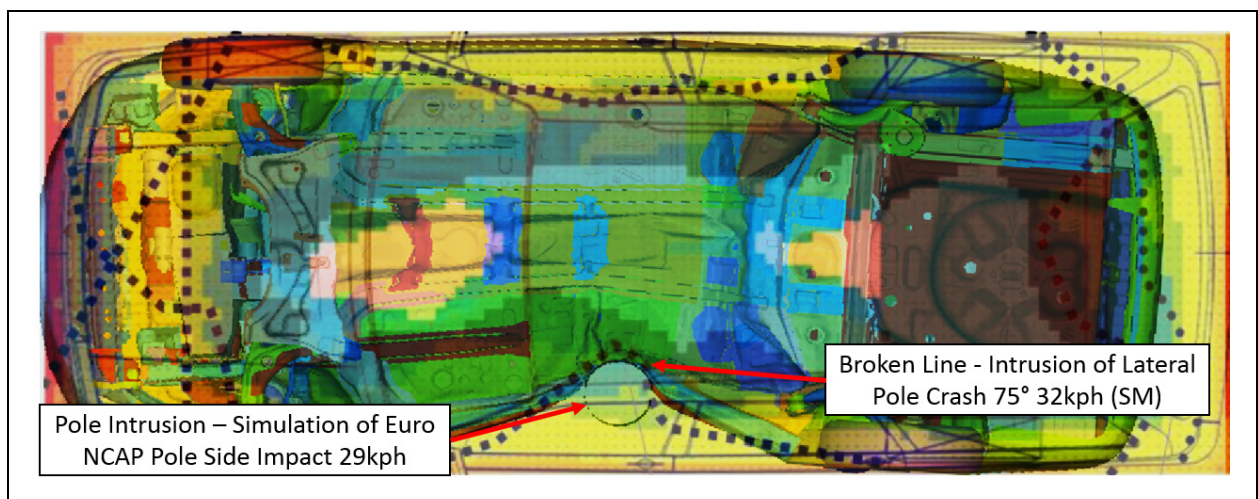


Abbildung 22: Pfahl-Seitenaufprall – Vergleich der Intrusion am FE-Modell „Toyota Yaris“ mit Intrusionen aus genormten Crashtests und realen Unfällen

Um für den vorliegenden Fall des Pfahl-Seitenaufpralles eine Auswertung von eingebrachter Energiemenge, Deformationsform und Verformungsgeschwindigkeit (die drei gesuchten Randbedingungen) durchführen zu können, wurden 12 Punkte seitlich am Mitteltunnel ausgewählt und deren Bewegung in Y-Richtung (quer zur Fahrtrichtung des Fahrzeuges) mithilfe eines „Tracking-Systems“ verfolgt (siehe Abbildung 23). Diese Punkte befinden sich im Bereich der größten Deformationen.

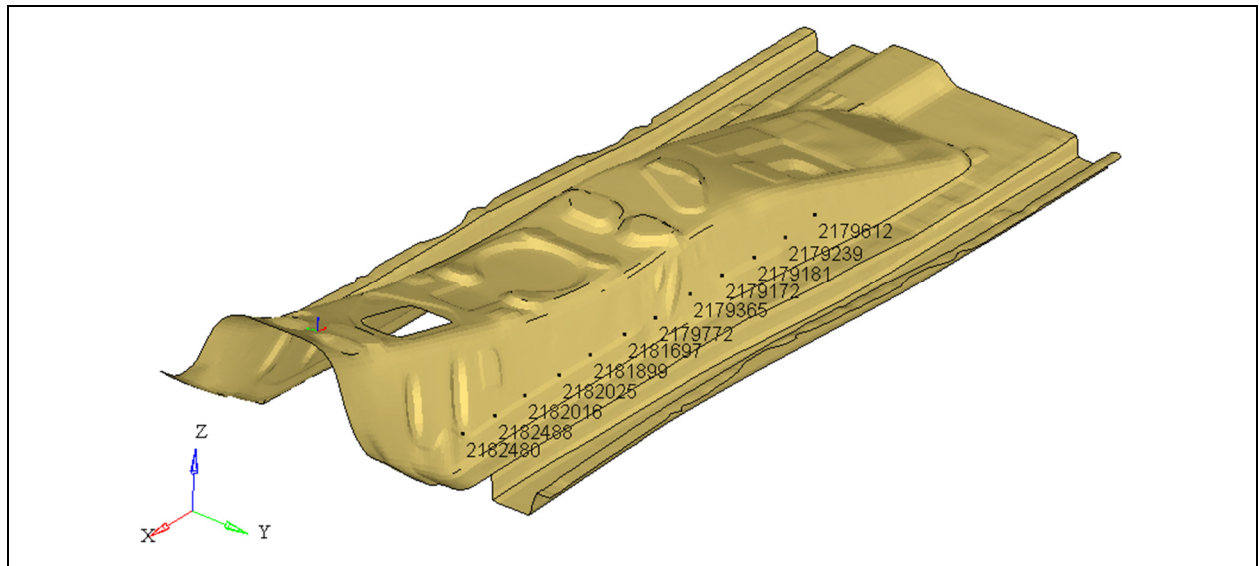


Abbildung 23: Knotenpunkte zur Auswertung der Deformationen am Mitteltunnel für den Lastfall „Euro-NCAP-Pfahl-Seitenaufprall“

In Abbildung 24 ist der verformte Mitteltunnel (hellbraun) mit dem nicht verformten (grau) überlagert dargestellt (Ansicht von oben). Ebenso sind Ausgangs- und Endposition der betrachteten Knotenpunkte mit Linien verbunden um die Verformung besser darzustellen.

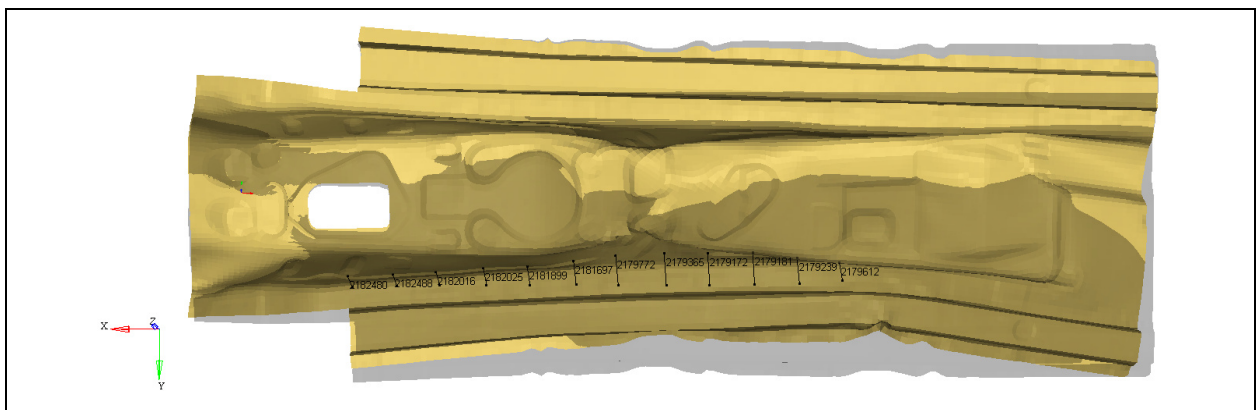


Abbildung 24: Überlagerung des verformten mit dem nicht-verformten Mitteltunnel („Euro-NCAP-Pfahl-Seitenaufprall“)

Es ist deutlich zu erkennen, dass der Mitteltunnel durch die Belastung seitlich eingedrückt wird.

Dabei wird eine Deformationsenergie von ungefähr einem Kilojoule (1kJ) in das Bauteil eingebracht. Den Verlauf der eingebrachten Energiemenge über die Zeit zeigt Abbildung 25. Vor Beginn der Deformation wirken Beschleunigungen von bis zu 15g auf den Mitteltunnel (Beschleunigungsphase bis ca. 0,018s). Als Schwellwert für das Ende dieser reinen Beschleunigungsphase wurde für alle untersuchten Lastfälle eine eingebrachte Energiemenge von 20J gewählt, um eine Vergleichbarkeit zu ermöglichen. Bis zu einem Zeitpunkt von ca. 0,1s wird Deformationsenergie in den Bauteil eingebracht. Im Zeitbereich danach kommt es zu einem leichten Zurückfedern, dem Rebound (elastischer Anteil der Verformung).

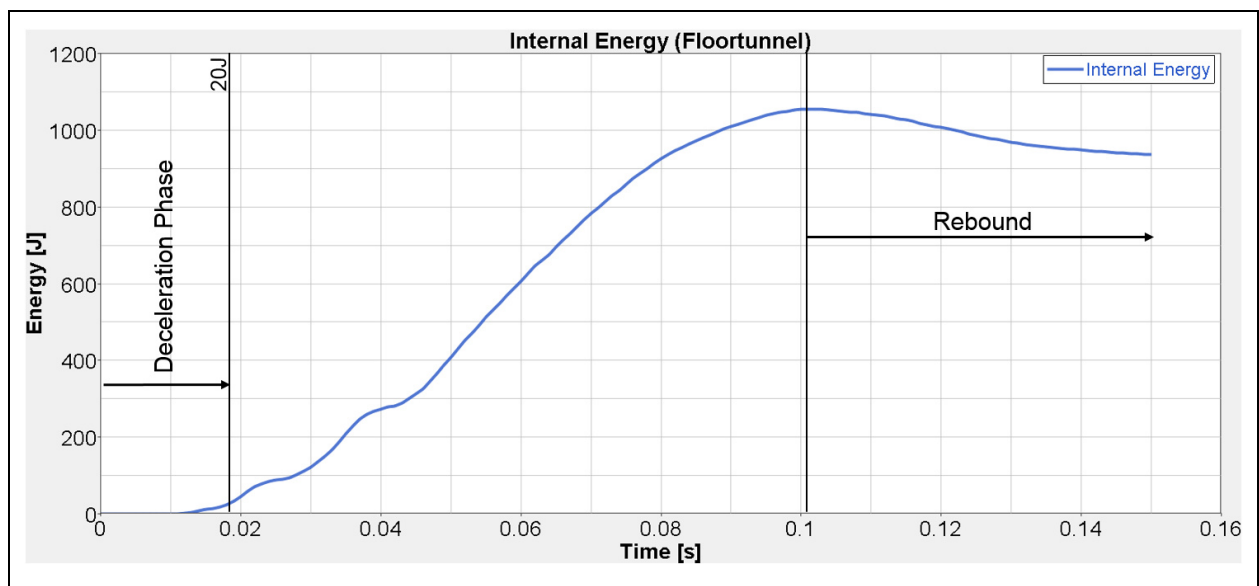


Abbildung 25: In den Mitteltunnel eingebrachte Deformationsenergie beim „Euro-NCAP-Pfahl-Seitenaufpralltest“

Diese Energiemenge stellt die erste abgeleitete Randbedingung für einen energieäquivalenten Modulversuch dar. Sie muss daher im Versuch in den EES eingebracht werden können, wenn man – wie in dieser Arbeit – voraussetzt, das Crashmanagement des betrachteten Fahrzeugs unverändert zu belassen.

Anschließend wurde die Verformung der Knotenpunkte näher betrachtet um daraus die theoretische Impaktorform ableiten zu können. In Abbildung 26 sind die relativen Verformungen der Knotenpunkte (relativ zum Fahrzeug) über die Zeit dargestellt. Die Maximalwerte der Deformationen treten zur gleichen Zeit auf.

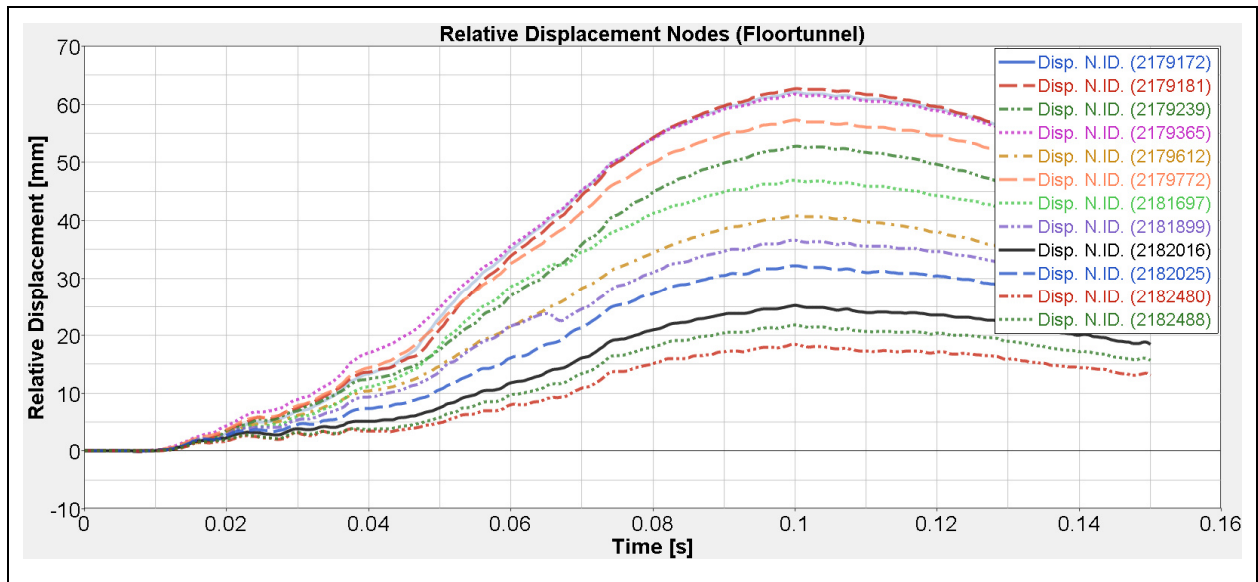


Abbildung 26: Relative Verformung der betrachteten Knotenpunkte für die Konfiguration „Euro-NCAP-Pfahl-Seitenaufprall“

Es ergeben sich dabei Bewegungen der Knotenpunkte im Bereich von 15-65mm. Abbildung 27 zeigt die Verformungen der ausgewerteten Knotenpunkte über die Zeit und zusätzlich über ihre Position in Fahrzeug X-Richtung (Fahrtrichtung).

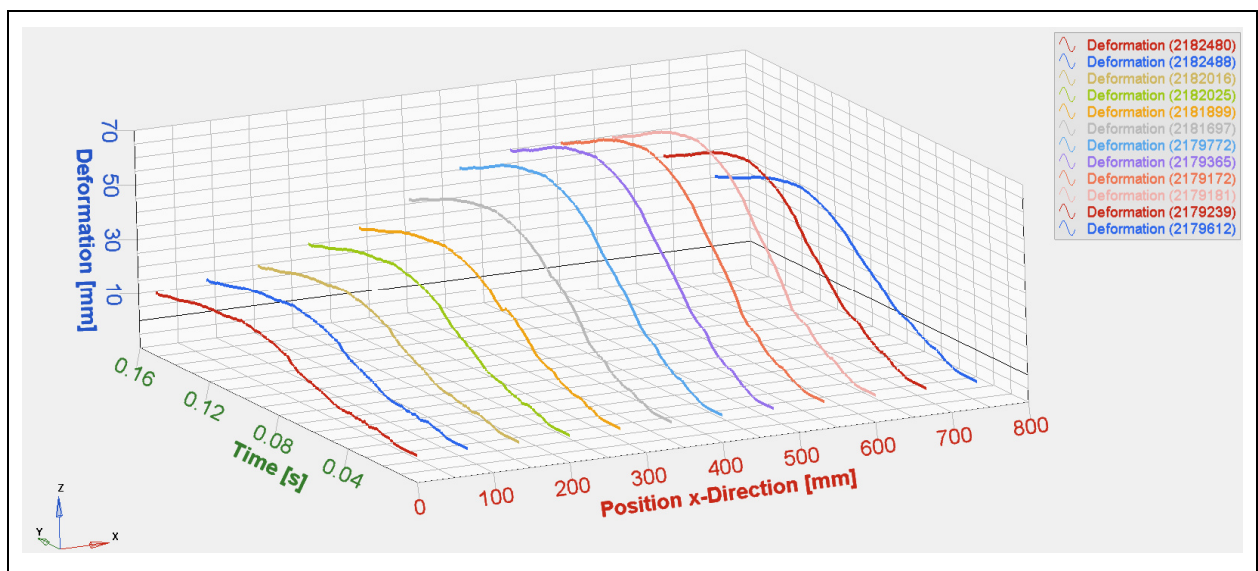


Abbildung 27: „Euro-NCAP-Pfahl-Seitenaufpralltest“ – dreidimensionale Darstellung der Deformationen der Knotenpunkte

Somit ergibt sich ein dreidimensionales Verformungsbild aus dem die theoretische Form des Impaktors, auf den der EES im Versuch auftrifft, generiert werden kann.

Diese Form stellt dann die Momentaufnahme der Verformung zum Zeitpunkt der Maximalintrusion dar (siehe Abbildung 29).

Neben der eingebrachten Energie und der Impaktorform, ist die Geschwindigkeit der Verformung relevant, um einen realitätsnahen Modulversuch aufsetzen zu können. Die Relativgeschwindigkeiten (relativ zur Fahrzeugbewegung) der einzelnen Knotenpunkte über die Zeit sind dazu in Abbildung 28 dargestellt.

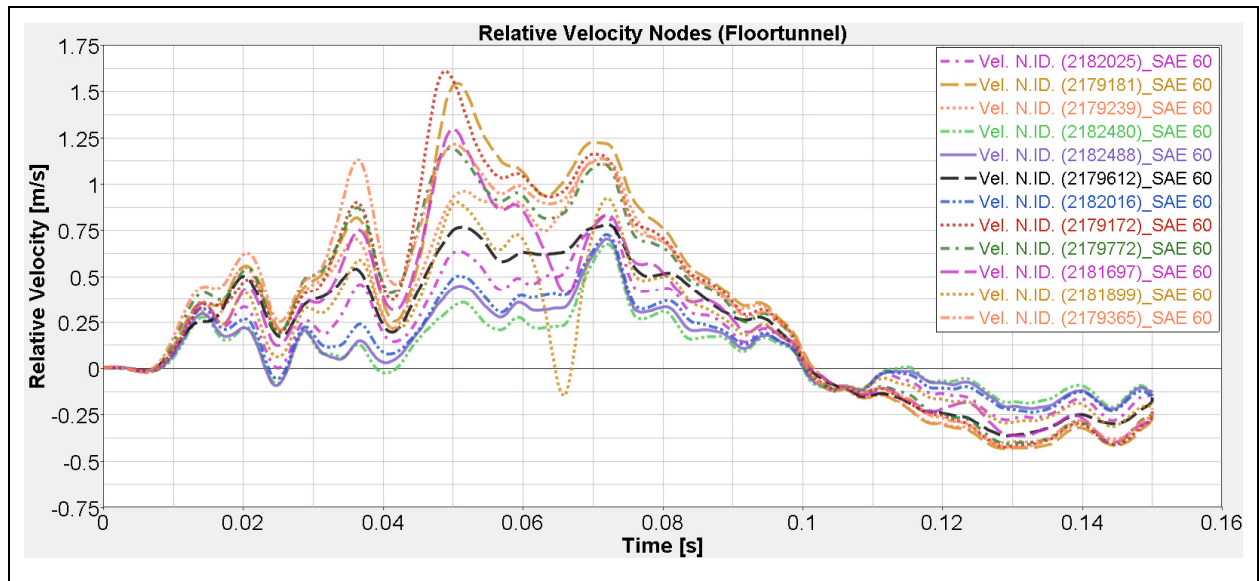


Abbildung 28: Relativgeschwindigkeit der Knotenpunkte („Euro-NCAP-Pfahl-Seitenaufpralltest“)

Es ergaben sich maximale Verformungsgeschwindigkeiten der 12 Knotenpunkte die im Bereich von 0.6-1.6m/s liegen.

Mit diesen Informationen stehen genügend Randbedingungen zur Verfügung um einen energieäquivalenten Modulversuch zu definieren.

Zusammenfassend werden alle abgeleiteten Randbedingungen in Tabelle 4 dargestellt:

Randbedingungen	
Eingebrachte Deformationsenergie:	~ 1.0kJ
Deformationsform/ Richtung:	Siehe Abbildung 29/ Fahrzeug Y-Richtung
Deformationsgeschwindigkeit:	0.6-1.6m/s

Tabelle 4: Randbedingungen für Lastfall „Euro-NCAP-Pfahl-Seitenaufprall“

In Abbildung 29 ist die theoretische Impaktorform dargestellt. Die Breite wird in Prozent angegeben, da diese an die Abmessungen des Moduls angepasst werden muss.

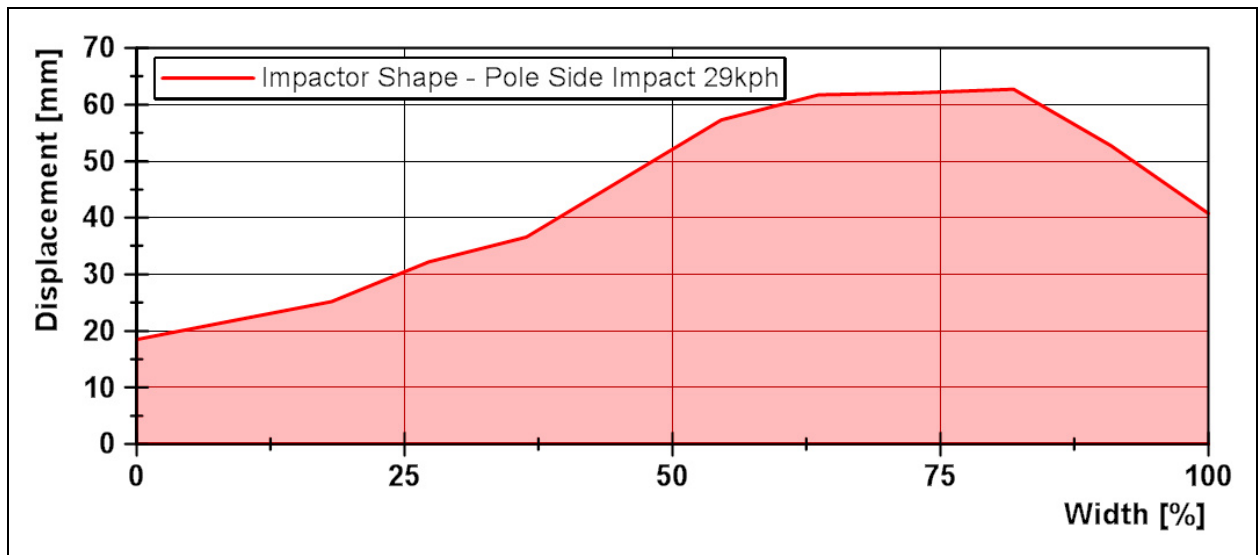


Abbildung 29: Theoretische Impaktorform für Lastfall „Euro-NCAP-Pole-Seitenaufprall“

Dieselbe Methodik, die bei diesem Lastfall herangezogen wurde, kam auch bei den folgenden Lastfällen zur Anwendung.

5.2.2 Frontalaufprall nach Euro-NCAP (USA-IIHS) mit 64km/h

Dieser Test soll einen frontalen Halbzusammenstoß zweier Fahrzeuge ähnlichen Gewichts, mit einer Geschwindigkeit von jeweils 55km/h simulieren. Es handelt sich dabei um eine häufig auftretende Unfallart, bei der es zu schweren oder tödlichen Verletzungen kommen kann. Da bei den meisten Frontalzusammenstößen nur ein Teil der Autofront betroffen ist, wird der Test mit einer versetzten Spur durchgeführt. [30]

Das Fahrzeug trifft mit 64km/h und 40% Überlappung auf ein verformbares Hindernis, welches an einem unbeweglichen Block befestigt ist. Die Barriere ist eine verformbare Wabenfront aus Aluminium und soll eine gegnerische Fahrzeugfront nachbilden. [30]

In Abbildung 30 ist die Crashkonfiguration schematisch dargestellt.

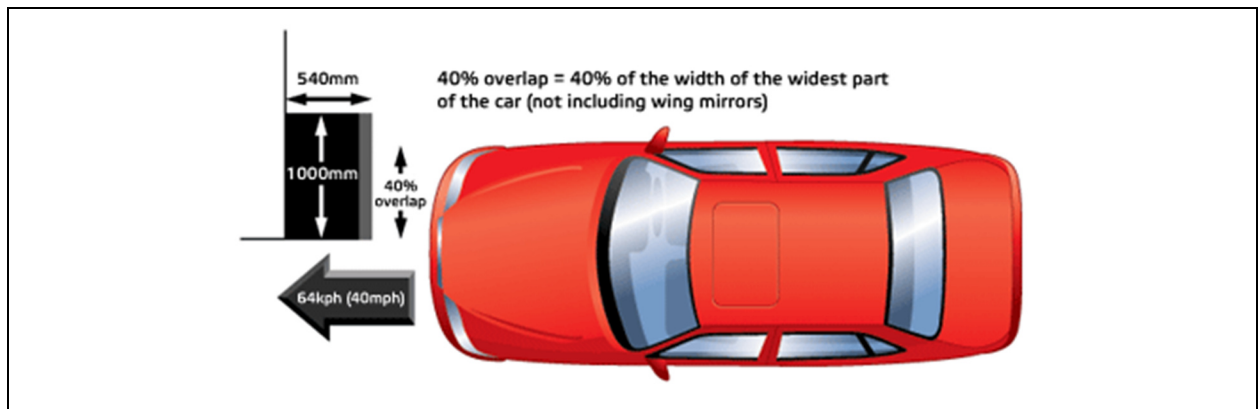


Abbildung 30: Frontalaufprall nach Euro-NCAP und USA-IIHS [30]

Das Finite-Elemente-Modell des „Toyota Yaris 2010“ wurde unter anderem mit dieser Testkonfiguration validiert. Abbildung 31 zeigt den Validierungstest (IIHS-Test CEF0610) in einem Vergleich mit der Simulation im Zuge der Validierungstests. [24]

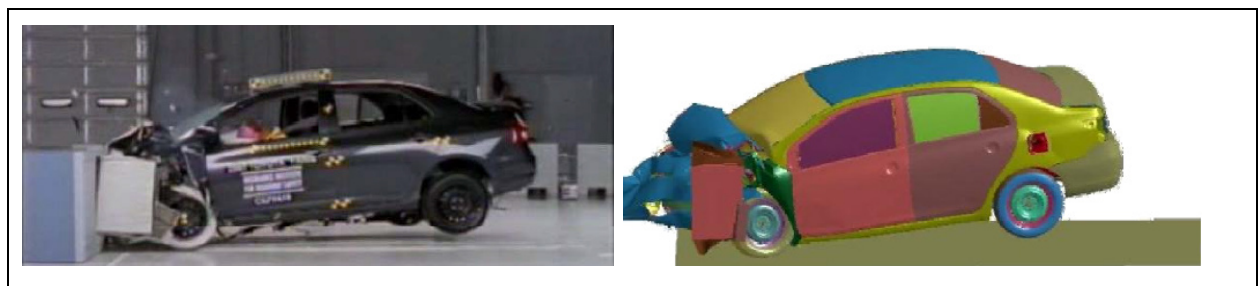


Abbildung 31: IIHS Test CEF0610 – Vergleich zwischen realem Crashtest (links) und Simulationsmodell des Validierungstests (rechts) [24]

Wie in der Abbildung ersichtlich sind die Ergebnisse gut vergleichbar.

In Abbildung 32 ist die nachgebildete Crashkonfiguration als Simulationsmodell zu sehen. Deutlich zu erkennen sind große Deformationen an der linken Fahrzeugfront die sich durch den versetzten Aufprall auf die Barriere ergeben.

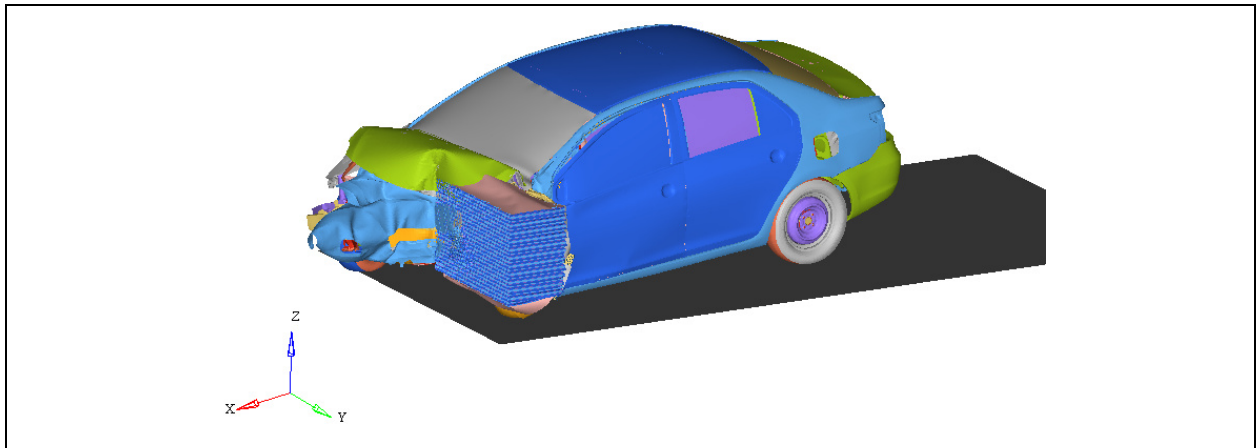


Abbildung 32: Simulationsmodell für den Lastfall „Euro-NCAP-Frontalaufprall mit 64km/h“

Für die Auswertung der Belastungen steht ebenfalls der Mitteltunnel des Fahrzeugs im Mittelpunkt der Betrachtungen. Er wird bei dieser Konfiguration nicht seitlich sondern schräg von vorne verformt. Darum wurden 13 Knotenpunkte entlang der Stirnfläche des Mitteltunnels ausgewählt deren Verformungswege während des Crashes wieder mit einem „Tracking-System“ verfolgt worden sind (siehe Abbildung 33).

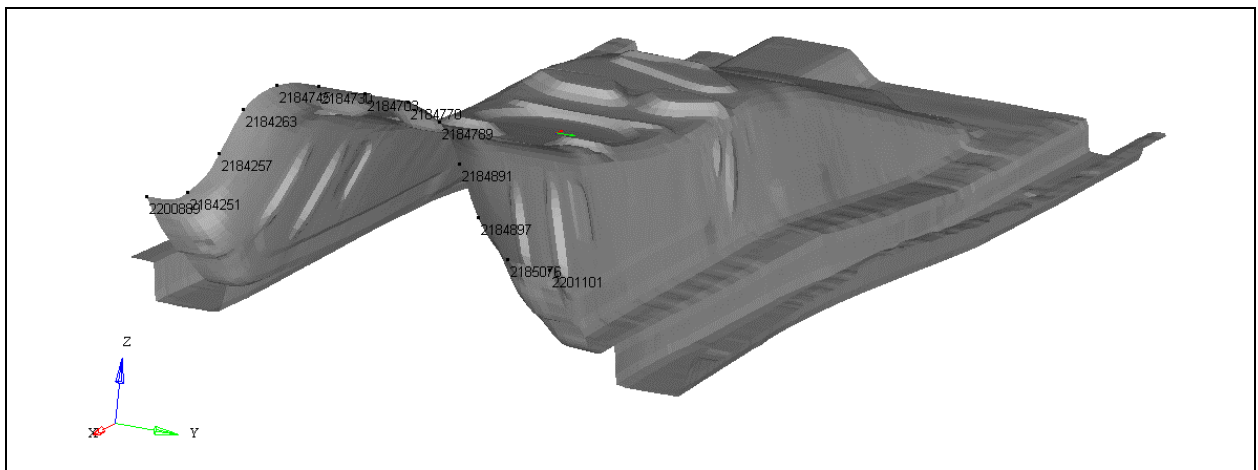


Abbildung 33: Auswahl der Knotenpunkte zur Auswertung von Verformungen am Mitteltunnel für den Lastfall „Euro-NCAP-Frontalaufprall mit 64km/h“

In diesem Fall wurden die Knotenpunkte nichtmehr entlang der Fahrzeug X-Richtung sondern in möglichst gleichem Abstand in Fahrzeug Y-Richtung angeordnet. (siehe Koordinatensystem in Abbildung 33)

In Abbildung 34 ist wieder der verformte Mittelunnel (rot dargestellt) mit dem nicht verformten (grau) überlagert dargestellt.

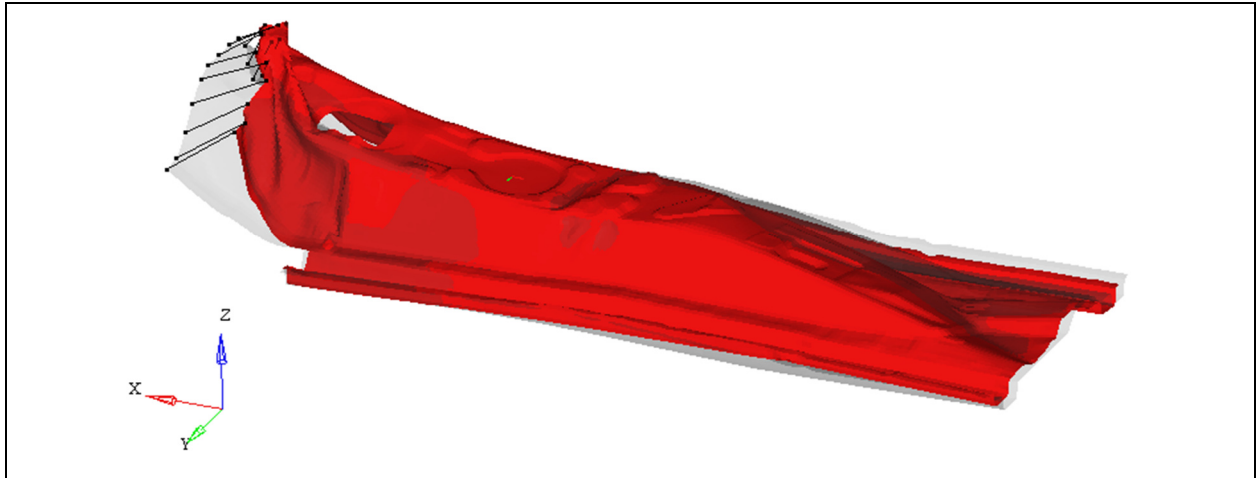


Abbildung 34: Überlagerung des verformten und des nicht verformten Mittelunnels für den Lastfall „Euro-NCAP-Frontalaufprall mit 64km/h“

Gut zu erkennen ist, dass der Mittelunnel schräg von vorne verformt wird. Unter Berücksichtigung der Einbaulage der Akkumodule stellt dieser Lastfall eine Belastung derer in Längsrichtung x_M dar (siehe Abbildung 16 bzw. Abbildung 17).

In Abbildung 35 ist die in den Mittelunnel eingebrachte Deformationsenergie über die Zeit dargestellt. Sie beträgt in diesem Fall 1,4kJ und liegt damit um 350J über dem Wert des Lastfalles „Pfahl-Seitenaufprall“. Die Verzögerungsphase bis 0,041s (in diesem Fall wirken Verzögerungswerte von bis zu 36g auf den Mittelunnel) dauert – wegen der größeren Crashzone in der Fahrzeugfront – mehr als doppelt so lange wie beim zuvor betrachteten Lastfall. In der Abbildung ist ein leichter Rückgang der internen Energie nach 0,104s aufgrund des elastischen Anteils der Verformung zu sehen.

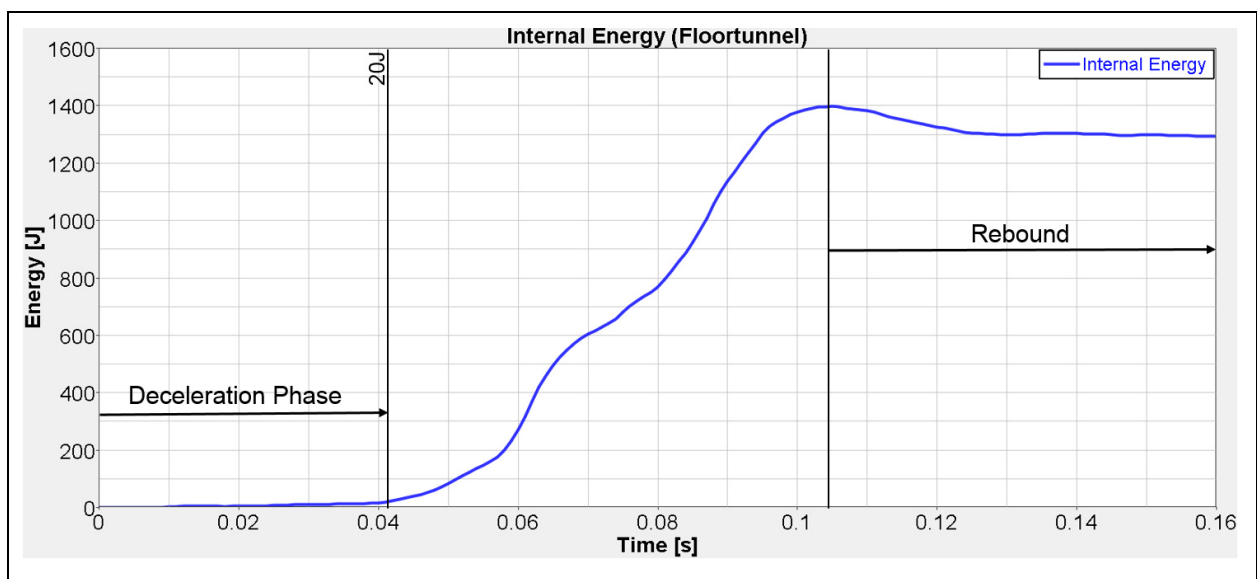


Abbildung 35: In den Mittelunnel beim Lastfall „Euro-NCAP-Frontalaufprall“ eingebrachte Energie

Diese Energiemenge stellt wiederum die erste von drei Randbedingungen für einen energieäquivalenten Modulversuch dar. Sie muss bei einem Ersatzversuch in den EES eingebracht werden können.

In Abbildung 36 sind die relativen Verformungen (relativ zum Fahrzeug) der Knotenpunkte über die Zeit dargestellt, welche wieder als Grundlage für die zweite abgeleitete Randbedingung dienen.

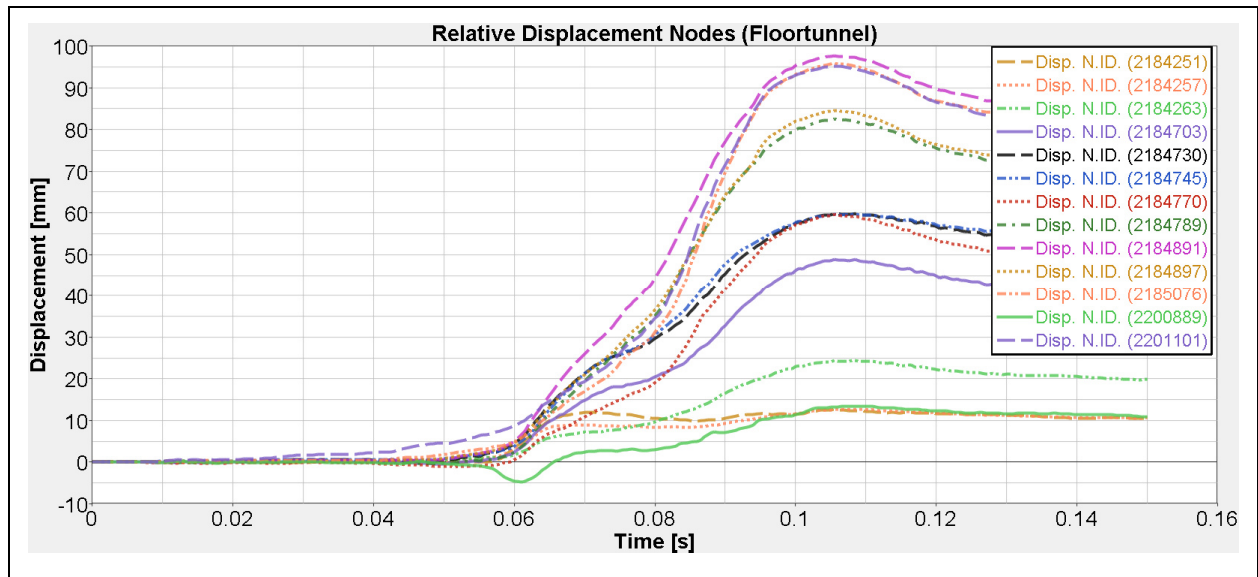


Abbildung 36: „Euro-NCAP-Frontalaufprall“ – Verformung der betrachteten Knotenpunkte

Die Maximalwerte der Verformungen treten auf der Zeitachse wieder zum selben Zeitpunkt auf und betragen hier bis zu 100mm. Wegen der unsymmetrischen Belastung des Mitteltunnels treten auf der in Fahrtrichtung gesehen linken Seite weit höhere Deformationswerte auf als auf der rechten.

Wie bereits in der vorherigen Crashkonfiguration wurden die Verformungen aller Knotenpunkte über die Zeit und zusätzlich über ihre Position in Fahrzeug Y-Richtung dargestellt.

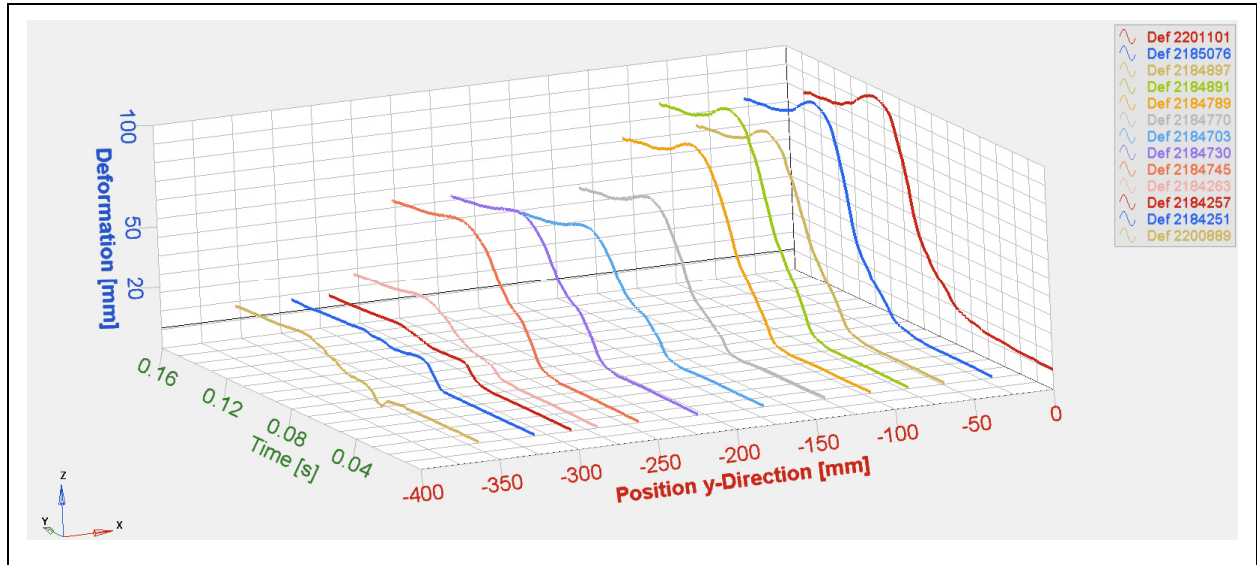


Abbildung 37: „Euro-NCAP-Frontalaufprall“ – dreidimensionale Darstellung der Deformation der Knotenpunkte

Daraus kann wieder die theoretische Impaktorform (siehe Abbildung 39) zum Zeitpunkt der Maximalverformungen abgeleitet werden.

Um die Randbedingungen für einen energieäquivalenten Modulversuch zu vervollständigen, musste wie zuvor die Belastungsgeschwindigkeit berücksichtigt werden. Die Geschwindigkeiten (relativ zur Fahrzeugbewegung) der einzelnen Knotenpunkte über die Zeit sind in Abbildung 38 dargestellt. Sie betragen zwischen 0.8 und 4.9m/s.

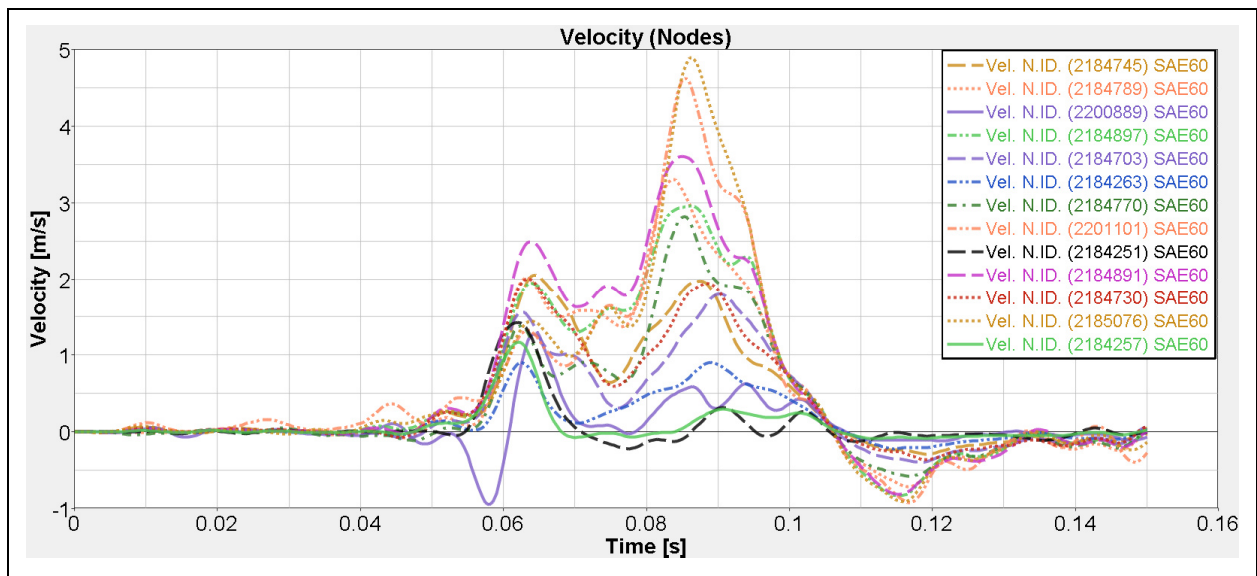


Abbildung 38: „Euro-NCAP-Frontalaufprall“ – Geschwindigkeit der Knotenpunkte

In Tabelle 5 werden die drei abgeleiteten Randbedingungen für diesen Lastfall zusammengefasst.

Randbedingungen	
Eingebrachte Deformationsenergie:	~ 1,4kJ
Deformationsform/ Richtung:	Siehe Abbildung 39/ Fahrzeug X-Richtung
Deformationsgeschwindigkeit:	0.8-4.9m/s

Tabelle 5: Randbedingungen des Lastfalles „Euro-NCAP-Frontalaufprall“

Abbildung 39 zeigt die theoretische Impaktorform aus welcher wiederum ein geeigneter Impaktor abgeleitet werden kann.

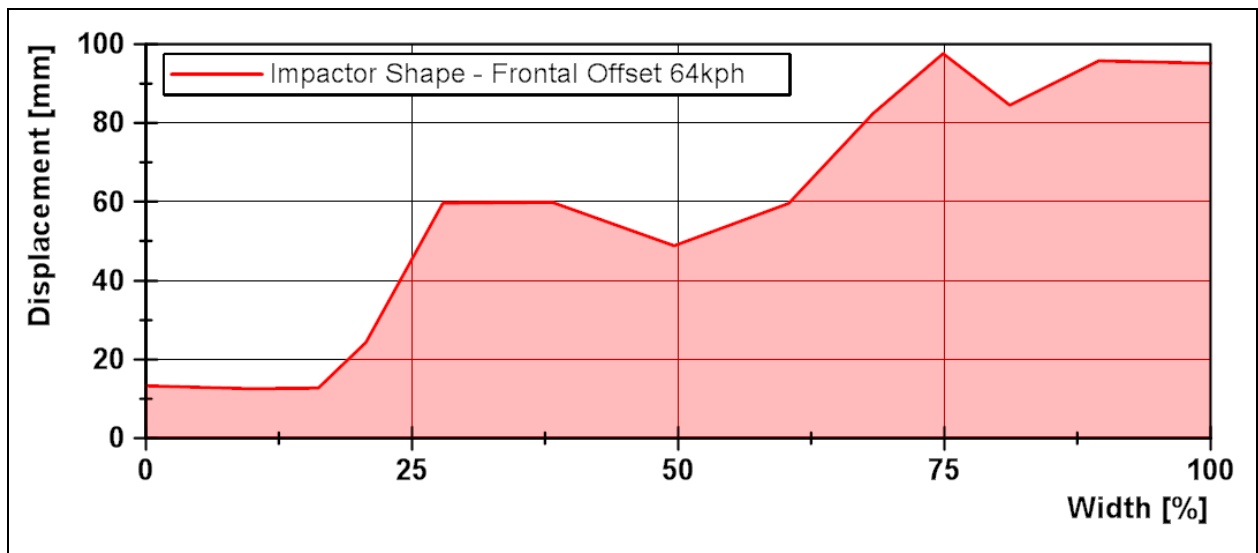


Abbildung 39: Theoretische Impaktorform Lastfall „Euro-NCAP-Frontalaufprall 64km/h“

5.2.3 Frontalaufprall nach US-NCAP (NHTSA) mit 56km/h

Der Frontalaufprall nach US-NCAP wird mit 56km/h statt wie beim Euro-NCAP Frontalaufprall mit 64km/h gefahren. Anstelle der verformbaren Barriere wird eine starre Wand als Hindernis verwendet. Die Versuchskonfiguration ist in Abbildung 40 schematisch dargestellt. Sie wird auch von der National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) mit gleichen Randbedingungen durchgeführt.

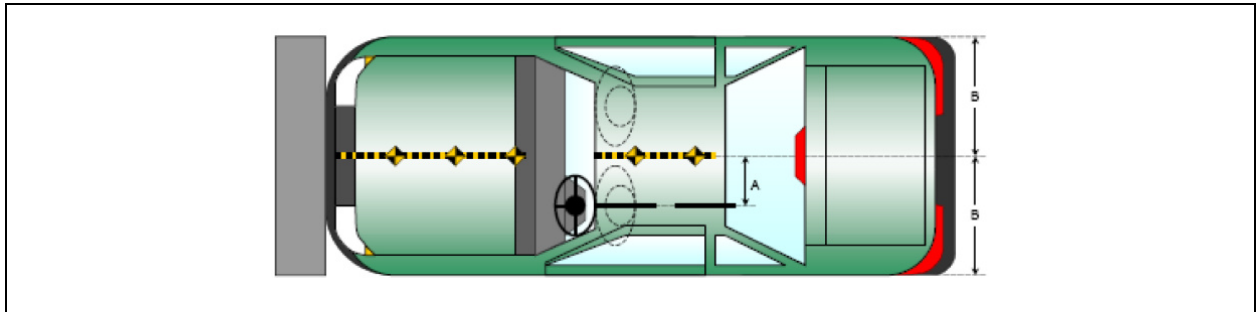


Abbildung 40: Frontalaufprall nach „US-NCAP“ [31]

Die Konfiguration entspricht ebenfalls einem Validierungstest für das Finite-Elemente-Modell des Fahrzeugs „Toyota Yaris 2010“ (NHTSA-Test 5677). Dieser Versuch ist in Abbildung 41 zu sehen und zeigt die übereinstimmenden Ergebnisse von Crashtest und Simulation. [24]

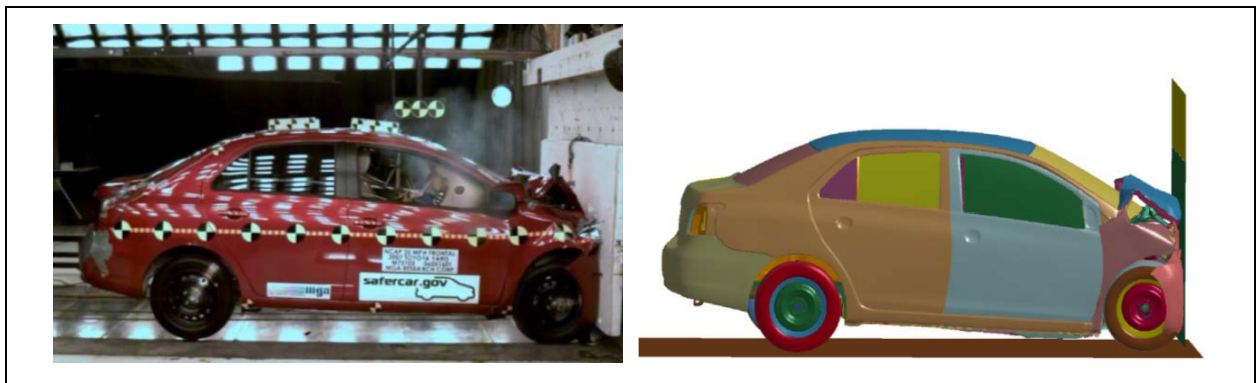


Abbildung 41: „NHTSA Test 5677“ – Vergleich des Validierungs-Crashtest (links) mit der Simulation (rechts) [24]

Bei dieser Crashkonfiguration treten über die gesamte Fahrzeugbreite gleichmäßig große Deformationen auf. Der Mitteltunnel wird dabei von vorne in Fahrtrichtung belastet. In Abbildung 42 ist das Simulationsmodell dargestellt.

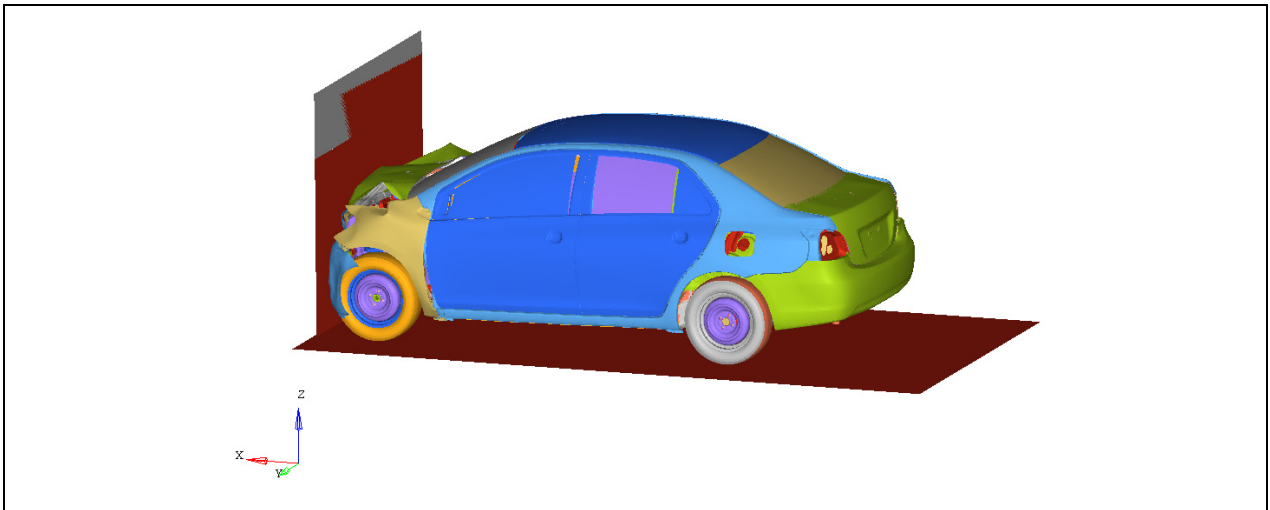


Abbildung 42: „US-NCAP-Frontalaufprall“ – Simulationsmodell

Es werden für die Auswertung dieselben 13 Knotenpunkte entlang der Stirnfläche des Mitteltunnels ausgewählt wie schon zuvor beim Lastfall „Frontalaufprall nach Euro NCAP“ (siehe Abbildung 33). Für die Ableitung der Randbedingungen wurde gleich vorgegangen wie bei den zuvor gezeigten Crashkonfigurationen.

In Abbildung 43 ist der verformte Mitteltunnel (rot dargestellt) im Vergleich zu dem nicht verformten (grau) zu sehen. Es ist gut zu erkennen wie der Mitteltunnel von vorne gestaucht wird und dadurch nach unten ausknickt.

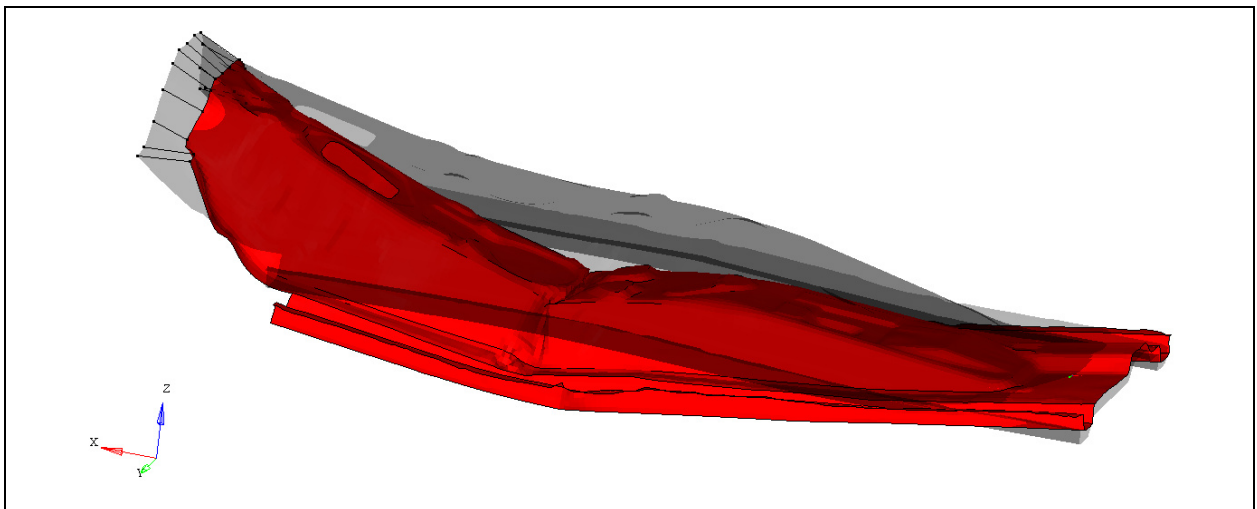


Abbildung 43: „US-NCAP-Frontalaufprall“ – Überlagerung des verformten und des nicht verformten Mitteltunnel

Die Deformationsenergie, welche in den Mitteltunnel eingebracht wird, beträgt bei diesem Lastfall 1,9kJ und stellt somit die größte Energiemenge aller betrachteten Crashkonfigurationen dar (siehe Abbildung 44). Auf den Bauteil wirken in der Beschleunigungsphase, bevor die Deformation einsetzt, Verzögerungswerte von bis zu 52g. Diese Phase dauert beim flächigen Frontalaufprall mit 0,019s in etwa gleich lange wie beim Pole-Seitencrash. Der Test erfolgt mit 56km/h aber fast doppelt so schnell. Der elastische Anteil der Verformung ist bei diesem Lastfall nicht so stark ausgeprägt wie bei den zuvor gezeigten.

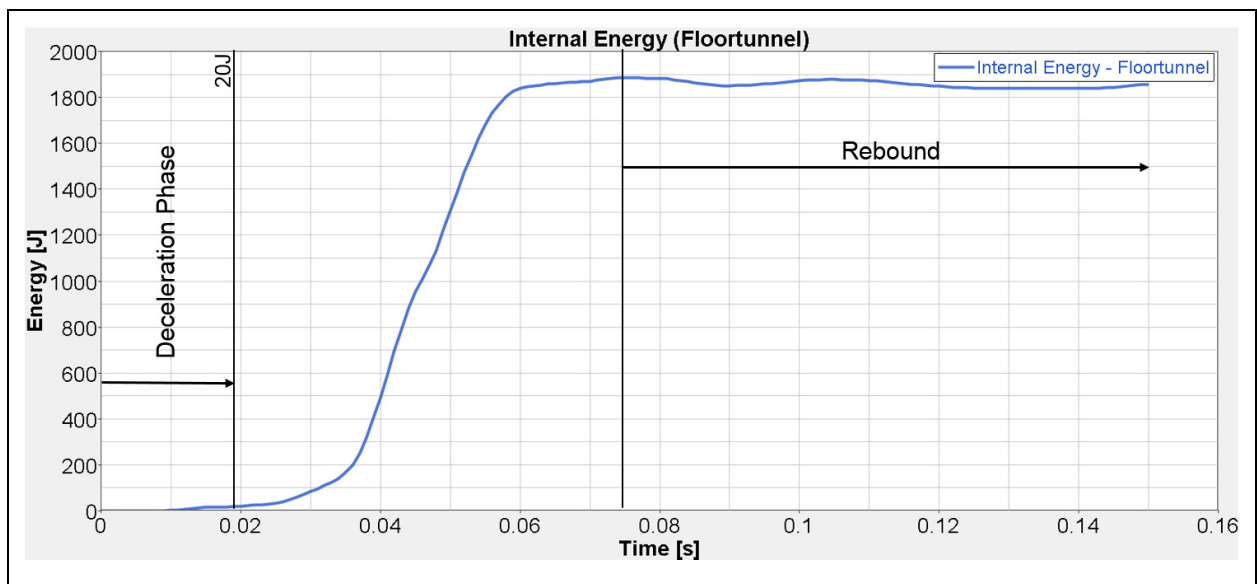


Abbildung 44: „US-NCAP-Frontalaufprall“ – in den Mitteltunnel eingebrachte Deformationsenergie

Die Verformungen der Knotenpunkte betragen bis zu 86mm und sind in Abbildung 45 über die Zeit aufgetragen.

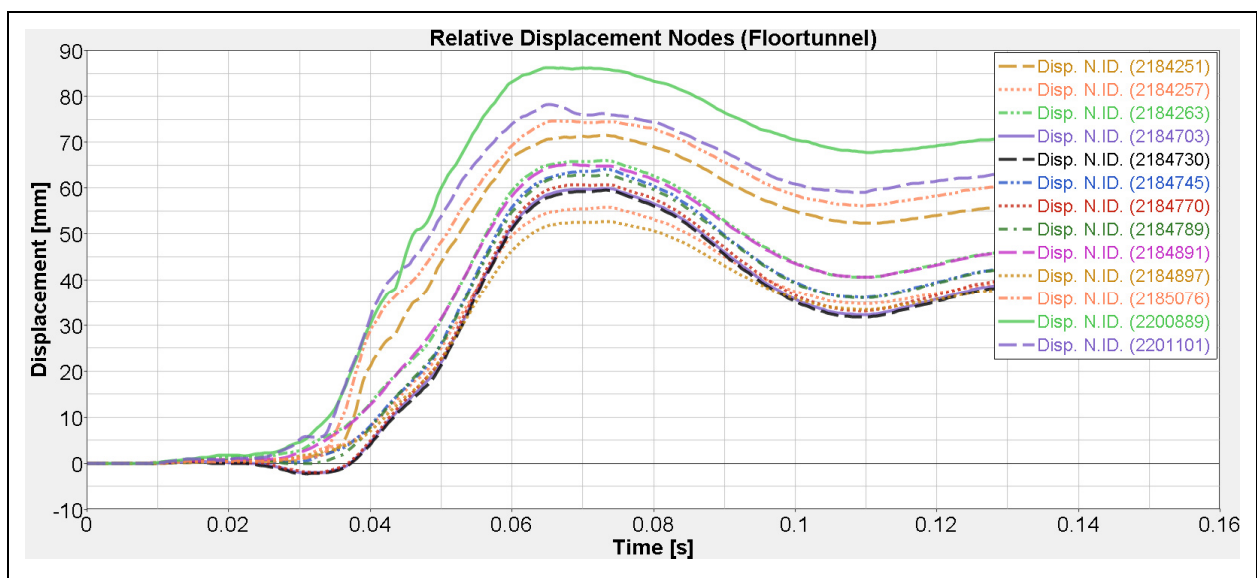


Abbildung 45: „US-NCAP-Frontalaufprall“ – Verformungen der Knotenpunkte

Zur Veranschaulichung des Verformungsbildes wurden in Abbildung 46 wieder die Verformungen der Knotenpunkte über die Zeit und zusätzlich über ihre Position in Fahrzeug Y-Richtung dargestellt. Daraus kann wiederum eine theoretische Impaktorform abgeleitet werden. Die Verformung ist beim Frontalaufprall gegen die starre Wand über die Breite des Mitteltunnels gleichmäßiger verteilt wie beim versetzten Frontalaufprall nach Euro-NCAP.

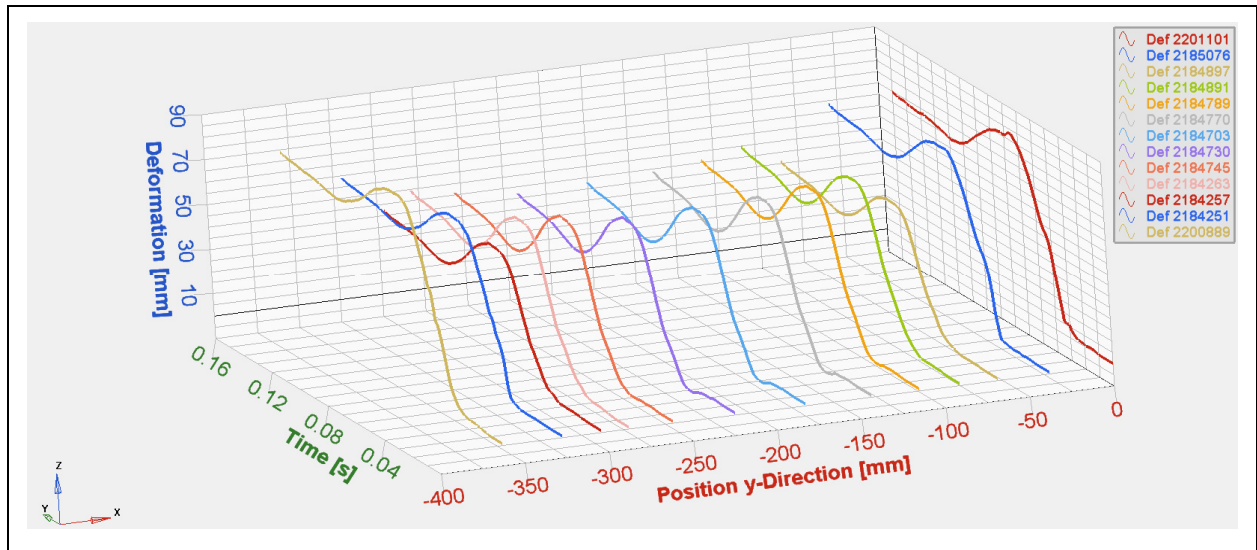


Abbildung 46: „US-NCAP-Frontalaufprall“ – dreidimensionale Darstellung der Deformationen der Knotenpunkte

Es wurde als dritte Randbedingung wieder die Geschwindigkeit der Verformung am Mitteltunnel herangezogen. Die Geschwindigkeiten der Knotenpunkte über die Zeit sind in Abbildung 47 dargestellt. Sie liegen hier im Bereich von 2.5-5.0m/s.

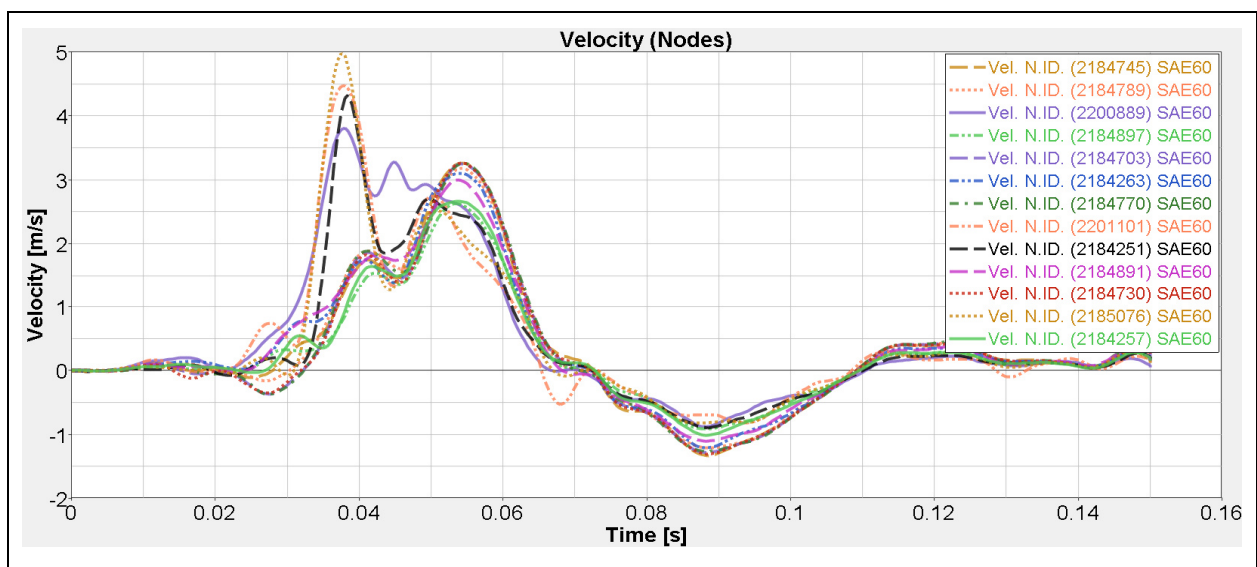


Abbildung 47: „US-NCAP-Frontalaufprall“ – Geschwindigkeiten der Knotenpunkte

In Tabelle 6 werden die drei abgeleiteten Randbedingungen für diesen Lastfall zusammengefasst.

Randbedingungen	
Eingebrachte Deformationsenergie:	~ 1,9kJ
Deformationsform/ Richtung:	Siehe Abbildung 48/ Fahrzeug Y-Richtung
Deformationsgeschwindigkeit:	2.5-5.0m/s

Tabelle 6: Randbedingungen des Lastfalles „Frontalaufprall nach US-NCAP“

Abbildung 40 zeigt die theoretische Impaktorform, die sich aus der Betrachtung des Lastfalles „US-NCAP-Frontalaufprall“ ergeben hat. Aus dieser lässt sich wiederum die Form eines Impaktors für einen Modulversuch generieren.

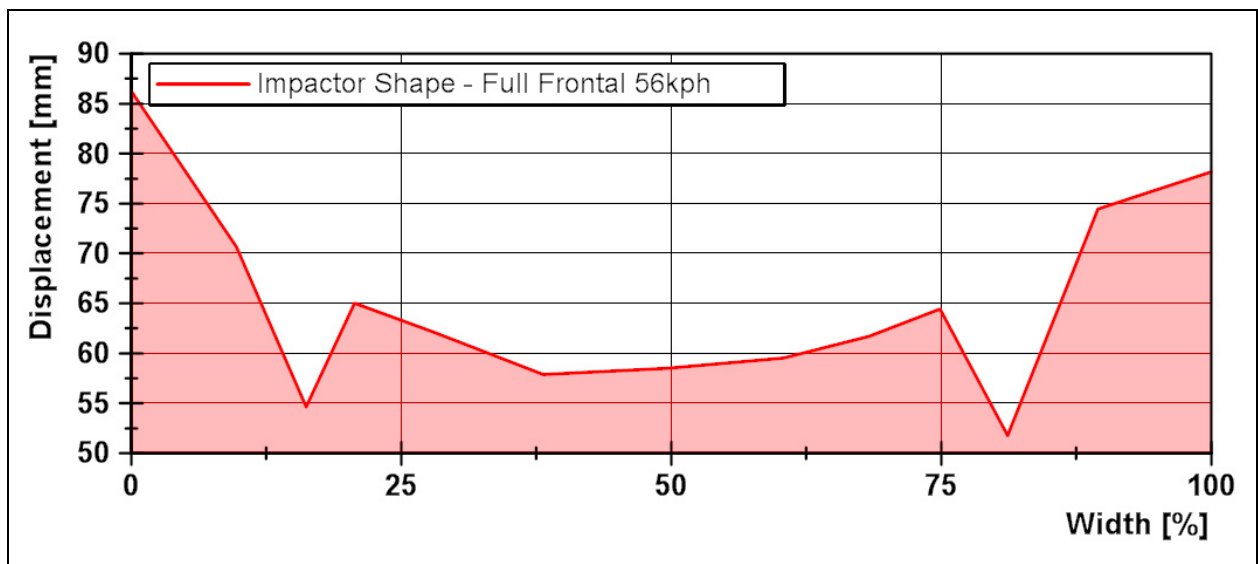


Abbildung 48: Theoretische Impaktorform für den Lastfall „US-NCAP-Frontalaufprall“

5.2.4 Frontalaufprall nach NHTSA mit 40km/h

Diese Crashkonfiguration ist bis auf die Versuchsgeschwindigkeit die gleiche wie beim zuvor gezeigten „US-NCAP-Frontalaufprall“. Sie beträgt bei diesem Test 40 km/h statt 56km/h. Der schematische Versuchsaufbau ist nochmals in Abbildung 49 zu sehen.

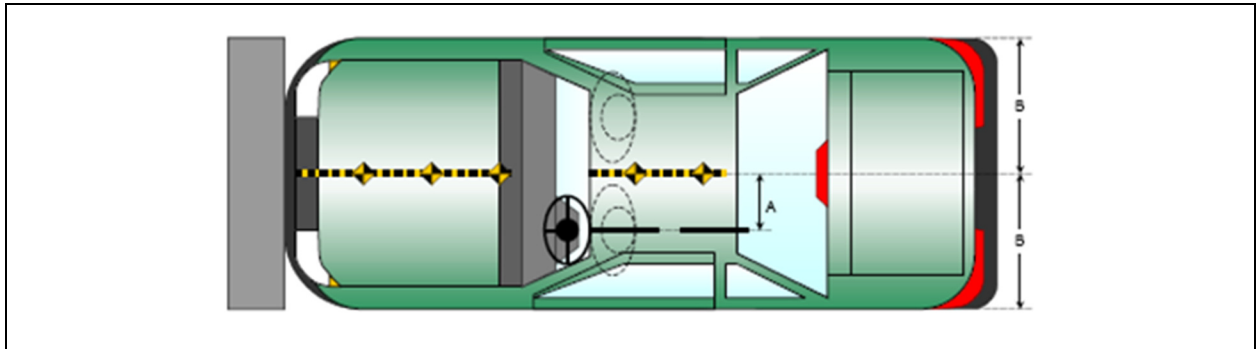


Abbildung 49: Schematische Darstellung des Frontalaufpralls nach NHTSA [31]

Auch diese Konfiguration wurde zur Validierung des Fahrzeugmodells herangezogen („NHTSA Test 6069“). In Abbildung 50 ist wieder der Vergleich dieses Validierungstests mit der Simulation dargestellt. Die Ergebnisse stimmen wiederum gut überein. [24]

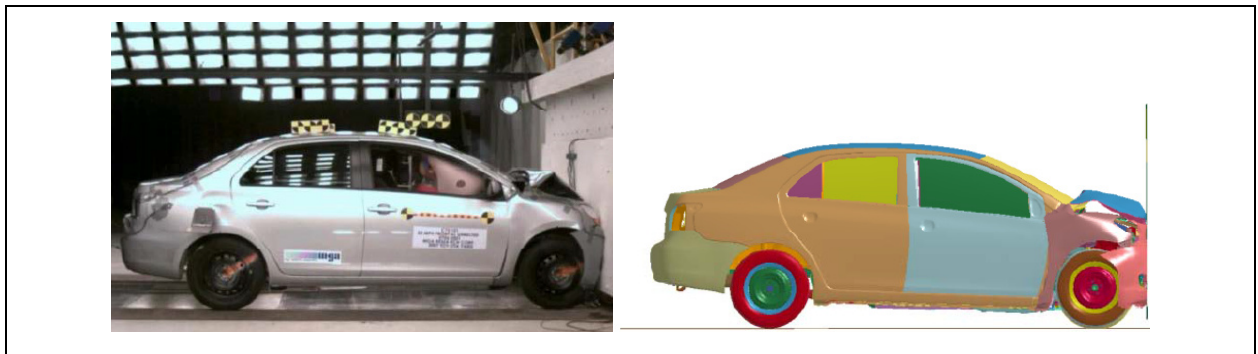


Abbildung 50: „NHTSA-Test 6069“ - Gegenüberstellung realer Crashtest (links) und Simulation (rechts) [24]

Die Belastungsrichtung des Mittel隧nells und die Knotenpunkte für die Auswertung sind dieselben wie schon beim Lastfall „US-NCAP-Frontalaufprall“ (siehe Abbildung 33).

Der Mitteltunnel wird in Fahrzeug X-Richtung gestaucht und knickt leicht ein, die Verformung ist aber – wie erwartet – geringer ausgeprägt, was in Abbildung 51 gut zu erkennen ist.

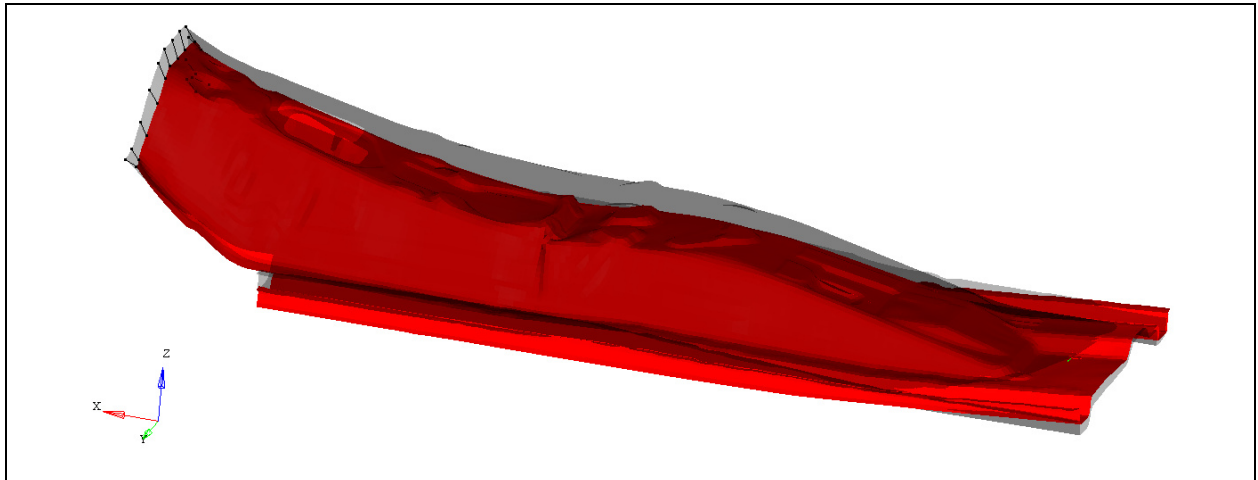


Abbildung 51: „NHTSA-Frontalaufprall mit 40km/h“ – Überlagerung des verformten (rot) mit dem nicht verformten Mitteltunnel (grau)

In Abbildung 52 ist die in den Mitteltunnel eingebrachte Deformationsenergie über die Zeit dargestellt. Sie beträgt in diesem Fall ungefähr 0,6kJ. Die Beschleunigungsphase dauert mit 0,026s etwas länger wie beim „Pfahl-Seitenaufprall“ und dem „US-NCAP-Frontalaufprall“. Dies ist auf die gegenüber dem zuletzt genannten Lastfall verringerte Geschwindigkeit des Tests zurückzuführen. In dieser Phase wirken Verzögerungen von bis zu 27g auf den Mitteltunnel. Der elastische Anteil der Verformung (in Abbildung 52 als „Rebound“ bezeichnet) ist deutlich zu erkennen.

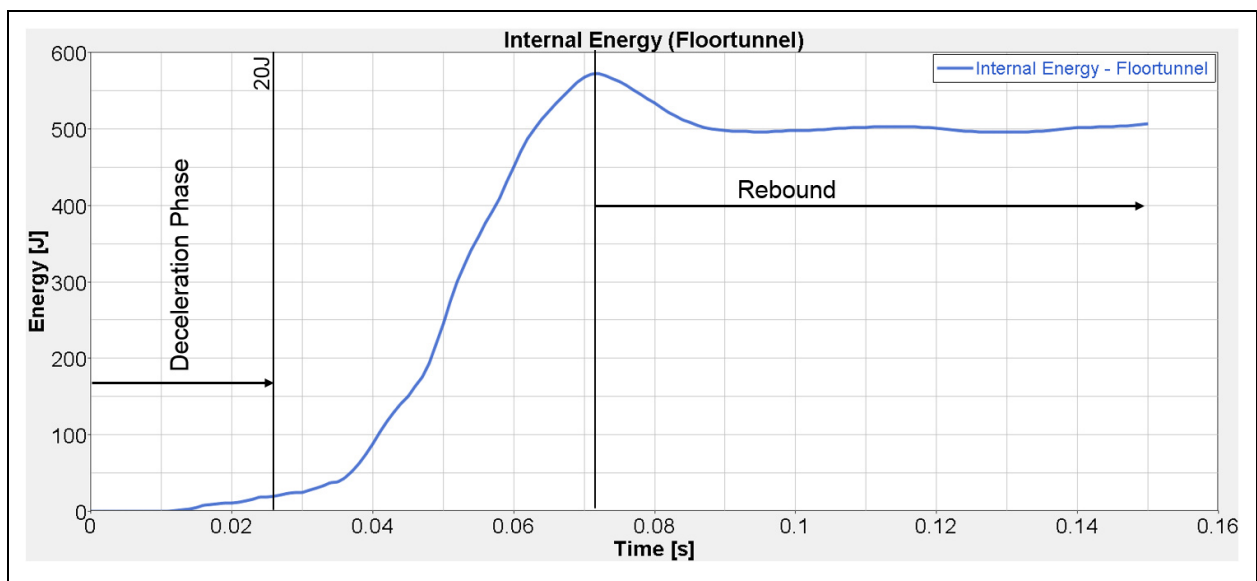


Abbildung 52: „NHTSA-Frontalaufprall mit 40 km/h“ – in den Mitteltunnel eingebrachte Deformationsenergie

Abbildung 53 zeigt die relativen Verformungen (relativ zum Fahrzeug) aller 13 Knotenpunkte über die Zeit. Die maximalen Verformungen betragen bis zu 22mm und treten auch hier wieder in etwa zum gleichen Zeitpunkt auf.

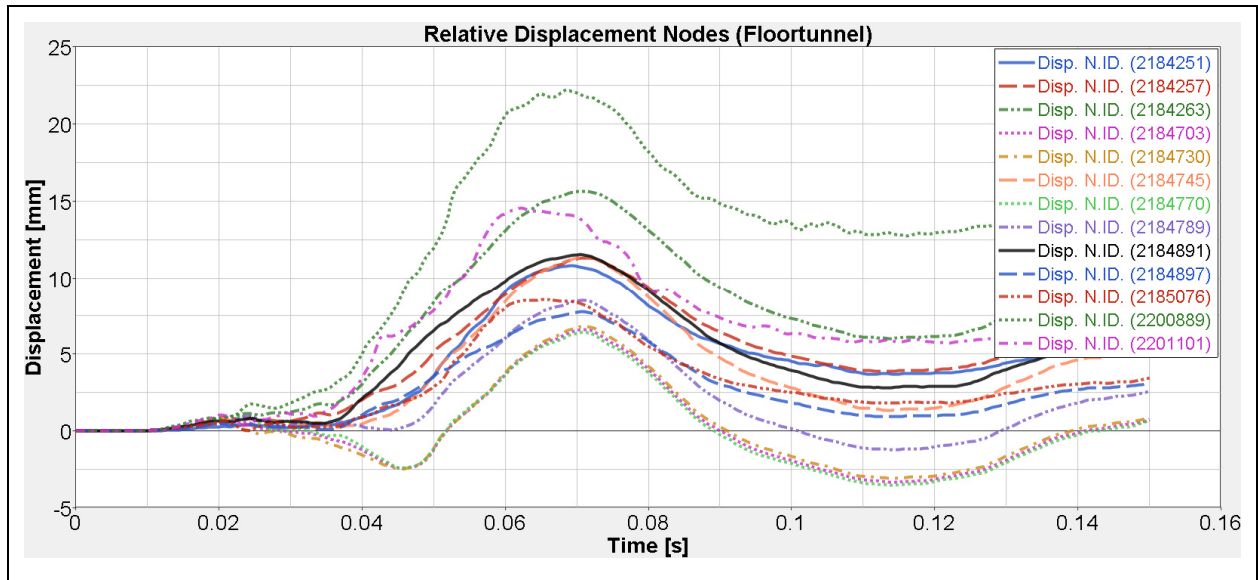


Abbildung 53: „NHTSA-Frontalaufprall mit 40km/h“ – Deformationen der Knotenpunkte

Die Deformationen der Knotenpunkte über die Zeit und zusätzlich über ihre Position in Fahrzeug Y-Richtung sind wiederum in Abbildung 54 dargestellt.

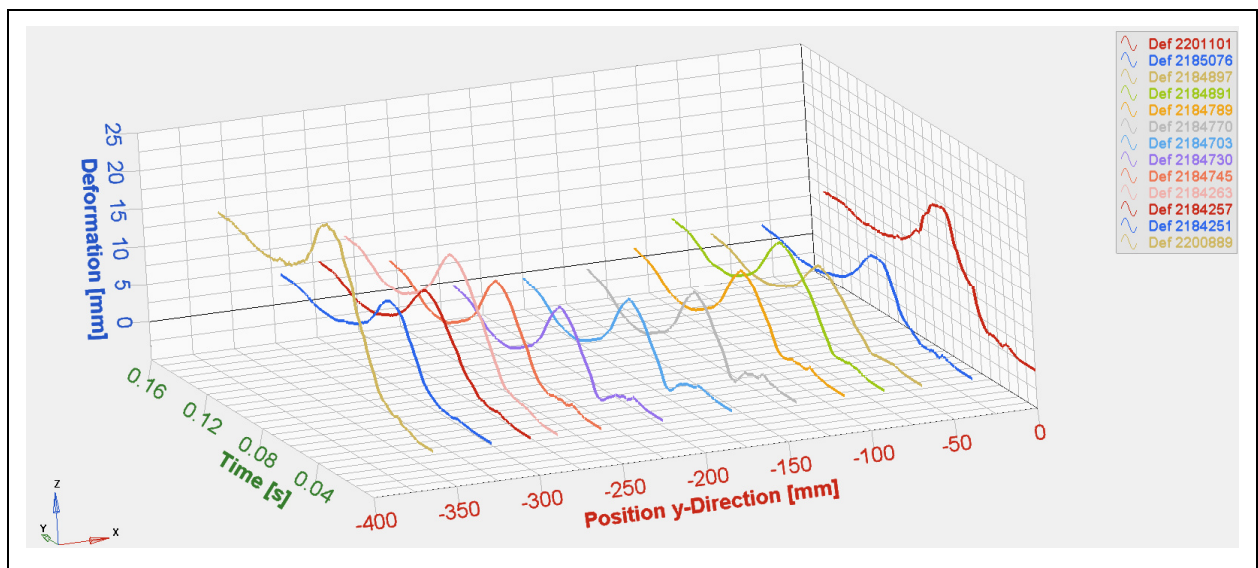


Abbildung 54: „NHTSA-Frontalaufprall mit 40km/h“ – dreidimensionale Darstellung der Deformationen der Knotenpunkte

Das Verformungsbild zum Zeitpunkt des Auftretens der maximalen Verformungen spiegelt die theoretische Impaktorform wieder (siehe Abbildung 56).

Die Geschwindigkeiten der einzelnen Knotenpunkte über die Zeit sind in Abbildung 55 dargestellt. Sie liegen im Bereich von 0.3 bis 1.1m/s.

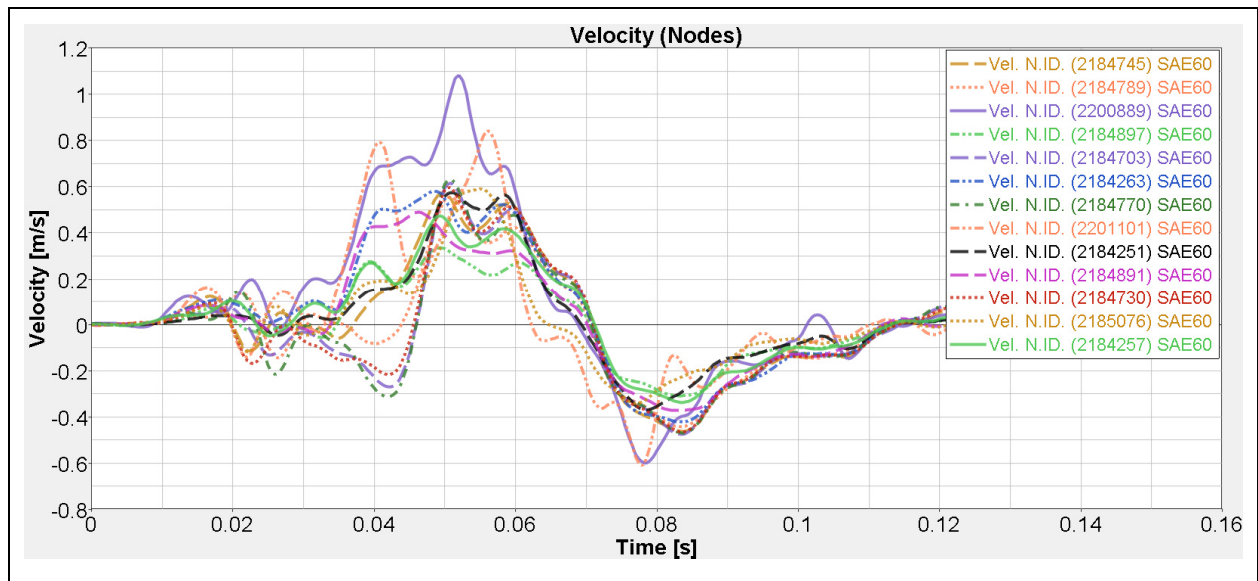


Abbildung 55: „NHTSA-Frontalaufprall mit 40km/h“ – Geschwindigkeiten der Knotenpunkte

Zusammenfassend werden die abgeleiteten Randbedingungen in Tabelle 7 dargestellt.

Randbedingungen	
Eingebrachte Deformationsenergie:	~ 0,6kJ
Deformationsform/ Richtung:	Siehe Abbildung 56/ Fahrzeug X-Richtung
Deformationsgeschwindigkeit:	0.3-1.1m/s

Tabelle 7: Randbedingungen des Lastfalles „Frontalaufprall nach NHTSA 40km/h“

Die theoretische Impaktorform, aus welcher wiederum eine Impaktorgeometrie für einen Modulversuch gewonnen werden kann, ist in Abbildung 56 dargestellt.

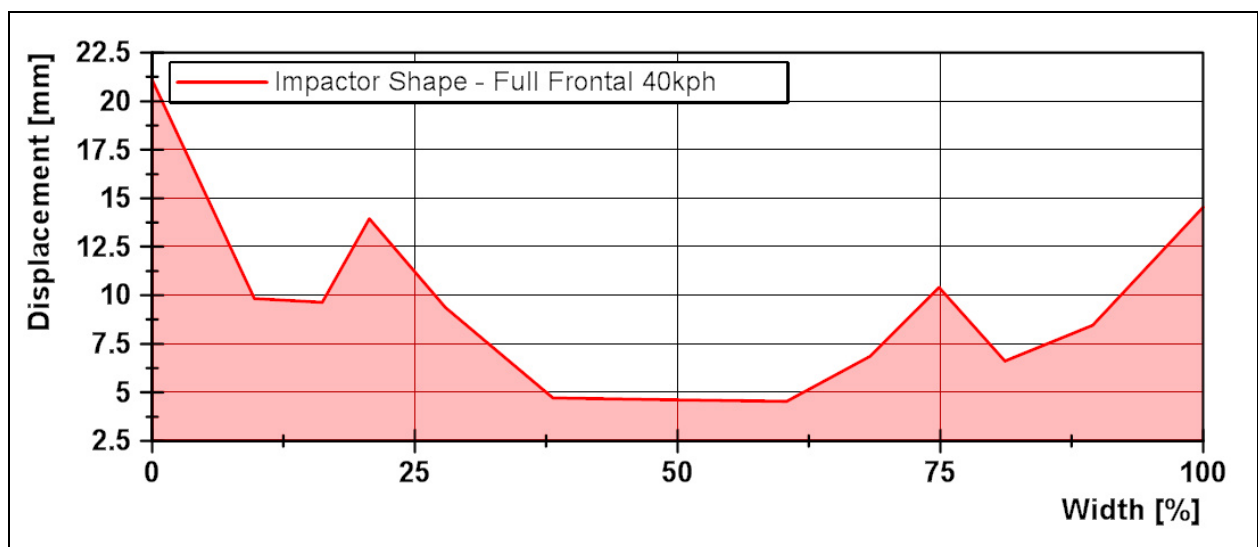


Abbildung 56: Theoretische Impaktorform Lastfall „NHTSA-Frontalaufprall 40km/h“

5.3 Zusammenfassung der abgeleiteten Randbedingungen

In Tabelle 8 sind die Ergebnisse der vier ausgewerteten Gesamtfahrzeugsimulationen dargestellt. Stellvertretend für die Belastungen am Mitteltunnel wurden für jeden Lastfall die drei Randbedingungen Deformationsenergie, Deformationsform und Deformationsgeschwindigkeit ermittelt, mit denen ein energieäquivalenter Modulversuch aufgesetzt werden kann.

Randbedingung Lastfall	Energie	Theoretische Form/ Belastungsrichtung	Geschwindigkeit
Euro-NCAP-Pfahl-Seitenaufprall	1,0kJ	Siehe Abbildung 29/ Fahrzeug-Y	0,6-1,6m/s
Euro-NCAP-Frontalaufprall	1,4kJ	Siehe Abbildung 39/ Fahrzeug-X	0,8-4,9m/s
USNCAP-Frontalaufprall	1,9kJ	Siehe Abbildung 48/ Fahrzeug-X	2,5-5,0m/s
NHTSA-Frontalaufprall	0,6kJ	Siehe Abbildung 56/ Fahrzeug-X	0,3-1,1m/s

Tabelle 8: Ergebnisse aller ausgewerteten Gesamtfahrzeugsimulationen

6 Prüfumgebung

Ausgehend von den Erkenntnissen und Daten der vorangegangenen Kapitel wird im Folgenden die Entwicklung der Prüfumgebung beschrieben.

6.1 Anforderungen

Aus der Analyse von Crashbelastungen, des Gefahrenpotenzials und den Gesamtfahrzeugsimulationen ergaben sich Anforderungen an die Prüfumgebung. Diese galten als Grundanforderungen welche auf jeden Fall erfüllt sein mussten. Um in das Prüfkonzept in Zukunft jedoch weitere – noch nicht betrachtete – Belastungsszenarien mit anderen Fahrzeugen oder EES integrieren zu können, sollte die Prüfumgebung eine noch größere Variabilität diesbezüglich zulassen. Im Folgenden werden die Grundanforderungen zusammengefasst.

Zeitliche Zuordnung und Variabilität von Verzögerungs- und Deformationsphase:

Um reale Belastungen abbilden zu können sollte es möglich sein Beschleunigungen auf das Akkumodul wirken zu lassen bevor, und nicht nur während dieses auf den Impaktor trifft und schließlich deformiert wird. Eine prinzipielle Darstellung des zeitlichen Ablaufs – durch eine Gliederung in drei Phasen – zeigt Abbildung 57. Zunächst bewegt sich das Modul mit konstanter Geschwindigkeit auf den an der starren Crashwand befestigten Impaktor zu (Bewegungsphase). In der Verzögerungsphase wird das Modul abgebremst und den Beschleunigungen (im Idealfall wie bei einem realen Unfall) ausgesetzt. Sobald das Modul auf den Impaktor auftritt, setzt die Deformationsphase ein. Es wird nun verformt und weiter verzögert.

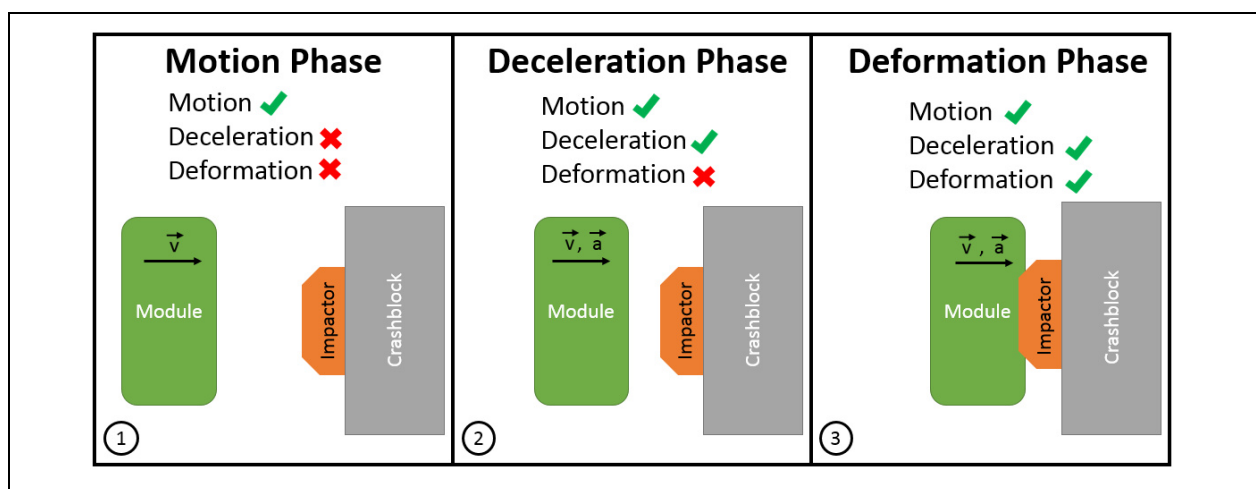


Abbildung 57: Prinzip zur zeitlichen Abfolge des Wirkens von Beschleunigung und Deformation

Energieeintrag in das Akkumodul:

Der mögliche Energieeintrag in das Akkumodul sollte zumindest im Bereich von 0,6-2,0kJ liegen.

Belastung des Moduls in verschiedene Richtungen:

Die Krafteinleitung in das Modul musste von verschiedenen Richtungen aus möglich sein. Die Richtung der Krafteinleitung ist die Richtung der Beschleunigungen die auf das Akkumodul wirken.

Deformationsgeschwindigkeit:

Die Deformationsgeschwindigkeit lag laut den Gesamtfahrzeugsimulationen im Bereich von 0.3-6m/s. Im Versuch musste die Geschwindigkeit mindestens die Werte des jeweiligen Lastfalls erreichen können.

Deformationsform:

Die Deformationsform sollte jener entsprechen, die bei den Gesamtfahrzeugsimulationen ermittelt wurde. Sie ergibt sich individuell für jede Versuchskonfiguration und kann nicht verallgemeinert werden.

Adaption an alternative Testumgebungen:

Im Crashlabor der Technischen Universität Graz sind notwendige Sicherheitseinrichtungen, speziell um geladene Modulversuche durchzuführen, nicht vorhanden. Deshalb bestand die Anforderung den Prüfaufbau so zu planen, dass dieser mit geringem Aufwand an anderen Teststandorten (z.B. ein Freigelände) – welche die notwendigen Schutzmaßnahmen bieten – aufgebaut und in Betrieb genommen werden kann.

6.2 Möglichkeiten der Realisierung einer dynamischen Prüfumgebung

Mit der Forderung, dass die dynamische Prüfumgebung eine zeitliche Zuordnung und Variabilität hinsichtlich Beschleunigungs- als auch Deformationsphase ermöglicht, werden im Folgenden einige Konzepte zur Realisierung einer solchen betrachtet. Die beiden Konzepte der bereits bestehenden Prüfumgebungen des TÜV Süd und der Firma CETECOM wurden ebenfalls bewertet, um die Unterschiede zu den neuen Konzepten zu verdeutlichen.

In Abbildung 58 werden die Möglichkeiten der Modulbelastung mit bestehenden dynamischen Prüfmethode in einem Überblick dargestellt.

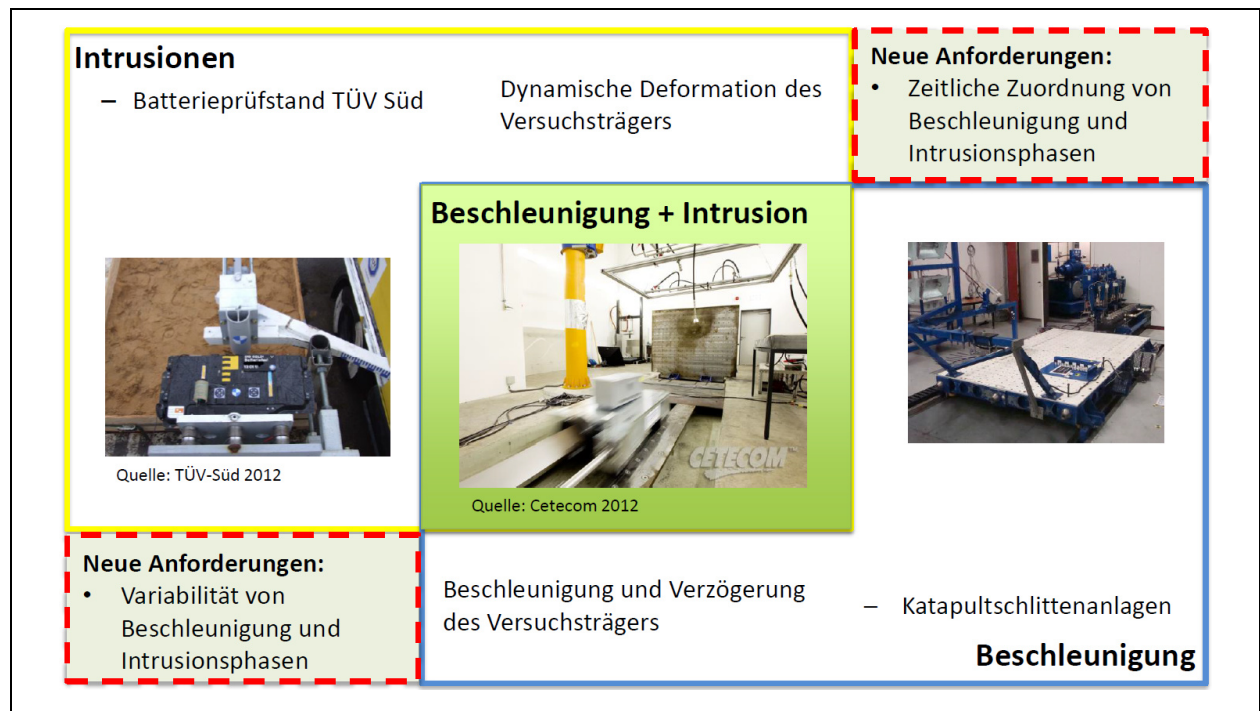


Abbildung 58: Möglichkeiten mit aktuellen Prüfumgebungen und neue Anforderungen [32]

Zu sehen ist, dass zur Zeit sowohl Deformation und Beschleunigung getrennt voneinander als auch kombiniert abbildbar sind. Ebenfalls ersichtlich sind die neuen Anforderungen, die mit diesen Methoden nicht abgebildet werden können. Dazu zählen die zeitliche Zuordnung und die Variabilität der Beschleunigung bzw. Intrusionsphasen.

6.2.1 Konzept 1 – Druckluftzylinder

Der Markt bietet Anlagen mit denen man einen bestimmten Beschleunigungspuls auf ein Objekt wirken lassen kann. Die Funktionsweise eines Systems ist wie folgt: Ein Kolben wird aus einem Druckluftzylinder heraus beschleunigt und kann mittels Bremsen verzögert werden. Wird ein Objekt (z.B. eine Batterie) daran befestigt kann man dieses während der Verzögerungsphase auf ein feststehendes Hindernis (Impaktor) auftreffen lassen. Die zeitliche Zuordnung und die Variabilität von Beschleunigungs- und Deformationsphase sind gegeben. So lassen sich theoretisch mit diesem Konzept Belastungen eines Realunfalls abbilden. In Abbildung 59 ist das Konzept in einer Skizze zu sehen (Blick von oben).

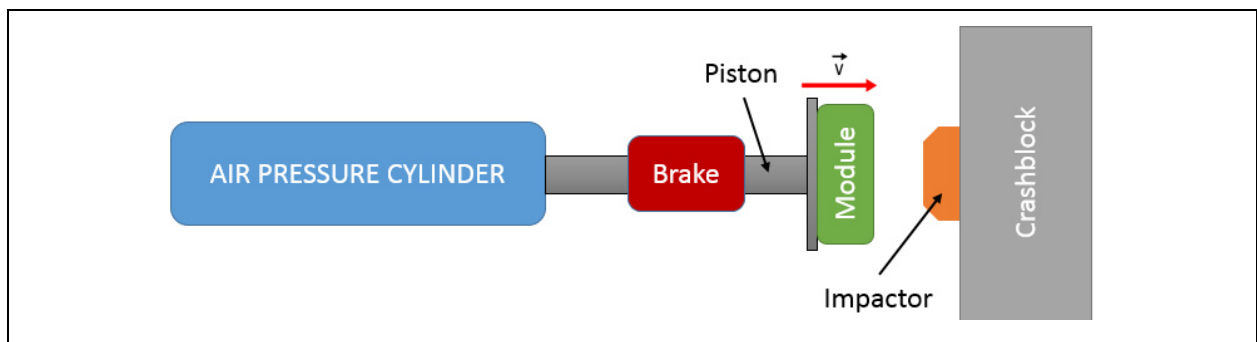


Abbildung 59: Skizze von Konzept 1

Bei dieser Variante ergibt sich der Vorteil, dass durch die hohe bewegte Masse des Kolbens viel Energie vorhanden ist, die im Versuch zur Verfügung steht. Die in den Prüfling eingebrachte Energiemenge kann während des Versuchs mit der Bremse angepasst werden, um einen gewünschten Wert genau zu erreichen. Diese Systeme sind komplex und daher mit hohen Kosten verbunden. Ein großer Nachteil ergibt sich durch die Stoßbelastung auf den Kolben und die Bremse. Diese kann sich negativ auf die Lebensdauer auswirken. Eine weitere Einschränkung besteht dadurch, dass solche Anlagen viel Platz beanspruchen und üblicherweise nur als Indoor Anlagen umgesetzt sind. Aus diesen Gründen ist eine Adaption dieses Systems an alternative Teststandorte nur mit sehr großem Aufwand umzusetzen.

6.2.2 Konzept 2 – Wagen geführt

Ein Akkumodul kann vorne an einem kleinen Stoßwagen (ähnlich jenen wie sie beispielsweise bei Crashtests für Seiten- oder Heckaufprallversuche verwendet werden, jedoch kleiner und leichter) montiert werden. Dieser Wagen kann in einer herkömmlichen Crashanlage auf die gewünschte Geschwindigkeit beschleunigt werden und am Ende der Anlaufstrecke durch eine Bremseinrichtung wieder verzögert werden.

Es wirken dadurch Verzögerungen auf den EES. Ist die Bremseinrichtung variabel und so ausgelegt, dass während des Verzögerungsvorgangs das Akkumodul mit einem Impaktor in Berührung tritt, so ist die Forderung nach zeitlicher Zuordnung und der Variabilität bei Verzögerungs- und Deformationsphase auch hier erfüllt. Das Konzept ist in Abbildung 60 dargestellt.

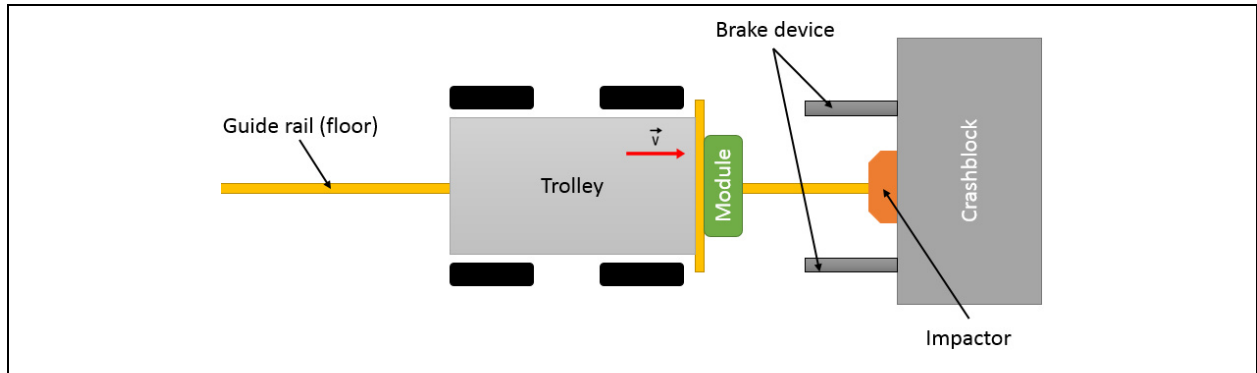


Abbildung 60: Skizze von Konzept 2

Der Wagen kann beispielsweise in einer Schiene (gelb) geführt werden um sein Ziel mit ausreichender Genauigkeit zu treffen. Ein Nachteil dieser Variante ist der hohe Platzbedarf, der sich durch die Länge der Anlaufspur ergibt. Die Energiemenge welche in den Prüfling (z.B. Akkumodul) fließt kann nicht – wie bei Konzept 1 – während des Versuchs reguliert werden. Am Institut für Fahrzeugsicherheit steht ein kleiner und leichter Stoßwagen zur Verfügung welcher sich für die Umsetzung dieses Konzeptes anbietet. Die Gesamtkosten eines Versuchs halten sich durch den einfachen Aufbau somit in einem überschaubaren Bereich. Flexibilität bei der Integration verschiedenster Lastfälle und Typen von EES ist ebenfalls gegeben. Aufgrund des geringen Aufwandes der für den Aufbau eines solchen Konzeptes notwendig ist, besteht die Möglichkeit der schnellen Adaptierung an verschiedene Craschanlagen (zum Beispiel ein Freigelände für Versuche mit geladenen Akkumodulen).

6.2.3 Konzept 3 – Schienen-Schlitten-System

Ein solches Schienensystem kann entlang der Anlaufspur einer herkömmlichen Craschanlage aufgebaut werden. Der Aufwand zur Installation eines solchen Systems ist überschaubar. Die Systeme sind teuer, bieten aber eine besonders exakte Führung. Die Reproduzierbarkeit von Versuchen kann dadurch theoretisch erhöht werden. Problematisch könnte jedoch ein Verkeilen des Schlittens in den Schienen bei ungleichmäßiger Belastung sein. Die Messergebnisse könnten verfälscht und die Führungsschlitten durch Stoßbelastung beschädigt werden. In Abbildung 61 ist das Konzept mit Blick von oben dargestellt.

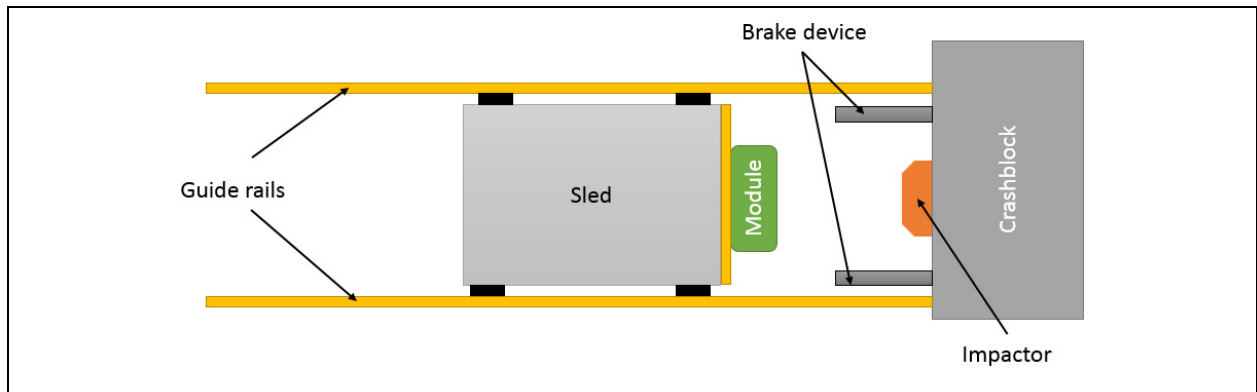


Abbildung 61: Skizze von Konzept 3

Das Akkumodul kann auf dem Schlitten montiert werden. Dieser kann, gleich wie bei Konzept 2, nach Erreichen der gewünschten Geschwindigkeit mittels Bremseinrichtung schon vor dem Aufprall des Akkumoduls auf das Hindernis verzögert werden. Ein Nachteil ist jedoch, dass im Gegensatz zu Konzept 1, die Energiemenge, welche in den Prüfling (z.B. Akkumodul) geleitet wird, während des Versuchs nicht mehr geändert werden kann. Für die Beschleunigung des Schlittens wäre ein zusätzliches System notwendig. Der Aufwand zur Durchführung eines Versuchs mit einem solchen System im Crashlabor der Technischen Universität Graz wäre größer als beispielweise bei Konzept 2. Versuche an alternativen Teststandorten – ein dafür geeignetes Testgelände vorausgesetzt – sollten ebenfalls kein Hindernis darstellen.

6.2.4 Konzept 4 – Methode nach TÜV Süd

In Kapitel 2.1 wurde bereits die Funktionsweise der Prüfumgebung des TÜV Süd beschrieben. Mit der Methode ist es möglich Beschleunigungen und Deformation gleichzeitig wirken zu lassen. Es ist jedoch keine zeitliche Zuordnung und Variabilität des Beschleunigungspulses möglich, weil keine Bremseinrichtung vorhanden ist, um das Modul schon vor dem Aufprall auf den Impaktor zu verzögern. Bei diesem System muss angezweifelt werden ob eine ausreichende Reproduzierbarkeit des Versuchs gegeben ist. Der LKW wird zwar automatisiert gesteuert, die Regelstrecke ist aber sehr träge. Das Fahrzeug könnte zudem während des Anfahrens durch Wind oder Bodenunebenheiten ins Wanken geraten. Schon eine kleine Bewegung des Fahrzeugs könnte eine Abweichung von mehreren Zentimetern beim Auftreffen des Moduls auf den Impaktor (bzw. Impaktor auf Modul) bedeuten. Das Konzept bietet keine fixe Führung bis zum Aufprall wodurch es im freien Flug zusätzlich zu einer Bewegung des Prüfobjektes kommen kann. Nach dem Crash würde das Prüfobjekt unkontrolliert vom Impaktor abprallen. Dies kann die Umgebung und die Messtechnik gefährden. Die dabei auftretenden unkontrollierten Belastungen stellen zudem keine realen Bedingungen dar. Versuche werden mit diesem Konzept im Freien durchgeführt.

6.2.5 Konzept 5 – Methode der Firma Cetecom

Abbildung 9 (siehe Kapitel 2.2) zeigt einen dynamischen Batterietest der Firma CETECOM. Über die Funktion und den Ablauf von Versuchen mit dieser Anlage gibt es nur wenige öffentlich zugängliche Informationen.

Für Batterietests steht eine eigene Crashbahn zur Verfügung, die offensichtlich mit einem Schlittensystem (ähnlich Konzept 1) ausgestattet ist. Damit können hohe Beschleunigungen realisiert werden. Akkumodule können auf diesen Schlitten aufgelegt und beschleunigt werden. Anschließend werden sie durch Abbremsen dieses Schlittens gegen die Crashwand geschleudert. Das Modul ist bei dieser Methode nicht geführt, was eine Reproduzierbarkeit der Versuche schwierig gestaltet. Aus der Abbildung und den wenigen vorhandenen Informationen können keine Rückschlüsse gezogen werden, ob auf die Module eine bestimmte Deformationsform aufgebracht werden kann. Das Modul wird aller Wahrscheinlichkeit nach vor dem Aufprall nicht verzögert. Eine zeitliche Zuordnung von Beschleunigungs- und Deformationsphase ist daher nicht möglich. Mit der gleichen Einschränkung wie bei der Methode des TÜV Süd können damit aber Beschleunigungen und Deformationen (während des Aufpralles) gleichzeitig abgebildet werden. Die Prüflinge werden beim Test unkontrolliert von der Wand abprallen und zu Boden fallen, was bedeutet, dass nach dem eigentlichen Versuch unkontrollierte nicht-reale Belastungen auf den Energiespeicher wirken und eine Gefahr für die Umgebung und Messtechnik bestehen kann. Die Notwendigkeit der Adaptierung an andere Testgelände besteht mit dem Gesamtsystem der Firma CETECOM nicht, da die Crashhalle mit den notwendigen Sicherheitsvorkehrungen ausgestattet ist um Modulversuche sicher durchzuführen.

6.3 Gewähltes Konzept

Um ein geeignetes Konzept für den hier betrachteten Anwendungszweck auszuwählen wurde eine subjektive Bewertung der verschiedenen Konzepte anhand einiger wichtiger Kriterien durchgeführt. Das Ergebnis dieser Bewertung ist in Tabelle 9 dargestellt.

	Luftdruckzylinder mit Bremse	Wagen geführt	Schlittenanlage	TÜV Süd	Cetecom
Abbildung beliebiger Lastsituationen	3	3	3	2	2
Führung (Freiheitsgrade)	3	2	3	0	0
Adaption an alternative Testumgebung	1	3	2	3	–
Komplexität	1	3	2	2	1
Reproduzierbarkeit	3	2	3	1	1
Kosten	1	3	2	2	1
Durchschnittliche Punkteanzahl	2,0	2,7	2,5	1,7	1,0
Platzierung	3	1	2	4	5

Bewertungsskala:

3	gut (3 Punkte)
2	mittel (2 Punkte)
1	schlecht (1 Punkt)
0	nicht möglich (0 Punkte)
–	nicht bewertet (–)

Tabelle 9: Subjektive Bewertung der Konzepte

Aus der Bewertung geht hervor, dass das Konzept „Wagen geführt“ die Kriterien – für die Umsetzung der Prüfumgebung am Institut für Fahrzeugsicherheit der Technischen Universität Graz – am besten erfüllt. Es ist ein einfaches System welches mit vergleichsweise geringen Mitteln verwirklicht werden konnte, weil am Institut für Fahrzeugsicherheit eine für die Umsetzung notwendige Crashanlage und ein kleiner und leichter Stoßwagen (~ 350kg) zur Verfügung stand. Für Versuche mit geladenen Akkumodulen bestand die Möglichkeit auf ein Freigelände auszuweichen. Es war also von geringen Zusatzkosten für die Planung der Prüfumgebung auszugehen. Die Reproduzierbarkeit von Versuchen mit diesem Konzept wurde als ausreichend erachtet, wenngleich andere Konzepte eine höhere Genauigkeit bieten. Aufgrund der Verwendung einer Bremseinrichtung ist es, wie auch bei den Konzepten auf den Platzierungen zwei und drei möglich, reale Belastungsszenarien zu realisieren. Dadurch entsteht außerdem eine zusätzliche Flexibilität bei Parametern wie Beschleunigungspuls und Energieeintrag in das Akkumodul.

Im Vergleich zum TÜV Süd und der Firma Cetecom ergeben sich dadurch große Vorteile. Diese Systeme sind nicht so flexibel und es können nur bedingt reale Belastungen aufgebracht werden, da Verzögerungen am Modul erst während des Deformierens wirken und nicht wie beim Realunfallszenario schon davor.

6.3.1 Prüfablauf

In Abbildung 62 ist der prinzipielle Versuchsablauf mit Blick von oben schematisch dargestellt. Am Stoßwagen (grau) ist eine in Gelb dargestellte Aufspannplatte und ein in Blau dargestelltes Hochvoltbatteriemodul befestigt. An der Crashwand (rechts in den Bildern in Grau dargestellt) sind die Bremseinrichtung (rot) und der Impaktor mit Kraftmessdose montiert.

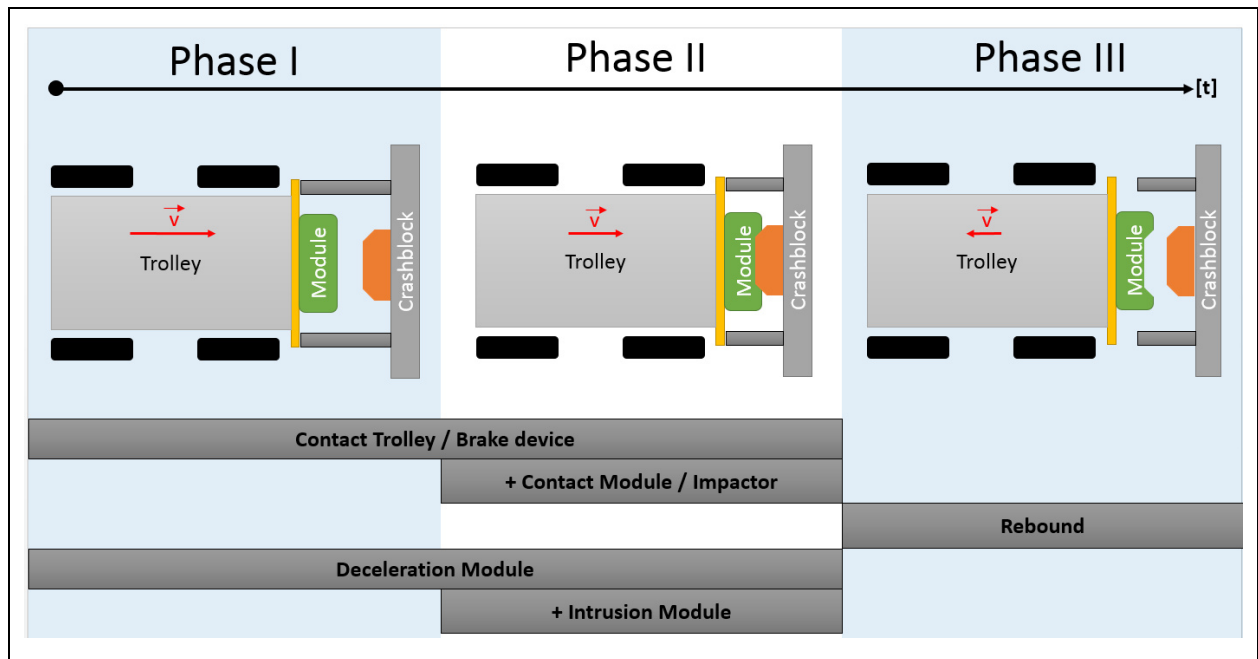


Abbildung 62: Zeitlicher Ablauf des Versuchskonzeptes

Der Versuchsablauf kann in drei Phasen eingeteilt werden:

- Phase 1: Der Stoßwagen mit dem Akkumodul trifft nach dem Erreichen der gewünschten Geschwindigkeit (z.B. durch Seilzug-Schlittenanlage) auf die Bremseinrichtung. Das bewirkt eine Verzögerung des gesamten Wagens und somit auch des Akkumoduls. Durch Variieren der Bremseinrichtung kann dieser Beschleunigungspuls je nach Wunsch angepasst werden.
- Phase 2: In Phase zwei kommt es zusätzlich zum Kontakt Stoßwagen/ Bremseinrichtung zum Eingriff zwischen Akkumodul und Impaktor. In dieser Phase wirken also Verzögerungen und Deformation gleichzeitig.
- Phase 3: Die Deformation am Akkumodul hat ihren Maximalwert erreicht und die Geschwindigkeit des Stoßwagens beträgt für einen kurzen Augenblick gleich Null. Dann kommt es zum sogenannten „Rebound“, dem Zurückfedern des Wagens.

6.3.2 Energieeintrag in das Akkumodul

Die insgesamt vorhandene kinetische Energie E_{Tot} berechnet sich nach Formel 1. Dabei bezeichnet m die Masse des Stoßwagens mit Modul und v die Geschwindigkeit vor dem Aufprall.

$$E_{Tot} = m \cdot \frac{v^2}{2}$$

Formel 1: Berechnung der gesamten kinetischen Energie

Ein Teil der Gesamtenergie E_{Tot} fließt in die Bremseinrichtung (Bremsenergie E_{Br}), der Rest als Deformationsenergie E_{Def} in das Akkumodul. Die Verteilung dieser Energieströme ist in Abbildung 63 schematisch dargestellt.

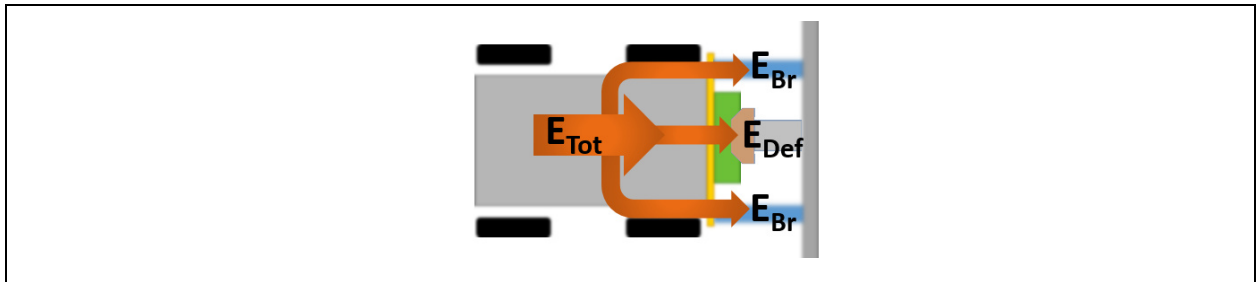


Abbildung 63: Aufteilung der kinetischen Energie in Bremsenergie und Deformationsenergie

In der Bremseinrichtung (verformbar) und beim Verformen des Akkumoduls wird Arbeit verrichtet und somit die kinetische Energie des Stoßwagens absorbiert. Durch Integration der Kraft-Weg-Kurven, die aus den Versuchen abgeleitet werden können, kann die in das Akkumodul eingebrachte Energie berechnet werden.

Durch Verändern folgender Parameter kann der Betrag dieser Energiemenge verändert werden:

- **Masse des Stoßwagens:** Wenig Spielraum, da dieser den Belastungen des Aufpralls standhalten muss. Ein Mindestgewicht ist durch den vorhandenen Stoßwagen gegeben. Dieses könnte durch Leichtbauweise gesenkt werden.
- **Geschwindigkeit:** Die Geschwindigkeit ist nur durch die Leistungsfähigkeit der jeweiligen Crashanlage beschränkt.
- **Bremseinrichtung:** Sehr großer Spielraum – die Deformationsenergie und die Beschleunigungen, die auf das Modul einwirken, können damit beinahe stufenlos eingestellt werden.

6.4 Prüfaufbau und Komponenten

Die Konstruktion des Versuchsaufbaus wurde so einfach wie möglich gehalten, um eine schnelle Anpassung an verschiedene Konfigurationen zu gewährleisten und um die Kosten in Grenzen zu halten. In diesem Kapitel wird auf die wichtigsten Elemente des Prüfaufbaus eingegangen. In Abbildung 64 ist ein CAD-Modell des grundsätzlichen Prüfaufbaus dargestellt. Die wichtigsten Komponenten sind beschriftet.

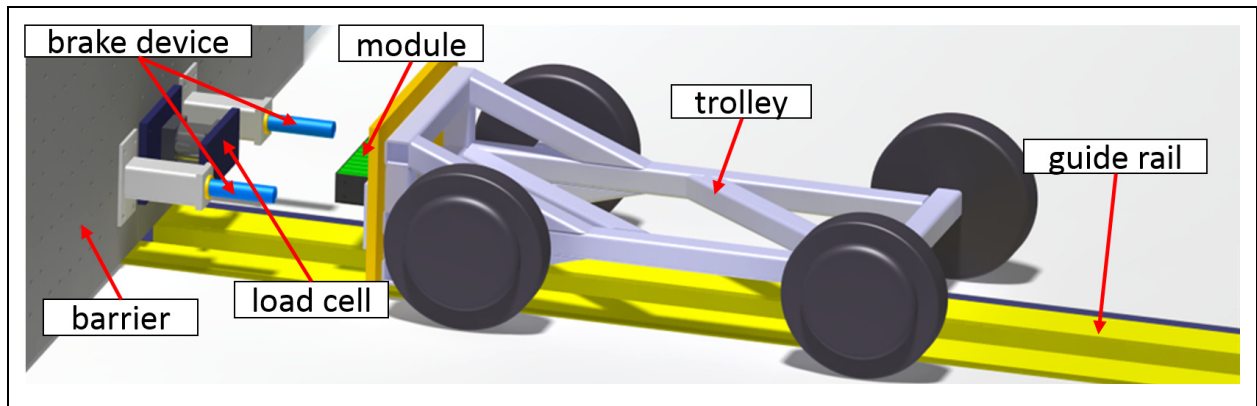


Abbildung 64: CAD-Modell des grundsätzlichen Prüfaufbaus ohne Impaktor

Es ist kein Impaktor abgebildet, da dessen Form lastfallspezifisch ist und in Kapitel 7 gezeigt wird. Die übrigen Komponenten werden in diesem Kapitel näher beschrieben. Das Akkumodul ist in Grün dargestellt und am Stoßwagen an einer Adapterplatte befestigt.

6.4.1 Stoßwagen

Abbildung 65 zeigt den für die Versuche eingesetzten Stoßwagen.

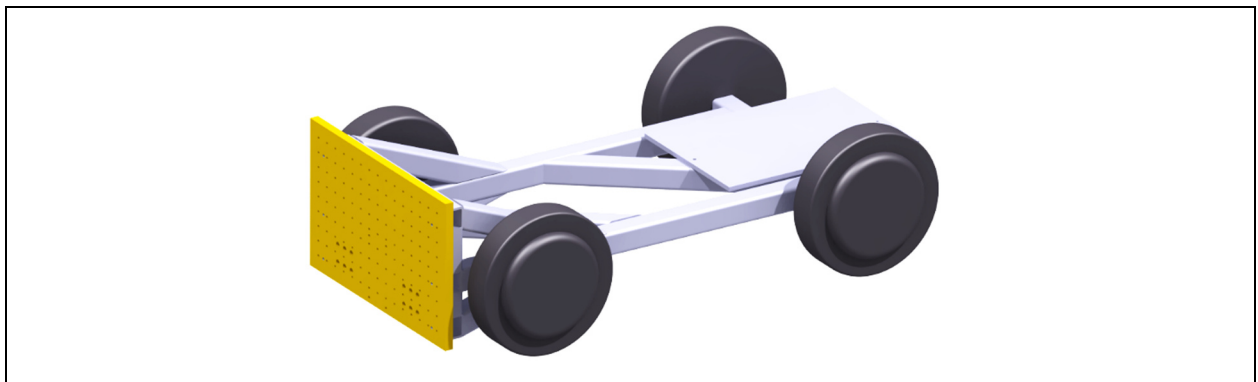


Abbildung 65: CAD-Modell des verwendeten Stoßwagens

Das Grundgerüst des Wagens besteht aus einer Schweißkonstruktion mit Hohlprofilen aus Stahl. Vier PKW-Notlaufräder sorgen für einen ruhigen Geradeauslauf. Die

Aufspannplatte ist in Gelb dargestellt und mit einem Bohrungsmuster versehen um verschiedene Komponenten (z.B. eine Adapterplatte für ein Akkumodul) daran befestigen zu können. Dieser Stoßwagen war am Institut für Fahrzeugsicherheit vorhanden und ist für den Nachweis der Durchführbarkeit von Modulversuchen mit realen Belastungen gut geeignet. In Tabelle 10 sind die wichtigsten technischen Daten des Wagens zusammengefasst.

Technische Daten	
Gesamtlänge	1749mm
Breite	1060mm
Höhe	550mm
Leergewicht	ca. 360kg

Tabelle 10: Technische Daten des Stoßwagens

Um das Hindernis (Impaktor) möglichst exakt zu treffen, ist der Stoßwagen mittels Bolzen aus Stahl in einem Schienensystem, in welches eine Seilzuganlage zur Beschleunigung des Stoßwagens integriert ist, im Boden geführt. So sind nur geringe Bewegungen in Y-Richtung ($\pm 2,5\text{mm}$) möglich.

6.4.2 Aufbauten an der Barriere

In Abbildung 66 sind die Aufbauten an der Barriere (Crashwand) dargestellt. An ihr werden außen die zwei Aufnahmen für die Bremseinrichtungen und mittig ein Kraftmesselement angebracht.

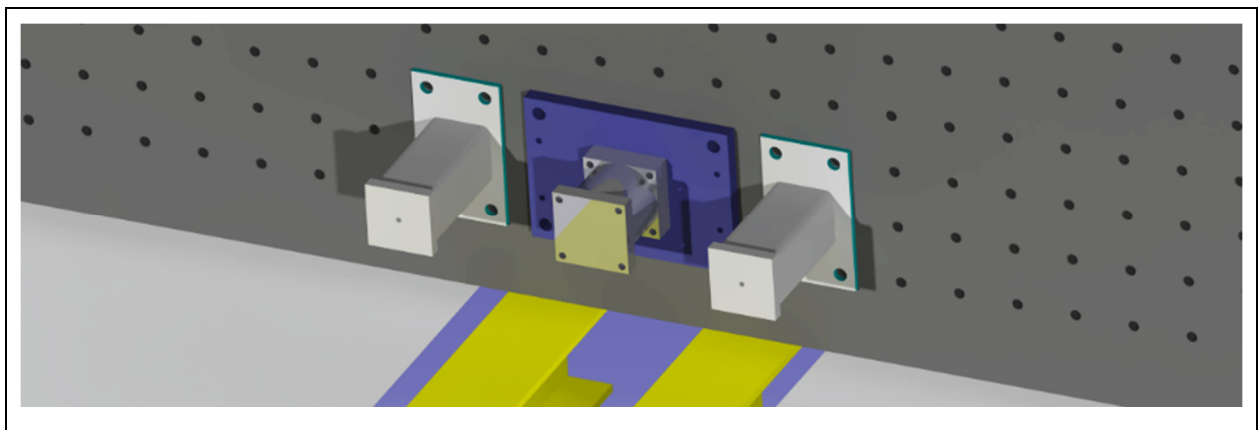


Abbildung 66: Komponenten an der Crashwand

Die Komponenten wurden getrennt voneinander an der Barriere befestigt, um die Übertragung von Schwingungen von der Bremseinrichtung auf das Kraftmesselement zu minimieren. An der Kraftmessdose wird ein Impaktor montiert, auf den das Akkumodul im Versuch auftrifft. Für die Realisierung der Bremseinrichtung bieten sich verschiedene Möglichkeiten an, welche im folgenden Kapitel beschrieben werden.

6.4.3 Bremseinrichtung

Die Bremseinrichtung stellt ein besonders wichtiges Element dieses Prüfkonzeptes dar. Sie ermöglicht eine Variation des Beschleunigungspulses der auf das Akkumodul vor dem Auftreffen auf den Impaktor wirken soll. Durch sie kann außerdem mitbestimmt werden welcher Anteil der gesamten Versuchsenergie in das Akkumodul fließt. Die korrekte Auslegung der Bremseinrichtung hat somit eine große Bedeutung.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten eine solche Bremseinrichtung zu realisieren. In diesem Kapitel wird zunächst die Verzögerung des Crashwagens mittels Stauchrohren aus Stahl beschrieben, wie sie in der ersten von zwei Versuchsreihen am Institut für Fahrzeugsicherheit Anwendung fanden (in Abbildung 64 in blau dargestellt). Infolgedessen wird auf eine weitere, für eine zweite Versuchsreihe verbesserte, Möglichkeit die Bremseinrichtung zu verwirklichen, eingegangen. Es handelt sich dabei um Aluminium-Honigwabenstrukturen. Eine andere Möglichkeit wäre, eine hydraulische Bremse umzusetzen.

Stauchrohr aus Stahl:

Eine sehr einfache Möglichkeit eine Bremseinrichtung zu realisieren ist ein sogenanntes „Stauchrohr“. Solche Stauchrohre werden als Energieabsorber in verschiedenen Crashanwendungen eingesetzt. Sie werden aus normalgeglühtem Stahl gefertigt und bieten für den hier geforderten Einsatzzweck Vor- und Nachteile, die an dieser Stelle erläutert werden. Der größte Vorteil ist, dass sie eine sehr einfache und kostengünstige Lösung darstellen und schnell verfügbar sind. Zudem waren bereits Erfahrungswerte im Umgang mit diesem System am Institut für Fahrzeugsicherheit vorhanden.

Beim Crash werden die Rohre längs gestaucht und durch die Verformung wird Energie absorbiert. Ein solches gestauchtes Rohr ist in Abbildung 67 dargestellt.



Abbildung 67: Stauchrohr aus Stahl nach einem Versuch

Durch Variation des Durchmessers und der Wandstärke lassen sich relativ einfach das Kraftniveau und somit auch die Höhe der Verzögerungswerte beeinflussen. Bei dieser Variante einer Bremsvorrichtung treten jedoch auch Nachteile auf. In Abbildung 67 ist zu sehen, dass sich das Rohr beim Stauchen in sich zusammenfaltet. Dadurch ergibt sich ein sehr stark schwankendes Kraftniveau während des Verformens was zu einer ruckartigen Abbremsung führt. Ein solcher Kraft-Weg-Verlauf wurde beispielhaft in Abbildung 68 dargestellt (aufgezeichnet am Institut für Fahrzeugsicherheit an der Technischen Universität Graz).

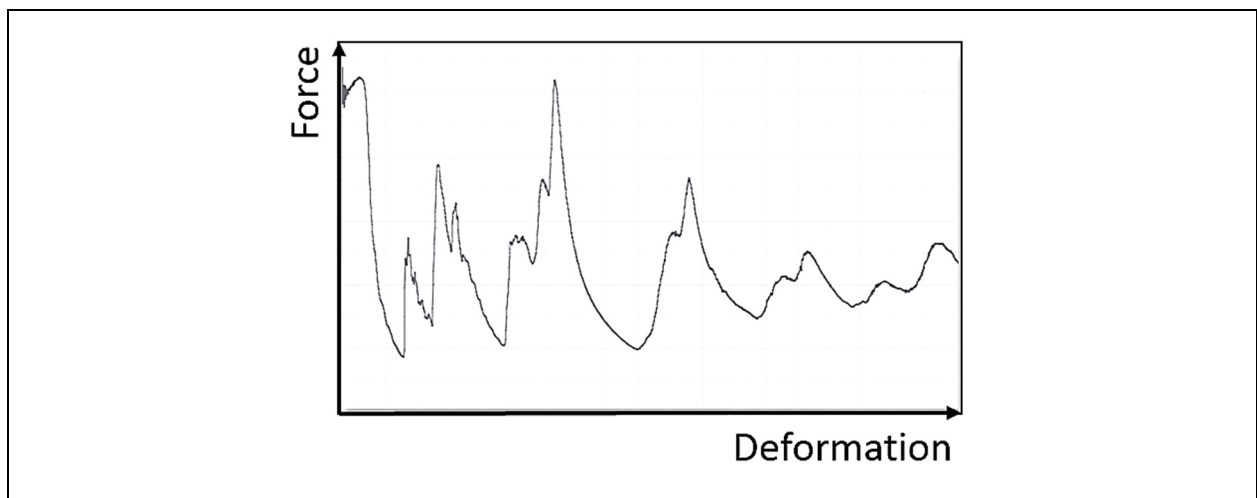


Abbildung 68: Typischer Kraft-Weg-Verlauf eines Stauchrohres aus Stahl

Kurz vor der Bildung einer neuen Falte ist das Kraftniveau jeweils sehr hoch. Beim Falten selbst sinkt die Kraft wieder auf ein niedrigeres Niveau. Dieses Verhalten ist vergleichbar mit jenem eines Stabs der unter Last ausknickt. Durch diese Unregelmäßigkeit variieren auch die Beschleunigungswerte auf den Stoßwagen und somit auch auf das Akkumodul. Ein Nachteil ist, dass das Faltpattern und somit der Kraftverlauf von Rohr zu Rohr variieren kann. Optimal für Simulation und Versuch wäre ein möglichst reproduzierbares Kraftniveau während des Verformens. Die Stauchrohre sollten vor dem Versuch mithilfe einer hydraulischen Presse um wenige Millimeter vorgestaucht werden, um eine besonders hohe Beschleunigungsspitze beim Erstkontakt zu vermeiden. Durch das Vorstauchen wird die erste Falte „vorbereitet“ und der Erstkontakt fällt sanfter aus.

Aluminium Honigwabenstruktur:

Eine alternative Möglichkeit die Bremseinrichtung zu realisieren sind Aluminium-Honigwabenstrukturen. Ein solches Wabenelement ist in Abbildung 69 dargestellt.

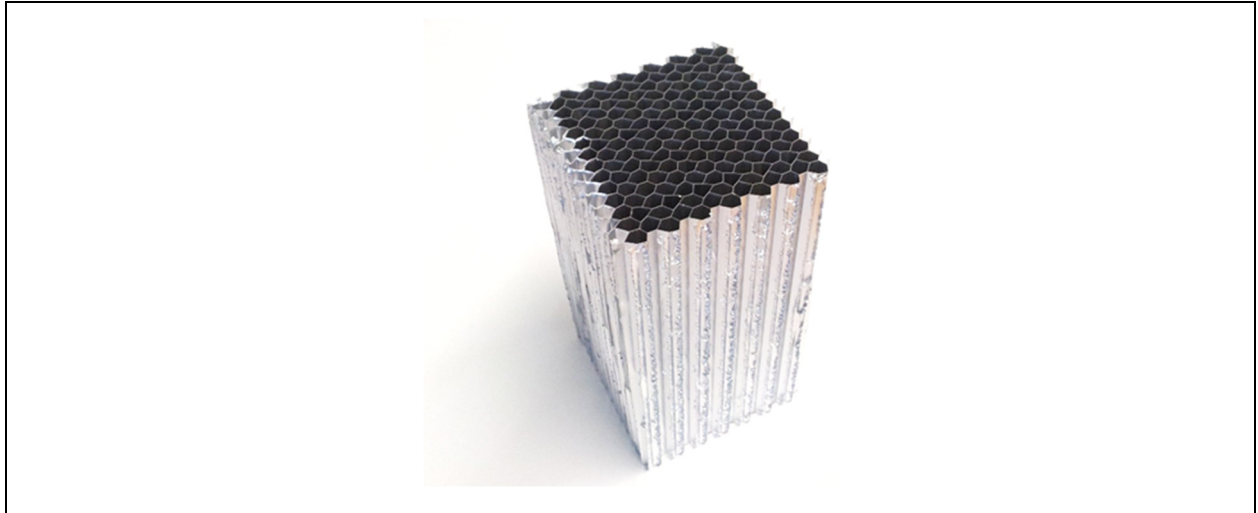


Abbildung 69: Aluminium-Honigwabenstruktur in Blockform

Diese können in längliche Blöcke zugeschnitten werden und haben die positive Eigenschaft während des Verformens ein annähernd konstantes Kraftniveau zu besitzen. Dieser reproduzierbare Kraftverlauf ermöglicht ein sehr zuverlässiges und genaues Simulationsmodell der Bremseinrichtung. Zudem ergibt sich beim Verzögern mit diesem System eine sehr konstante Beschleunigungsphase. Die Wabenelemente müssen ebenfalls um einige Millimeter vorgestaucht werden, damit eine wie bei den Stauchrohren auftretende Beschleunigungsspitze beim Erstkontakt vermieden wird. Das Kraftniveau ist noch leichter als bei den Stahlrohren durch das Variieren der Grundfläche zu ändern. Die sogenannte „Crush-Strength“ – also jene Druckkraft die zum Verformen notwendig ist – wird vom Hersteller angegeben. Dabei gibt es nur geringe Unterschiede zwischen quasi-statischer (sehr langsamer) und dynamischer (sehr schneller) Verformung. Bei der dynamischen Verformung liegt die „Crush-Strength“ in etwa 10 Prozent über der quasi-statischen. Es ist bei der Verwendung von solchen Wabenelementen darauf zu achten, dass Löcher in der Aufnahme vorgesehen werden. Eine Wabenstruktur dichtet, aufgrund der zahlreichen Trennwände, besser ab als ein Stauchrohr, welches nur eine Kammer aufweist. Die Luft kann also nicht so schnell entweichen und es würde zu einer „Luftfeder“ durch den sich aufbauenden Luftdruck kommen.

In Abbildung 70 ist der typische Kraftverlauf eines Aluminiumwabenelements dargestellt. Gut zu erkennen ist die bereits angesprochene Beschleunigungsspitze zu Beginn der Verformung. Der Vorteil des konstanten Kraftverlaufs von Aluminiumwaben wird durch den Vergleich mit dem Kraft-Weg Diagramm eines Stauchrohres deutlich (siehe Abbildung 68).

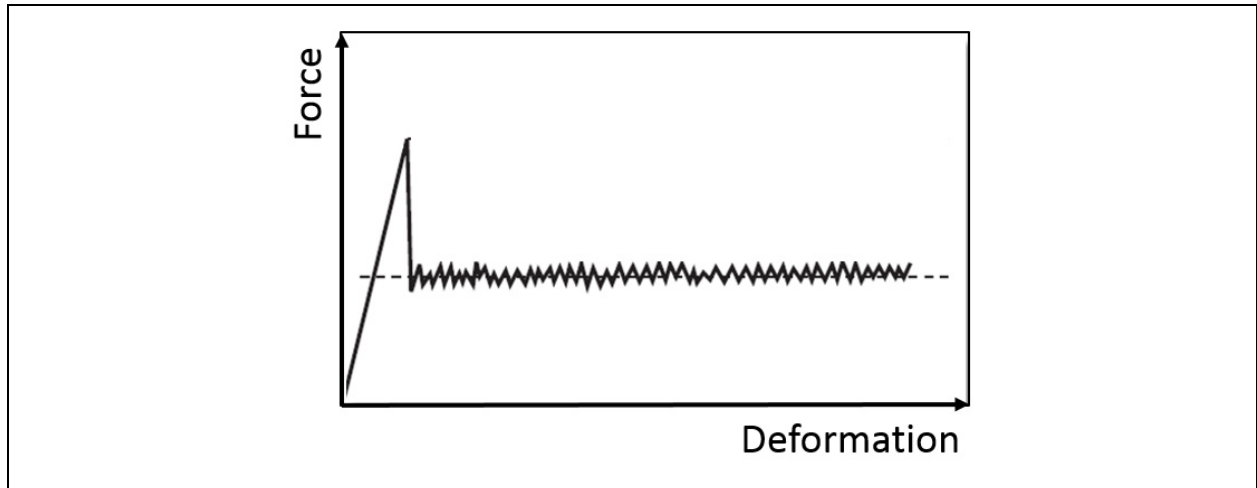


Abbildung 70: Typischer Kraft-Weg-Verlauf einer Aluminium-Honigwabe [33]

Eine Wabenstruktur bildet beim Stauchen ebenso Falten. Weil diese aber aus vielen kleinen Kammern besteht, deren Wände abwechselnd in kurz aufeinanderfolgenden Abständen einknicken, fällt die Schwankung des Kraft-Weg-Verlaufes um ein Vielfaches geringer aus. Es wird so ein annähernd konstantes Niveau über den Verformungsweg erreicht.

Die bei diesem Projekt eingesetzten Wabenelemente stammen vom Hersteller Cellbond. Aufgrund des aufwendigen Herstellverfahrens sind diese Wabenelemente wesentlich teurer als die Lösung mit Stauchrohren. Die Vorteile für diesen Anwendungszweck überwiegen jedoch und deshalb wurde diese Variante bei der zweiten Versuchsreihe herangezogen.

6.4.4 Positionierung derameratechnik

Für die Dokumentation und Auswertung der Versuche sind fünf Kameras vorgesehen. Vier dieser Kameras sind Hochgeschwindigkeitskameras welche mehr als 100000 Bilder pro Sekunde (je nach eingestellter Auflösung) aufnehmen können, um möglichst genaue Daten für die Auswertung zu gewinnen und um den Versuch zu dokumentieren. In Abbildung 71 ist die Positionierung der Kameras von oben dargestellt. Kamera 1 nimmt nur einen kleinen Bildausschnitt auf und wird für die Wegmessung verwendet. Sie nimmt 10000 Bilder pro Sekunde auf. Dieser Wert ist notwendig um Weg-Zeit-Kurven mit der nötigen feinen Auflösung zu erhalten (siehe Kapitel 6.5).

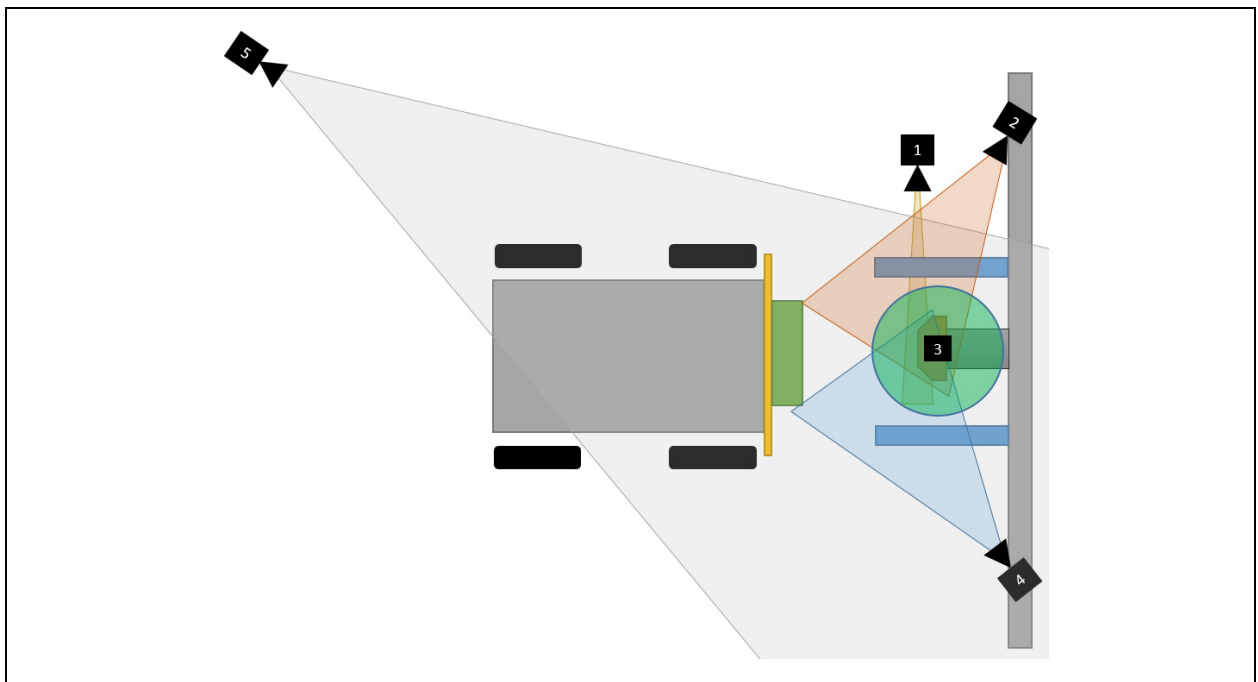


Abbildung 71: Positionierung der Videotechnik

Kamera 2, 3, 4 und 5 sind für die Dokumentation des Versuchs zuständig und zeichnen jeweils 1000 Bilder pro Sekunde auf. Dabei filmen die Kameras 2 und 4 jeweils schräg von vorne und Kamera Nummer 3 von oben auf die Kontaktzone Akkumodul mit Impaktor. Kamera 5 nimmt ein Übersichtsvideo des Versuchs auf. Die in der Abbildung dargestellten Lichtkegel stellen in etwa die Blickfelder der Kameras dar.

Die umfassende Videodokumentation der Versuche ist notwendig, um weitere Informationen für die numerische Simulation der Akkumodule zu gewinnen und diese damit noch genauer validieren zu können. Die Deformationsform (z.B. Faltenbildung an den Zellen) kann somit beobachtet und mit jener der Simulation verglichen werden.

6.5 Messtechnik

Dem gesamten Messkonzept kam bei der Entwicklung dieser Prüfumgebung eine wichtige Rolle zu. Ein Ziel war es, wie bereits erwähnt, aus den Versuchen Kraft-Weg-Kurven der Modulverformung abzuleiten. Das heißt, dass zu jedem registrierten Zeitpunkt des Versuchs ein Kraft- und ein Intrusionswert benötigt wurde. Aus diesen Kraft-Zeit- und Weg-Zeit-Kurven können Kraft-Weg-Kurven generiert werden. Es ist auch ein Spannungsmesssystem im Einsatz, welches die Spannungen jeder Einzelzelle und die Gesamtmodulspannung sowohl während als auch nach dem Versuch aufzeichnet. Damit können die Zellen hinsichtlich ihres elektrischen Verhaltens überwacht und Kurzschlüsse bzw. der dazugehörige Zeitpunkt detektiert werden.

Ein sogenannter „Trigger“ sorgt dafür, dass der Zeitpunkt Null für die gesamte Mess- und Filmtechnik ident ist. Somit können die Messdaten beliebig miteinander kombiniert werden. Dieser Trigger kann im weitesten Sinn als Schalter beschrieben werden, welcher beim Aufprall des Stoßwagens mechanisch ausgelöst wird.

6.5.1 Wegmessung

Die Wegaufzeichnung stellt bei diesem Einsatzzweck hohe Anforderungen an die Messtechnik, da ein solcher Crashversuch innerhalb einer sehr kurzen Zeitspanne abläuft. Die Verformung am Akkumodul findet bei den in dieser Arbeit gezeigten Versuchen in einem Zeitraum von etwa 10ms statt. Bei einer Geschwindigkeit von 14km/h legt der Stoßwagen in einer Millisekunde einen Weg von fast 4mm zurück. Die Gesamtverformung am Modul liegt bei den Versuchen in etwa im Bereich von 10-20mm. Eine hohe Genauigkeit bei der Wegmessung hat also oberste Priorität um die Abweichungen in einem vertretbaren Rahmen zu halten.

Es bieten sich verschiedene Optionen an, um ein solches Wegmesssystem zu realisieren. Im Folgenden werden zwei Systeme der engeren Auswahl kurz vorgestellt und das gewählte System detaillierter beschrieben.

Mögliche Systeme zur hoch-dynamischen Wegmessung sind:

- **Optisch mit Hochgeschwindigkeitskamera:**

Mittels Hochgeschwindigkeitskamera wird ein am Impaktor befestigter feststehender Maßstab gefilmt über den eine am Wagen befestigte Referenzmarke fährt. Weil mit bereits vorhandenen Geräten gearbeitet werden kann, ist es möglich ein solches System schnell und sehr kostengünstig umzusetzen. Die Genauigkeit hängt von der Auflösung des Bildausschnittes, der Bildrate und von der Unterteilung des verwendeten Maßstabes ab. Ein Nachteil der sich daraus ergibt ist, dass die Werte manuell abgelesen werden müssen. Dies ist aufwendig und stellt eine mögliche Fehlerquelle dar.

- **Laser-Wegaufnehmer:**

Einige Firmen bieten Lasermesssysteme zur Wegmessung an (z.B. WayCon Positionsmesstechnik GmbH) welche Meßfrequenzen von bis zu 100kHz ermöglichen und eine Auflösung von wenigen Mikrometern besitzen. Diese Laser-Wegaufnehmer sind besonders gut für hochdynamische Messungen geeignet. Die Genauigkeit ist sehr hoch, das System jedoch sehr teuer und mit längeren Lieferzeiten verbunden.

Für diese Prüfumgebung wird für die Wegmessung ein optisches System verwendet. Ein Laser bietet zwar Vorteile bei der Genauigkeit und der Auswertung der Daten, ist aber wegen der hohem Kosten und den langen Lieferzeiten im Rahmen dieses Forschungsprojektes nicht gewählt worden.

Optisch mit Hochgeschwindigkeitskamera:

Eine ausreichende Genauigkeit wird, bei einer Bildrate von 10000fps für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche, gewährleistet. Das entspricht bei einer Geschwindigkeit von 20km/h einer Wegauflösung von etwa einem halben Millimeter. In Abbildung 72 ist der Prüfaufbau mit den Komponenten des optischen Wegmesssystems – Maßstab und Referenzmarke – schematisch dargestellt (Ansicht von der Seite).

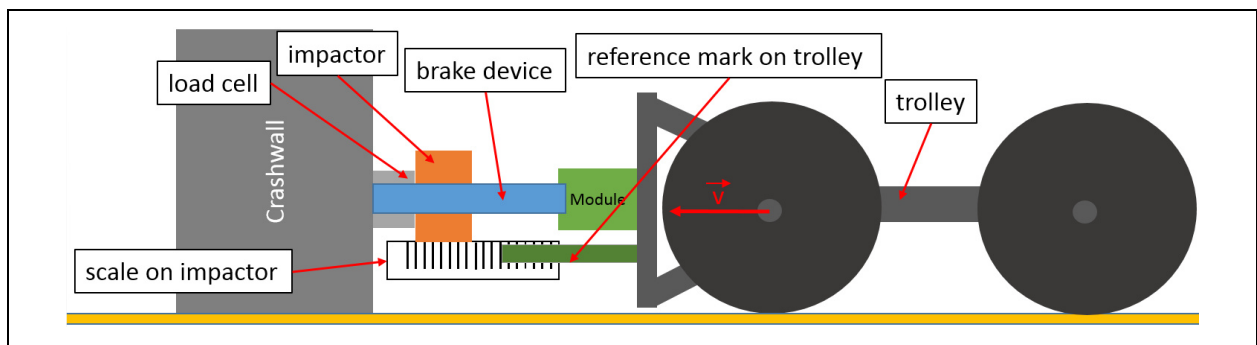


Abbildung 72: Funktionsweise des optischen Wegmesssystems

Am Stoßwagen ist unter dem Akkumodul eine Referenzmarke installiert, welche während des Versuchs über den unten am feststehenden Impaktor befestigten Maßstab fährt. In Abbildung 73 ist ein Foto des realen Aufbaus zu sehen. Die Referenzmarke ist in Grün dargestellt.

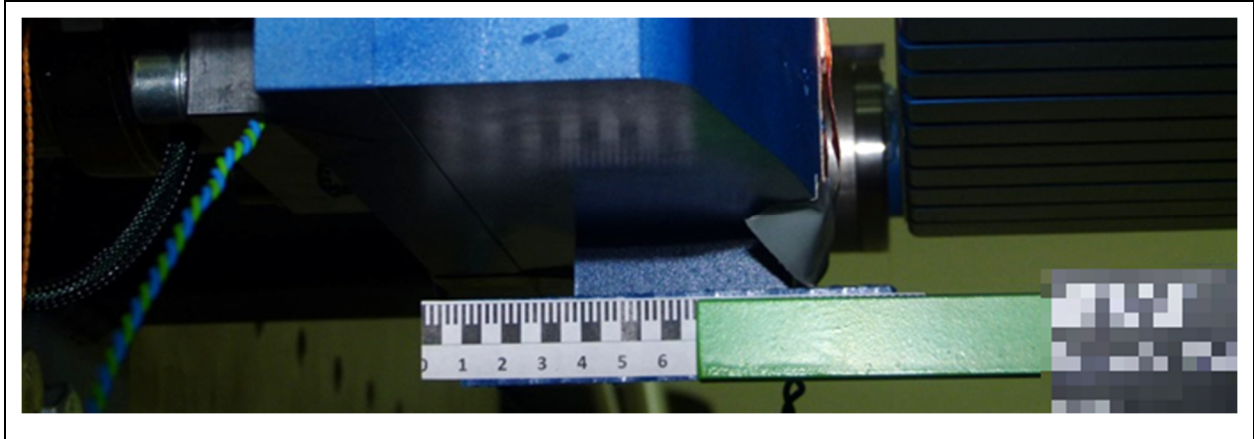


Abbildung 73: Maßstab und Referenzmarke zur Erstellung von Weg-Zeit-Kurven

Eine Hochgeschwindigkeitskamera filmt einen kleinen Bildausschnitt, auf dem der Maßstab und die sich bewegende Referenzmarke zu sehen ist. Die Auflösung des Bildausschnittes bestimmt die theoretische Genauigkeit. Die Anzahl an Pixel in der Breite des Ausschnittes, auf denen der Maßstab zu sehen ist, betrug 900. Auf diesem Bereich sind 9cm des Maßstabes zu sehen. Somit stehen 10Pixel für die Darstellung eines jeden Millimeters zur Verfügung, was eine theoretische Auflösung von $\pm 0,1\text{mm}$ bedeutet. Diese theoretische Auflösung wird aber wiederum, wie bereits erwähnt, durch die Bildrate beschränkt. Dieser Bildausschnitt ist in Abbildung 74 zu sehen. Der rote Pfeil markiert die aktuelle Position der Referenzmarke dar.

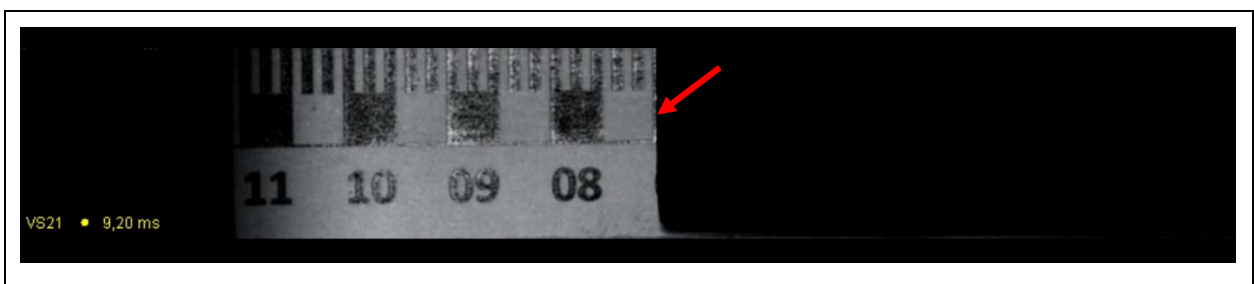


Abbildung 74: Videobild der Wegaufzeichnung

Im Videobild ist im linken unteren Eck der aktuelle Zeitpunkt ersichtlich mit welchem in Kombination mit dem Ablesen der Position der Referenzmarke (zu jedem Zeitpunkt) eine Weg-Zeit-Kurve eines Versuchs erstellt werden kann. Da die Zeit bei allen Messinstrumenten – durch die Auslösung eines „Triggers“ – die gleiche ist, können diese beliebig miteinander kombiniert werden. Manuelles Ablesen von Versuchsdaten ist aufwendig und stellt eine mögliche Fehlerquelle dar. Auf die Bestimmung des Nullpunktes der Modulverformung bzw. des Erstkontaktes des Stoßwagens mit der Bremseinrichtung wird in Kapitel 7 eingegangen.

6.5.2 Kraftmessung

Für die Messung der Kraft, welche am Impaktor anliegt und somit während des Versuchs auf das Akkumodul wirkt, wird ein 3-Wege-Kraftmesselement der Firma Kistler (Typ Z20730) verwendet. Dieses Messelement kann Kräfte von bis zu 500kN in der Hauptrichtung (Fahrtrichtung des Stoßwagens) registrieren.

Die Kraftmessung wird für die Berechnung der in das Akkumodul eingebrachten Deformationsenergie benötigt. Aus den Informationen von Weg- und Kraftmessung können Kraft-Weg-Kurven erstellt werden, welche durch Integration die eingebrachte Energie ergeben.

6.5.3 Geschwindigkeitsmessung

Neben der Weg- und der Kraftmessung ist die Bestimmung der Geschwindigkeit des Stoßwagens unmittelbar vor dem Kontakt Wagen-Bremseinrichtung essentiell, um in Verbindung mit dem Gewicht des Stoßwagens die gesamte Versuchsenergie zu bestimmen. Eine exakte Bestimmung der Versuchsgeschwindigkeit ist sehr wichtig, um für die Validierung der Simulationsmodelle der Akkumodule die exakt gleichen Randbedingungen zur Verfügung zu stellen. Fehler in der Geschwindigkeitsmessung wirken sich auf die Energie umso stärker aus, da diese quadratisch mit ihr zunimmt (siehe Formel 1 auf Seite 65).

Die Geschwindigkeit lässt sich einfach aus den Weg-Zeit-Daten berechnen, welche bei optimaler Kameraposition schon einige Zentimeter vor Auftreffen auf die Bremseinrichtung vorliegen (siehe Abbildung 72). Durch Mittelung der Geschwindigkeit zwischen Beginn der Videoaufzeichnung und Auftreffen auf die Bremseinrichtung kann diese sehr genau bestimmt werden.

Als zusätzliches System wird zur Kontrolle ein hochwertiges, geeichtes Lichtschrankensystem der Firma TAG Heuer (Typ HL2-31) verwendet, welches ebenfalls die Geschwindigkeit vor Auftreffen des Stoßwagens mittelt. Die Abweichung ist mit dieser Methode jedoch größer, da über eine Distanz von ungefähr einem Meter gemittelt wird.

6.5.4 Gewicht des Stoßwagens

Das exakte Gewicht des Stoßwagens inklusive der gesamten Messtechnik und dem Akkumodul wird vor jedem Versuch mittels Radlastwagen gemessen. Eine Änderung des Gewichtes – welches sich je nach Versuchskonfiguration ändert und für die Validierung der Simulationsmodelle der Akkumodule von großer Bedeutung ist – stellt somit kein Problem dar.

6.5.5 Spannungsmessung

Mithilfe der Spannungsmesstechnik ist es möglich die Spannungen aller Einzelzellen eines Moduls sowie die Gesamtmodulspannung während und nach einem Versuch zu überwachen und aufzuzeichnen. Eventuelle Kurzschlüsse werden detektiert, der exakte Zeit- und Intrusionswert des Auftretens gespeichert. Somit ist es möglich, Zusammenhänge zwischen mechanischem Verhalten und elektrischem Versagen herzustellen.

Analoge Messinstrumente sind üblicherweise auf einen Potentialunterschied von +/- 10V ausgelegt, was im gegebenen Fall eine Schwierigkeit darstellt. Bei einer Serienschaltung von 10 Batteriezellen ergibt sich ein Potentialunterschied von 42V (10 x 4,2V) den das Messinstrument verarbeiten muss. Deshalb kam für die Spannungsmessung ein eigenes, dafür ausgelegtes, System zur Anwendung.

6.5.6 Beschleunigungsmessung

Am Stoßwagen sind Beschleunigungssensoren angebracht. Prinzipiell ist es durch zweimalige Integration dieses Beschleunigungssignals ebenfalls möglich Weg-Zeit-Kurven eines Versuchs zu generieren. Eine ausreichend genaue Bestimmung ist damit für diese Anwendung jedoch nicht möglich, da diese Sensoren einen Messfehler von ca. einem Prozent des Messbereichs aufweisen. Bei einem 1000g Sensor beträgt die Abweichung somit +/-10g. Bei auftretenden Beschleunigen von ungefähr 50g kann diese Messtoleranz zu einem massiven Fehler führen. Durch das Integrationsverfahren ergeben sich zusätzliche Fehler. Eine resultierende Abweichung von mehreren Millimetern vom realen Wert ist somit möglich. Mit der vorher beschriebenen optischen Wegmessmethode kann eine den Anforderungen entsprechende Auflösung von +/-0.5mm erreicht werden. Bei der betrachteten Prüfvorrichtung sind die Anforderungen an die Genauigkeit sehr hoch. Die Methode der Beschleunigungsmessung kam deswegen für die Wegmessung nicht in Frage. Die Daten wurden für eine Plausibilitätsprüfung der anderen erhaltenen Versuchsdaten herangezogen.

7 Versuche und Ergebnisse

Es wurden insgesamt vier Versuche mit Hochvoltbatteriemodulen im Prototypenstadium durchgeführt. Hierbei handelt es sich um Module aus aktuellen Fahrzeugentwicklungsprojekten. Die Module bestehen aus mehreren sogenannten „Metalcan“-Zellen. Als „Metalcan“ bezeichnet man eine Hülse aus Metall welche die gesamte Zellchemie umgibt und diese schützt. Wie bereits zuvor erwähnt, dürfen die Akkumodule in dieser Arbeit nicht abgebildet werden. Jeweils zwei der Module wurden im ungeladenen Zustand (0% SOC) bzw. geladenen Zustand (80% SOC) getestet. Die ungeladenen Versuche wurden unter entsprechenden Sicherheitsvorkehrungen im Crashlabor des Institutes für Fahrzeugsicherheit an der Technischen Universität Graz durchgeführt. Für die Durchführung der Versuche mit geladenen Modulen wurde aufgrund der sehr hohen, bereits erwähnten Risiken (Brandgefahr) und des nicht Vorhandenseins von entsprechenden gebäudetechnischen Schutzeinrichtungen ein Freilufttestgelände gewählt. Vor der Durchführung der Tests mit richtigen Akkumodulen wurde die gesamte Anlage inklusive der gesamten Messtechnik mit zwei Inbetriebnahmeversuchen überprüft. Das Akkumodul wurde dabei durch einen Moduldummy ersetzt, von welchem keine Gefahren ausgehen.

7.1 Ziele der Versuchsreihen

Die Funktionstüchtigkeit des Konzeptes sollte durch Abarbeitung folgender Punkte überprüft werden:

- Ableitung von Kraft-Weg-Kurven der Deformationen an den Akkumodulen.
- Untersuchung des Verhaltens der betrachteten Energiespeicher hinsichtlich mechanischer und chemischer Reaktionen.
- Durch das Testen mit geladenen und ungeladenen Modulen soll festgestellt werden, ob es abhängig vom Ladezustand Unterschiede im Verhalten gibt.
- Erarbeitung von Verbesserungsvorschlägen für die Weiterentwicklung des Prüfkonzeptes.

7.2 Crasumgebung

Die Versuche zum Testen der Messkette, sowie die erste Versuchsreihe mit realen Akkumodulen wurde im Crashlabor des Institutes für Fahrzeugsicherheit an der Technischen Universität Graz durchgeführt. Das Labor ist mit einer Craschanlage ausgerüstet, welche mit einem Schienen-Seilzugsystem im Boden sowie einem massiven Crashblock ideale Voraussetzungen zur Durchführung der Versuche bietet. Das Labor beinhaltet außerdem eine leistungsstarke Absauganlage um bei eventueller Rauchentwicklung Frischluft zuzuführen. In Abbildung 75 ist das Crashlabor abgebildet. Gut zu erkennen sind die gelbe Führungsschiene in der Mitte sowie der Crashblock im Hintergrund. Das Gebäude ist nicht für die Durchführung von geladenen Batterietests konzipiert worden. Die dazu nötigen Vorkehrungen und Schutzeinrichtungen sind nicht vorhanden.

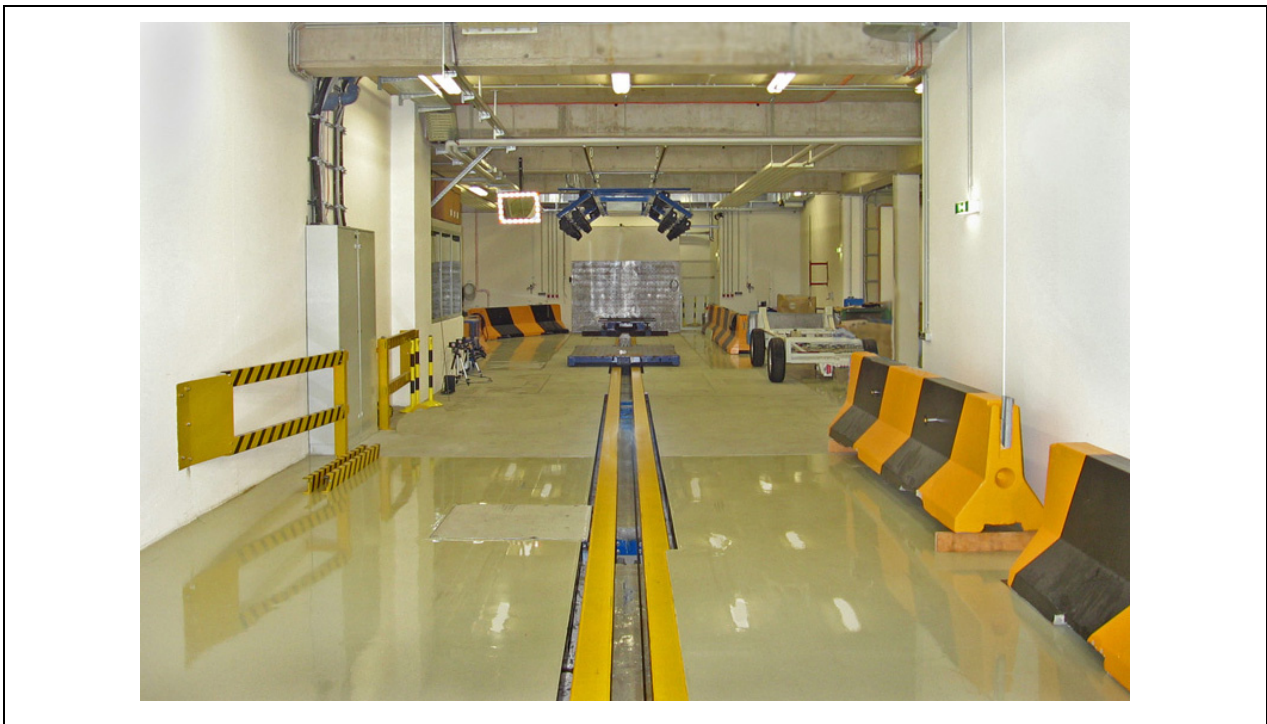


Abbildung 75: Craschanlage des Vehicle Safety Institutes der Technischen Universität Graz

Der Stoßwagen wird mit der Seilzuganlage auf die gewünschte Geschwindigkeit beschleunigt. Dazu wird dieser mit mittig an ihm befestigten Stahlbolzen vom in der Schiene laufenden Seilwagen angeschoben. Kurz vor dem Aufprall wird der Seilwagen abgebremst und der Stoßwagen fährt frei aber durch die Schiene geführt bis zum Prüfaufbau. Die Einstellung der gewünschten Geschwindigkeit des Stoßwagens im Moment vor dem Aufprall auf die Crashwand beruht dabei auf Erfahrungswerten.

Für die zweite Versuchsreihe mit geladenen Akkumodulen musste aus sicherheitstechnischen Gründen auf ein Freilufttestgelände ausgewichen werden, was mit folgenden Nachteilen verbunden ist:

- Da am Testgelände keine permanente Crashwand vorhanden ist, musste ein Ersatz für diese neu konstruiert werden. Hierbei handelt es sich um eine kurzfristige und günstige Lösung, welche nicht dieselben starren Eigenschaften wie der massive Crashblock im Labor der Technischen Universität Graz besitzt.
- Die Umgebungsbedingungen (z.B. Temperatur, Sonneneinstrahlung, Wind) sind nicht konstant. Dadurch können sich Material- und Sensoreigenschaften geringfügig ändern.

In Abbildung 76 ist das Freilufttestgelände mit aufgebauter Messtechnik abgebildet.



Abbildung 76: Freilufttestgelände zur Durchführung der Versuche mit geladenen Modulen

Für die Verwendung am Freiluftgelände musste der Stoßwagen an die Seilzuganlage angepasst werden, die sich von jener des Crashlabors an der Technischen Universität Graz unterscheidet. Der Wagen wird nun nichtmehr mittig sondern seitlich in einer Schiene im Boden geführt und von hinten angeschoben. Mit einem Hochleistungsgebläse (in Abbildung 76 links unten zu sehen) kann bei eventueller starker Rauchentwicklung dieser verwirbelt und weggeblasen werden.

7.3 Gewählter Lastfall

Für die beiden Versuchsreihen, die in dieser Diplomarbeit behandelt werden, wurde in Abstimmung mit den Projektpartnern der Lastfall „Euro-NCAP-Pfahl-Seitenaufprall“ ausgewählt, bei welchem sehr tiefe Intrusionen seitlich am Fahrzeug auftreten.

7.3.1 Randbedingungen

In Tabelle 11 sind die Randbedingungen des Lastfalles zusammengefasst.

Betrachtetes Bauteil:	Mitteltunnel
Einbaulage Akkumodule:	Längs im Mitteltunnel
Eingebrachte Deformationsenergie:	~ 1kJ
Deformationsform/ Richtung:	Siehe Abbildung 77/ Abbildung 78
Deformationsgeschwindigkeit:	0.6-1.6m/s

Tabelle 11: Randbedingungen des Lastfalls „Euro-NCAP-Pole-Seitencrash“

7.3.2 Impaktorform

Als Impaktor bezeichnet man jenes Element des Prüfstandes, das beim Versuch mit dem Akkumodul in Kontakt tritt und für dessen Verformung verantwortlich ist. Die Kraft die dadurch am Modul anliegt wird am Impaktor gemessen. Die Form dieses Bauteils wird mittels CAD-Software aus den Informationen der Auswertung des jeweiligen Lastfalles generiert. Für den Lastfall „Euro-NCAP-Pole-Seitencrash“ wurde die theoretische Impaktorform, welche in Abbildung 29 dargestellt ist, für die Ableitung der Form herangezogen. Diese Form sollte der Intrusionsform am Mitteltunnel ähneln.

Da hier wieder vom Extremfall der Belastung ausgegangen wird, spiegelt man den Bereich des Mitteltunnels welcher die maximale Steigung der Intrusionskurve aufweist. Das Ergebnis ist ein symmetrischer Impaktor welcher in Abbildung 77 dargestellt ist.

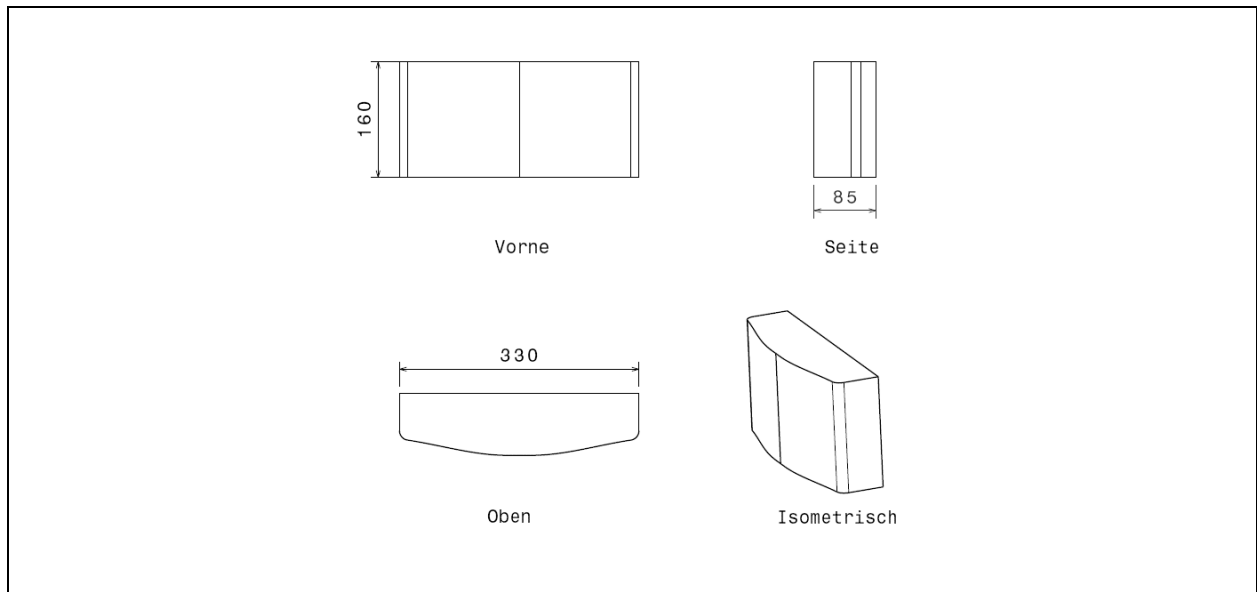


Abbildung 77: Impaktor für den Lastfall „Euro-NCAP-Pfahl-Seitenaufprall“

Der Bauteil wurde aus einem Aluminiumblock gefräst und mit matter Farbe lackiert, um Reflexionen auf den Videoaufzeichnungen zu vermeiden.

7.3.3 Belastung des Moduls

Im Folgenden wird gezeigt, wie die Belastungen des Gesamtfahrzeugs, die in Fahrzeug-Y-Richtung wirken, im Versuch in das Modul eingebracht werden. Abbildung 78 zeigt Akkumodul und Impaktor vor (1) bzw. nach dem Auftreffen (2). Die Koordinatenrichtung x_{sw} stellt in der Abbildung die Fahrtrichtung des Stoßwagens dar. Der Impaktor ist im Versuch starr über ein Kraftmesselement mit dem Crashblock verbunden. Das Modul bewegt sich am Stoßwagen montiert in x_{sw} -Richtung auf den Impaktor zu und wird deformiert (in Modulrichtung x_M).

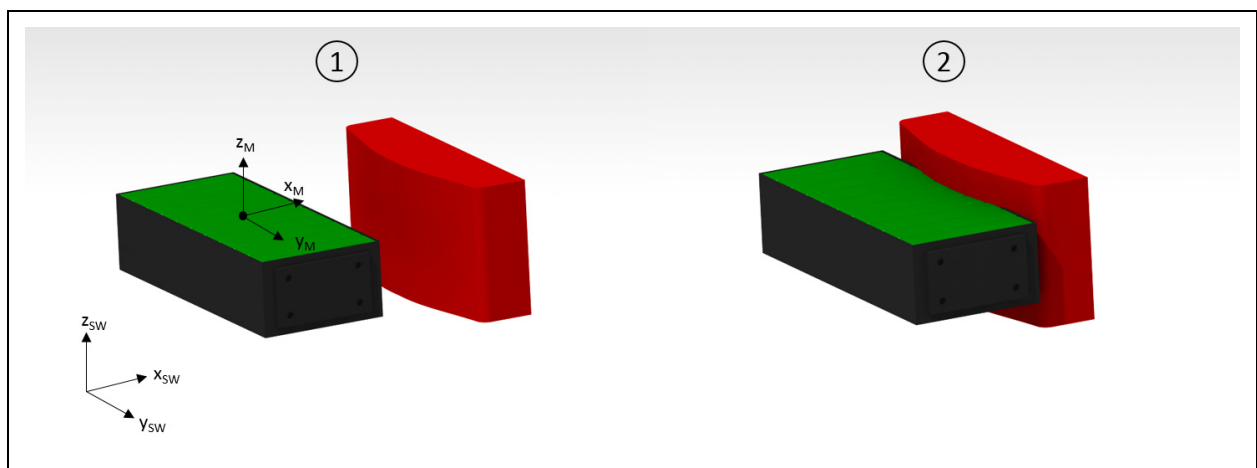


Abbildung 78: Belastung des Moduls im Versuch (Lastfall „Euro-NCAP-Pfahl-Seitenaufprall“)

7.4 Versuche zur Inbetriebnahme der Prüfvorrichtung

Zwei Versuche zur Inbetriebnahme der Prüfvorrichtung wurden mit Modulersatzkörpern im Crashlabor der Technischen Universität Graz durchgeführt, um die Funktionstüchtigkeit des Aufbaus und der gesamten Messkette zu überprüfen. Dies war wichtig um nicht einen der teuren Modulprototypen durch Fehlfunktion zu zerstören ohne die gewünschten Ergebnisse generiert zu haben. Da der Prüfaufbau hauptsächlich mit bereits vorhandenen Bauteilen realisiert wurde, war es möglich Zeit und Kosten zu sparen. Als Modulersatzkörper kam ein Block aus Aluminiumwaben (mit gleichen Abmessungen wie das Akkumodul) zur Anwendung. Dieser nimmt – wegen des niedrigeren Kraftniveaus beim Verformen – bei gleichem Deformationsweg weniger Energie auf als das steifere, richtige Akkumodul. Somit würde mehr Energie in der Bremseinrichtung absorbiert werden. Um trotzdem die durch den Lastfall geforderte Energiemenge von einem Kilojoule in den Modulersatzkörper einzubringen, wurde die Geschwindigkeit dieser Versuche höher gewählt als bei den später gezeigten Tests mit richtigen Akkumodulen.

7.4.1 Randbedingungen der Inbetriebnahmeversuche

Die Randbedingungen der Inbetriebnahmeversuche sind in Tabelle 12 zusammengefasst.

Sollgeschwindigkeit:	29km/h („Euro-NCAP-Pfahl-Seitenaufprall“)
Gewicht des Stoßwagens:	380kg
Bremseinrichtung:	2x Stauchrohr aus Stahl

Tabelle 12: Randbedingungen des Inbetriebnahmeversuchs

Beide Versuche wurden ident durchgeführt, um Aussagen über die Reproduzierbarkeit treffen zu können.

7.4.2 Prüfaufbau mit Modulersatzkörper

In Abbildung 79 ist der Prüfaufbau zu sehen (Ansicht von der Seite). Die wichtigsten Komponenten sind in der folgenden Abbildung beschriftet. Am linken Bildrand sind die Aufbauten an der Barriere zu sehen, am rechten der Stoßwagen. Der Modulersatzkörper wurde mittig auf eine gelochte Haltevorrichtung aufgeklebt, welche wiederum am Kraftmesselement befestigt wurde. Diese gelochte Aufnahme ist wie bei der Bremseinrichtung zur Entlüftung notwendig.

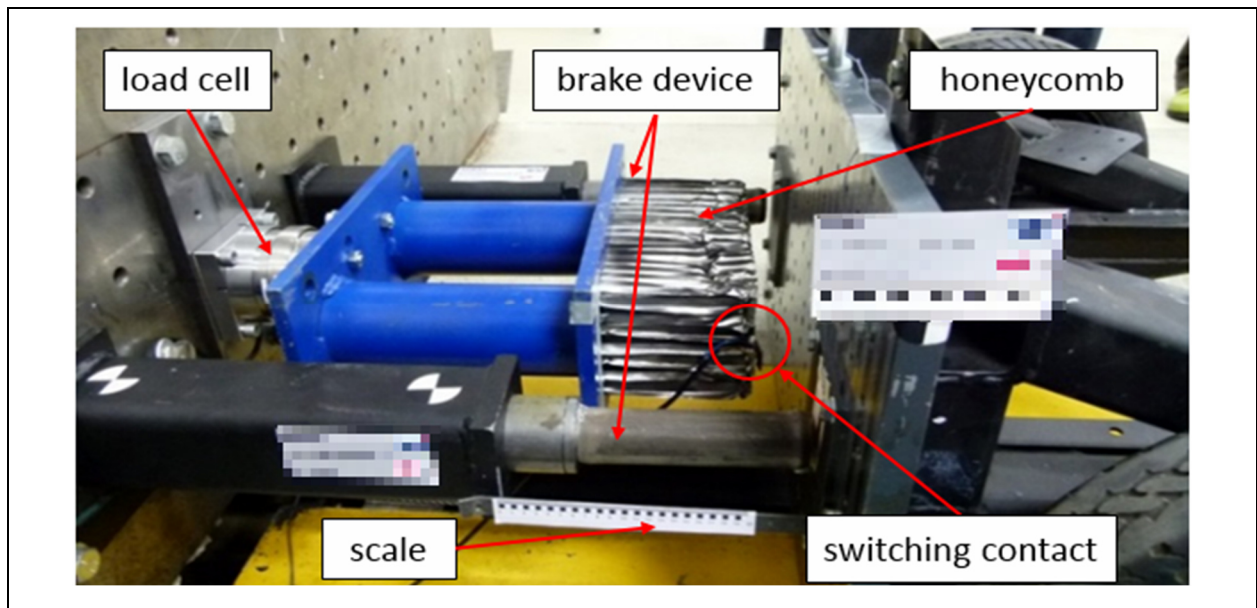


Abbildung 79: Prüfaufbau eines Inbetriebnahmeversuches vor dem Test

Der Modulersatzkörper sollte eigentlich – wie im Konzept vorgesehen – am Stoßwagen montiert werden. Mit der hier verwendeten Konfiguration konnte, um Kosten zu sparen, auf eine zusätzliche Befestigung der Wabenstruktur am Wagen verzichtet werden, da keine Beschleunigungen auf sie wirkten. Da bei den Vortests diese Anforderung nicht bestand, konnten die Tests der Messtechnik und des Versuchsablaufs ohne Einschränkungen durchgeführt werden.

Mit diesen Versuchen wurden die Auslegung der Bremseinrichtung und die Auftreffgeschwindigkeit des Stoßwagens überprüft. Weiters wurde, zum Testen der Spannungsmessung, ein schaltbares Widerstandsnetzwerk aufgebaut, um einen Spannungsabfall einer Batteriezelle zu erzeugen. Der Schaltplan ist in Abbildung 80 ersichtlich. Man simulierte einen Kurzschluss des Akkumoduls welcher durch einen Schaltkontakt ausgelöst wurde (Schaltkontakt siehe Abbildung 79).

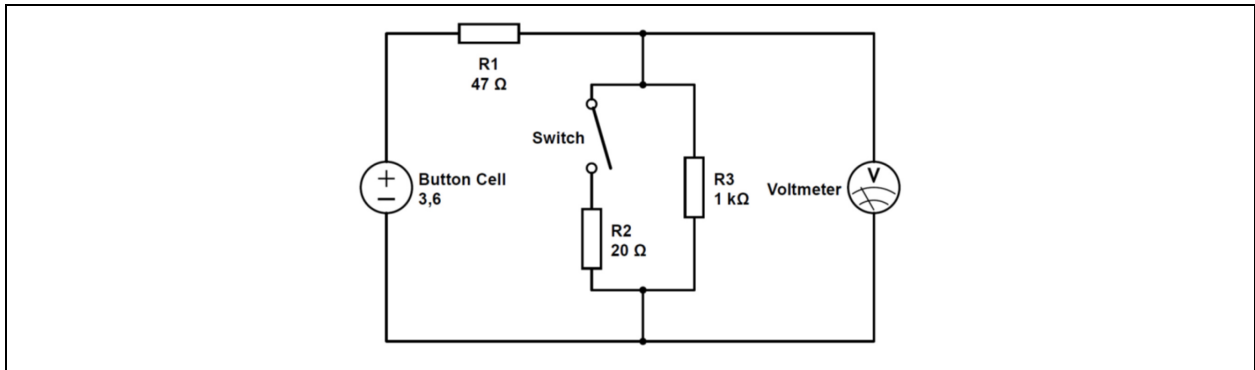


Abbildung 80: Schaltplan für die Spannungsmessung beim Inbetriebnahmeversuch

Für die optische Wegmessung wurde am Wagen ein Maßstab so angebracht, dass dieser sich im Versuch mit geringem Abstand seitlich an der linken Stauchrohrhalterung vorbeibewegen konnte. Als Referenzmarke wurde die vorderste Kante des Stauchrohrhalters verwendet (siehe Abbildung 81).

7.4.3 Aufgezeichnete Daten und Auswertung der Inbetriebnahmeversuche

In Abbildung 81 ist der Prüfaufbau nach dem Versuch (Ansicht von der Seite) dargestellt. Gut zu erkennen sind die verformten Stauchrohre, die gestauchte Aluminiumwabe sowie die gekennzeichnete Referenzmarke für die Wegmessung.

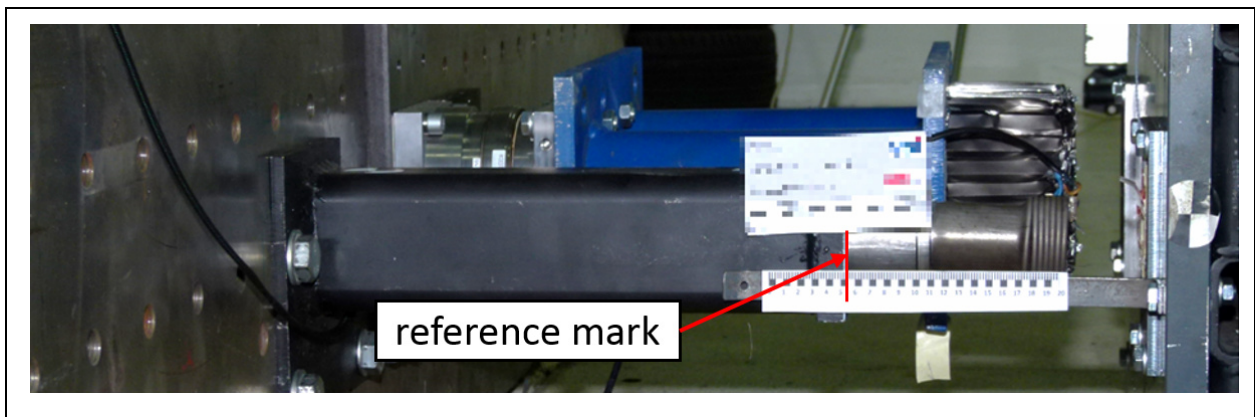


Abbildung 81: Aufbau eines Inbetriebnahmeversuches nach dem Test

Geschwindigkeit des Stoßwagens:

Die Geschwindigkeit des Stoßwagens betrug laut Messung mittels Lichtschranke 29,07km/h beim ersten und 29,22km/h beim zweiten Versuch. Die Abweichung zwischen den beiden Versuchen betrug ca. 0,5% der Auftreffgeschwindigkeit.

Deformation des Modulersatzkörpers:

Die Daten des optischen Wegmesssystems wurden ausgewertet und daraus Weg-Zeit-Diagramme der Verformung der Aluminiumwaben erstellt (siehe Abbildung 82).

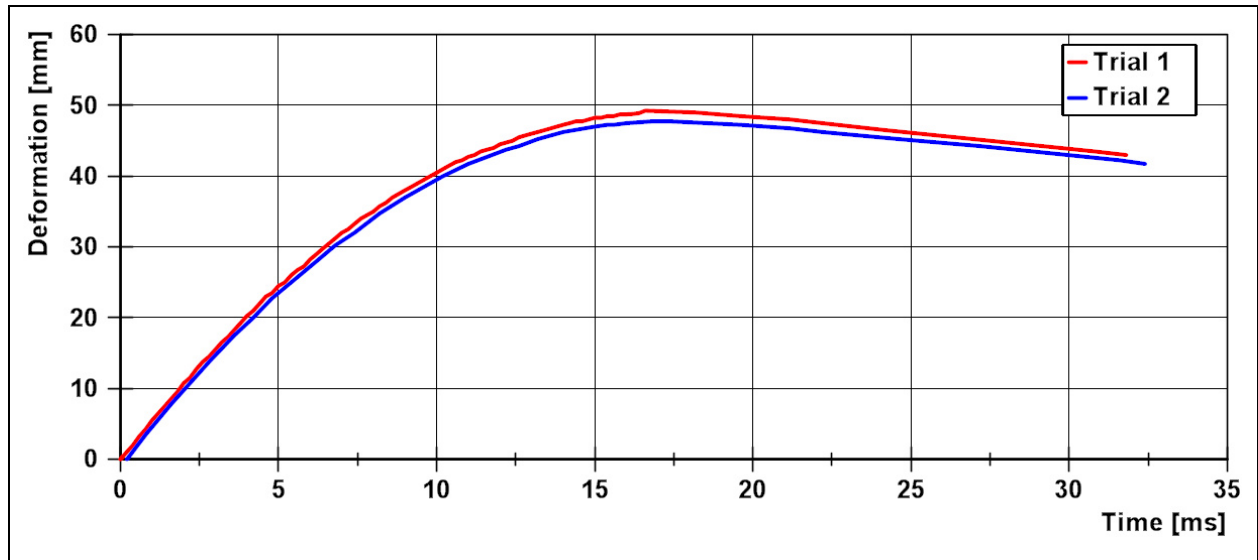


Abbildung 82: Weg-Zeit-Kurven der Inbetriebnahmeversuche

Die Maximalwerte der Deformationen betragen 49mm bei Versuch 1 und 46mm bei Versuch 2. Die Abweichung zwischen den beiden Werten beträgt ca. 6% der Maximaldeformation. Form und Verlauf der Kurven sind nahezu ident. Bei der Wegmessung wurde beobachtet, dass sich die Referenzmarke (Stauchrohrhalterung) während des Versuchs, aufgrund von Elastizitäten, um 1-2mm bewegte und dies möglicherweise einen Einfluss auf die Ergebnisse hatte. Für die Versuche mit echten Modulen wurde eine Abhilfe dafür – die Anbringung der Referenzmarke am Wagen bzw. des Maßstabes am Impaktor – in den Prüfaufbau implementiert. Mögliche Abweichungen in der Geschwindigkeitsmessung sowie im Versuchsaufbau könnten einen weiteren Einfluss auf das Ergebnis gehabt haben.

Krafteinwirkung am Modulersatzkörper und Spannungsmessung:

In Abbildung 83 sind die gemessenen Kraft- und Spannungsverläufe der beiden Inbetriebnahmeversuche dargestellt. Die Kurvencharakteristik ist bei beiden Versuchen ähnlich.

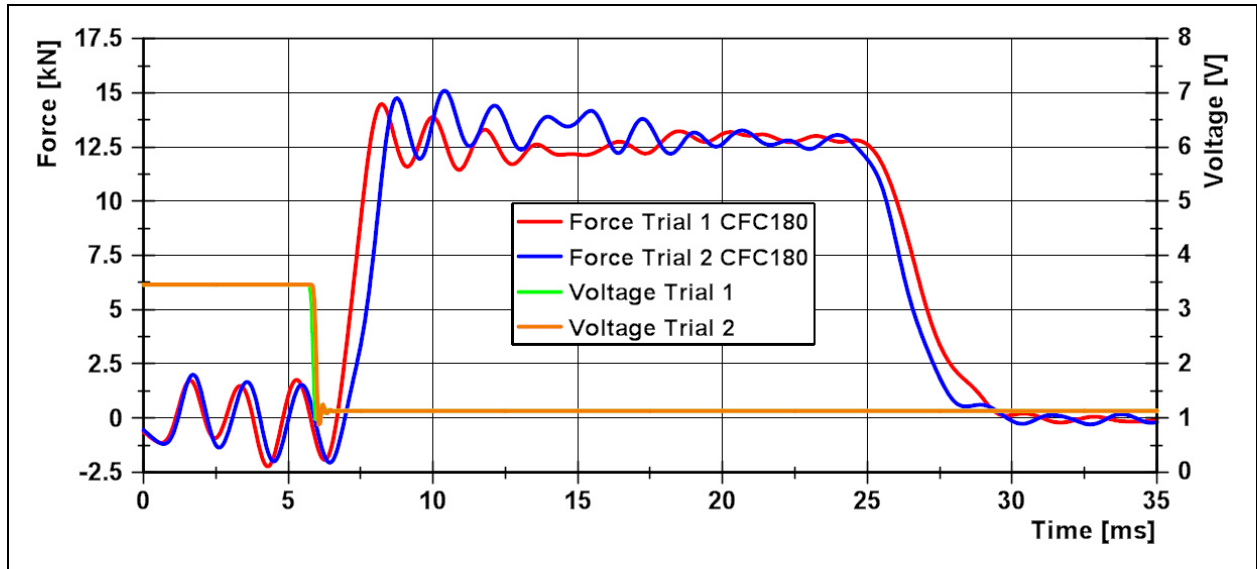


Abbildung 83: Kraft- und Spannungsverläufe der beiden Inbetriebnahmeversuche

Das Kraftniveau der Aluminiumwaben lag während des Verformens bei ca. 13kN. Bei Versuch 2 ergab sich im Vergleich zu Versuch 1 ein etwas höheres Kraftniveau zu Beginn der Deformation. In der Abbildung sind Schwingungen (± 2 kN) vor und nach dem Kraftanstieg (Kontakt des Wagens mit der Wabe) zu erkennen. Diese wurden mit hoher Wahrscheinlichkeit von den Stauchrohren auf das Kraftmesselement übertragen. Bei den Versuchen mit Akkumodulen wird diese Schwingung prozentuell weniger Einfluss auf das Ergebnis haben, da von einem weit höheren Kraftniveau (bis zu 200kN) am Messelement ausgegangen wird. Gut zu sehen sind auch die Spannungsabfälle bei ungefähr 6ms welche die Zellkurzschlüsse darstellen. Die Krafteinwirkungen auf die Modulersatzkörper fanden in einem Zeitraum von ca. 20ms statt, wobei diese Phase bei Versuch 1 etwas länger andauerte als bei Versuch 2.

Kraft-Weg-Kurven der Inbetriebnahmeversuche:

Mit den aufgezeichneten Daten konnten Kraft-Weg-Diagramme der beiden Versuche erstellt werden. Diese sind in Abbildung 84 dargestellt. Die Flächen unter den Kurven entsprechen den in die Modulersatzkörper eingebrachten Deformationsenergien.

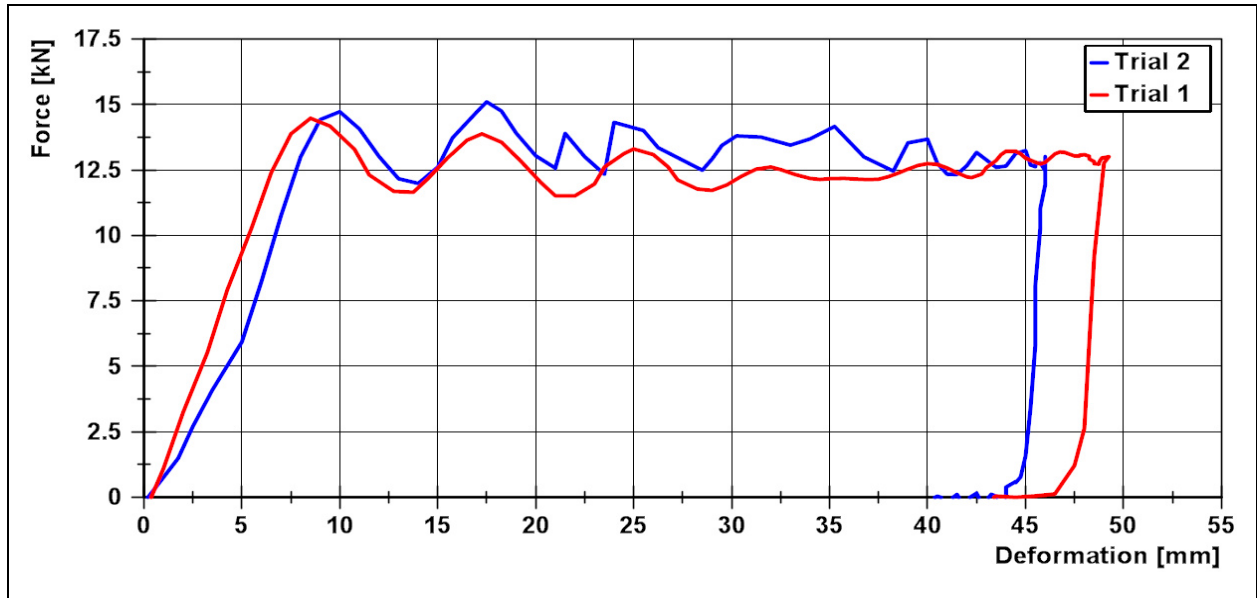


Abbildung 84: Kraft-Weg-Kurven der Inbetriebnahmeversuche

In die Modulersatzkörper eingebrachte Deformationsenergien:

Mittels Integration der Kraft-Weg-Kurven wurden die in die Aluminiumwaben eingebrachten Deformationsenergien bestimmt (siehe Abbildung 85).



Abbildung 85: In die Aluminiumwaben eingebrachte Energien bei den Inbetriebnahmeversuchen

Die eingebrachte Energie betrug bei Versuch 1 560J und bei Versuch 2 540J, die Abweichung zwischen den beiden Versuchen liegt bei ca. 3,6%. Die gewünschte Energie von einem Kilojoule konnte nicht erreicht werden, was an der Auslegung der Bremseinrichtung lag. Hier zeigte sich Verbesserungspotential beim Simulationsmodell. Die geringe Abweichung bei den eingebrachten Energien von 20J zwischen den beiden Versuchen bewies, dass reproduzierbare Ergebnisse in einem akzeptablen Genauigkeitsbereich erzielt werden können.

Basierend auf den positiven Erkenntnissen der Inbetriebnahmeversuche und mit Verbesserungen der Messtechnik sowie der Auslegung der Bremseinrichtung konnten im nächsten Schritt Versuche mit Akkumodulen durchgeführt werden.

7.5 Ungeladene Modulversuche

Es wurden in einer ersten Versuchsreihe zwei Tests mit ungeladenen Modulen durchgeführt. Die Versuchsgeschwindigkeit ist im Vergleich zu den Vortests verringert worden, um sich näher im Bereich der Verformungsgeschwindigkeiten aus den Gesamtfahrzeugsimulationen zu befinden. Außerdem wäre bei gleich dimensionierter Bremseinrichtung der gewünschte Energieeintrag in das Modul, weil dieses steifer ist als die Wabe, überschritten worden. Verbesserungen zu den Inbetriebnahmeversuchen wurden in das Konzept integriert.

7.5.1 Randbedingungen der ersten Versuchsreihe

In Tabelle 13 sind die Randbedingungen für die erste Versuchsreihe mit zwei getesteten Akkumodulen zusammengefasst. Die Geschwindigkeit wurde beim ersten Versuch mit 14km/h festgelegt. Damit wird laut Simulationen mit der verwendeten Bremseinrichtung die aus dem Lastfall geforderte Energie von einem Kilojoule in das Akkumodul eingebracht. Für den zweiten Versuch wurde die Geschwindigkeit auf 19km/h erhöht, um ein Zellversagen herbeizuführen. Laut Vorsimulationen konnte ein kritischer Bereich, in dem ein Zellversagen auftreten könnte, identifiziert werden. Mit 14km/h lag man unter diesem Bereich, mit 19km/h deutlich darüber.

Bezeichnung:	Versuch 1	Versuch 2
Sollgeschwindigkeit:	14km/h	19km/h
Bremseinrichtung:	2x Stauchrohr aus Stahl	2x Stauchrohr aus Stahl
Masse Stoßwagen inkl. Akkumodul:	397kg	397kg

Tabelle 13: Randbedingungen der ersten Versuchsreihe

7.5.2 Verbesserungen zu den Inbetriebnahmeversuchen

Für die erste Versuchsreihe wurden folgende Verbesserungen umgesetzt:

- Wegmessung: Der Maßstab wurde unten mittig am Impaktor angebracht. Somit wird die echte Modulverformung gemessen und Elastizitäten im Aufbau an der Barriere haben keinen Einfluss mehr auf das Ergebnis.
- Geschwindigkeitsmessung: Die Berechnung der Geschwindigkeit erfolgt aus den Daten der Wegmessung vor dem Auftreffen des Wagens auf die Bremseinrichtung. Diese Methode ist exakter als die Messung mit Lichtschranke.
- Auslegung der Bremseinrichtung: Das Simulationsmodell konnte optimiert werden.

7.5.3 Prüfaufbau für die ungeladenen Versuche

In Abbildung 86 ist eine Gesamtansicht des Aufbaus dargestellt. An der Crashwand befinden sich die Bremsenrichtung (grau/ rot), sowie je nach Höhe der laut Vorsimulationen erwartenden Kräfte, ein oder zwei Kraftmeselemente (hellbraun) mit Impaktor (rot). Bei den hier gezeigten Versuchen wurde nur ein mittig befestigtes Kraftmeselement verwendet, da von keinen Kräften höher 200kN in Hauptrichtung (Fahrtrichtung) auszugehen war. Am Wagen ist das Akkumodul befestigt. Es liegt mit seiner Rückwand an der Aufspannplatte des Stoßwagens an.

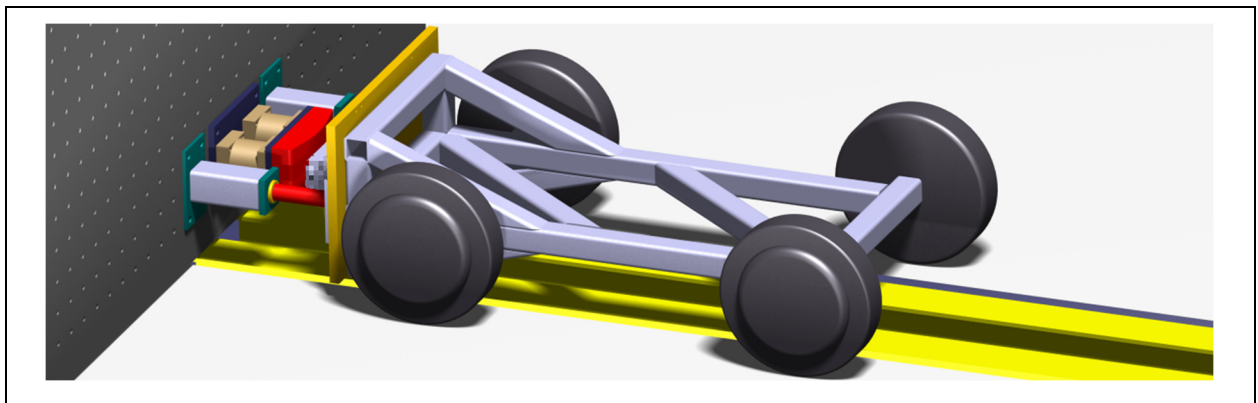


Abbildung 86: CAD-Modell des Prüfaufbaus der Versuche mit ungeladenen Akkumodulen

Die Einzelkomponenten sind in Abbildung 87 in einer Detailansicht des realen Prüfaufbaus beschriftet.

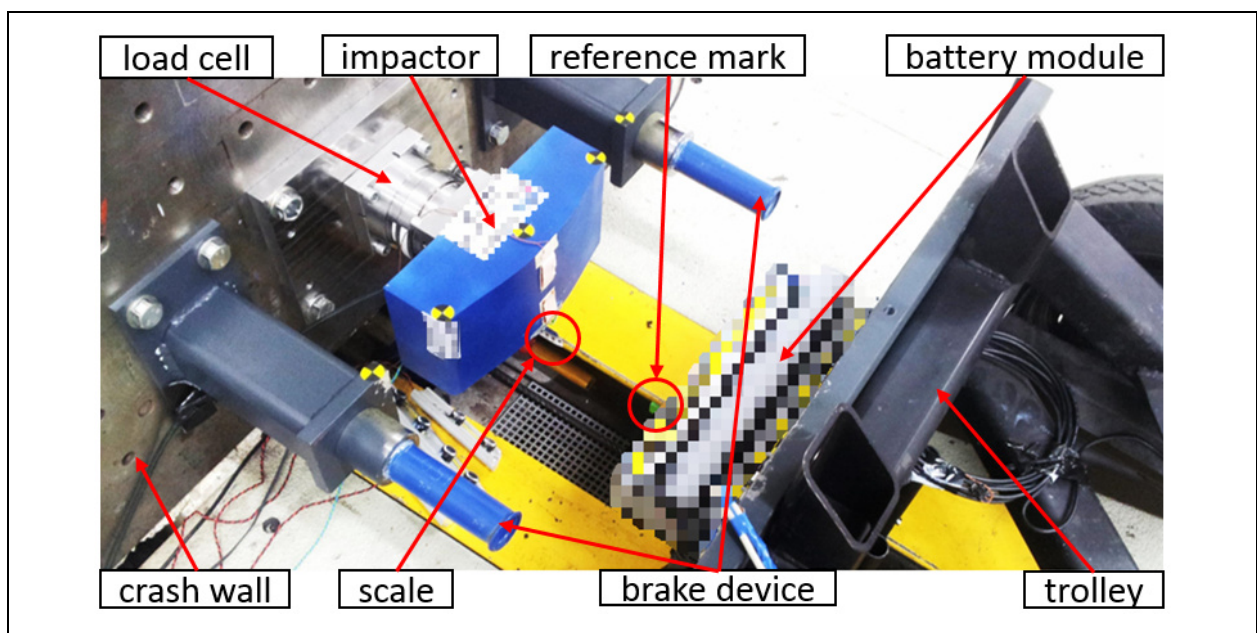


Abbildung 87: Prüfaufbau für Versuche mit ungeladenen Akkumodulen

In dieser Abbildung ist der unten, mittig am Impaktor angebrachte Maßstab für die Wegmessung zu sehen. Sollte sich dieser aufgrund von Elastizitäten (z.B. der

Crashwand) im Versuch nach hinten bewegen, wird trotzdem die korrekte Deformation gemessen, da sich der Maßstab mit ihm mitbewegt. Am Wagen selbst wurde die Referenzmarke befestigt, welche so positioniert ist, dass sie sich so knapp wie möglich am Maßstab vorbeibewegt ohne diesen dabei zu berühren.

7.5.4 Aufgezeichnete Daten und Beobachtungen

Um eine umfassende Auswertung durchzuführen, sind – wie bei den Vortests – eine Reihe von Messdaten aufgezeichnet worden.

Geschwindigkeit des Stoßwagens:

In Tabelle 14 sind sowohl die Soll- als auch die gemessenen und die aus der Videoanalyse abgeleiteten Geschwindigkeiten der ersten Versuchsreihe aufgelistet.

Bezeichnung:	Versuch 1	Versuch 2
Sollgeschwindigkeit:	14,00km/h	19,00km/h
Lichtschanke:	13,92km/h	19,01km/h
Videoanalyse:	14,00km/h	-

Tabelle 14: Soll- und Ist-Geschwindigkeiten der ersten Versuchsreihe

Der exakteste Wert ergibt sich aus der Berechnung der Geschwindigkeit aus den Daten der optischen Wegmessung vor dem Verzögern des Stoßwagens (Videoanalyse). Diese Werte wurden bevorzugt zur weiteren Verwendung herangezogen. Bei Versuch 2 konnte dieser Wert aufgrund einer nicht optimalen Kameraposition nicht ermittelt werden. Es wurde der Wert der Lichtschanke herangezogen, welcher bei Versuch 1 nur um 0,08km/h (~0,6%) vom Wert der Videoanalyse abwich.

Moduldeformation:

Aus den Daten der Wegmessung wurden für beide Versuche Weg-Zeit-Diagramme erstellt (siehe Abbildung 88). Die Deformation am Modul ist an der Y-Achse in Millimetern abzulesen. Als Startpunkt der Deformation am Akkumodul wurde wieder der Zeitpunkt des Kraftanstieges gewählt, welcher den Moment des Kontaktes zwischen Modul und Impaktor darstellt.

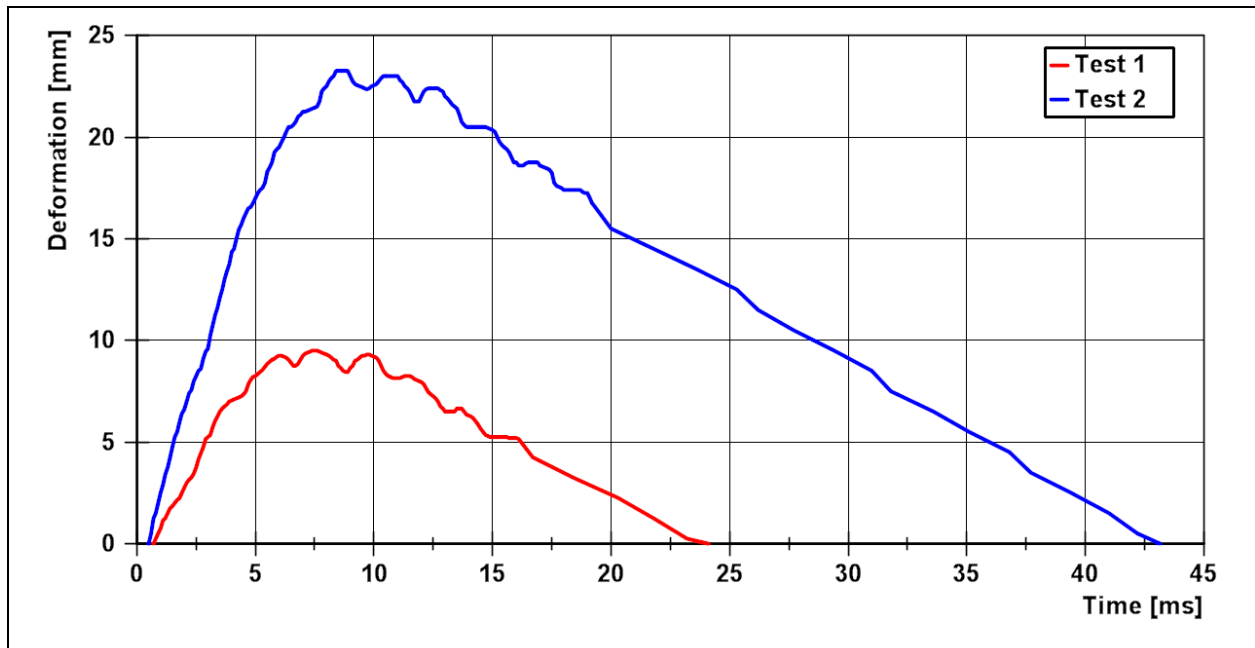


Abbildung 88: Weg-Zeit-Kurven von Versuch 1 und 2

Die maximale Modulverformung bei Versuch 1 betrug laut Auswertung der Videodaten 9,50mm. Beim schnelleren Versuch 2 wurde ein Wert 23,25mm ermittelt.

Es ist zu erkennen, dass diese Weg-Zeit-Kurven ein Schwingen im Bereich von ca. 5 bis 15ms beim ersten Versuch und von ca. 7 bis 20ms beim zweiten Versuch aufweisen. Nach nochmaliger Durchsicht des Videomaterials wurde beobachtet, dass die Referenzmarke des Maßstabes durch den harten Aufprall des Moduls auf den Impaktor stark ins Schwingen geriet und dadurch die Kurven möglicherweise verfälscht wurden. In Abbildung 89 ist eine vorstellbare Ursache der Diskrepanz schematisch dargestellt.

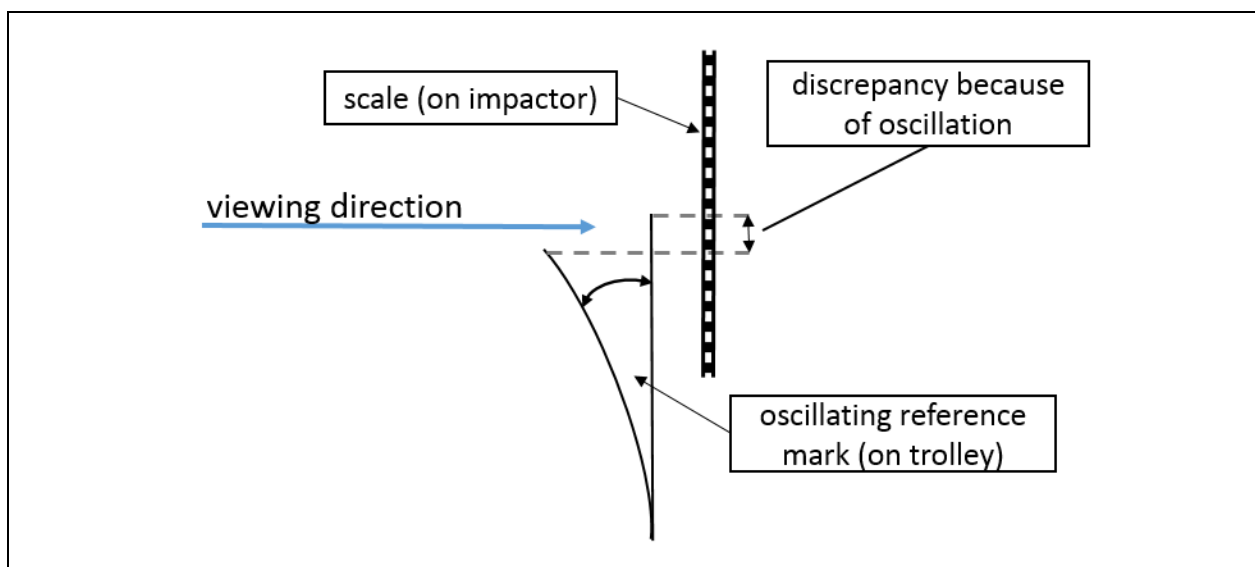


Abbildung 89: Schwingen der Referenzmarke zur Wegmessung (Blick von oben)

In der Abbildung ist zu sehen wie es möglich ist, dass durch die Auslenkung der Referenzmarke in Kombination mit der Blickrichtung der Kamera ein falscher Wert angezeigt wird. Die Referenzmarke selbst und deren Anbindung waren offensichtlich nicht steif genug. Für die weiteren Versuche wurde dieser Umstand berücksichtigt.

Krafteinwirkung am Modul:

In Abbildung 90 sind die Kraftverläufe von Versuch 1 und Versuch 2 dargestellt.

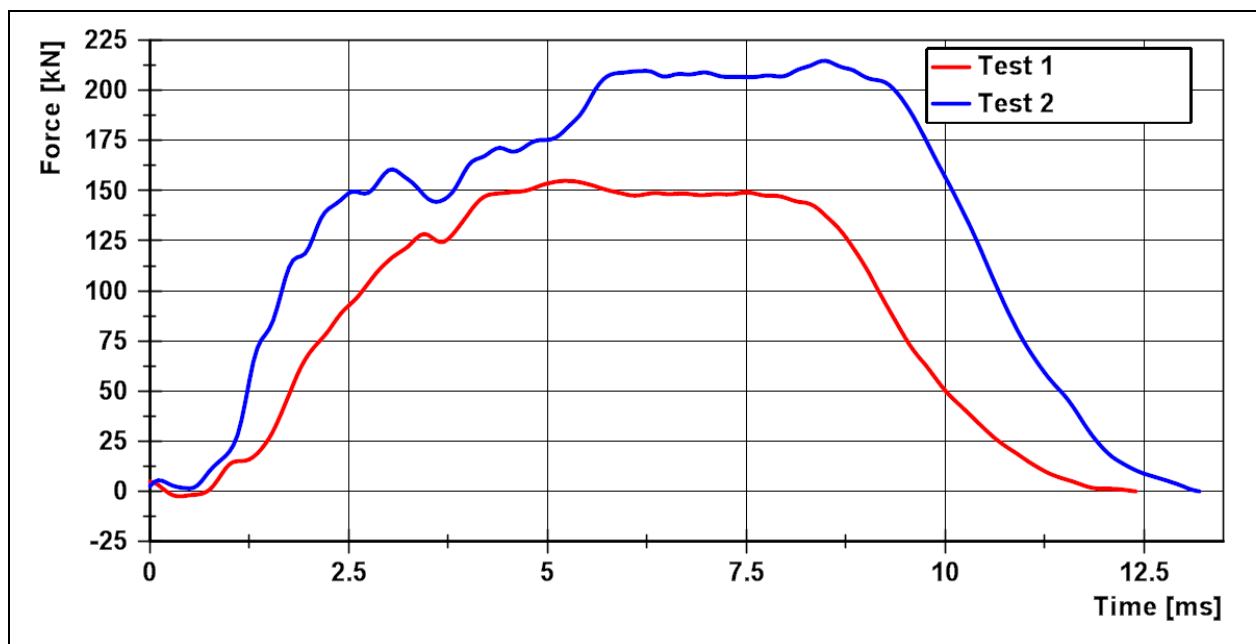


Abbildung 90: Kraft-Zeit-Kurven von Versuch 1 und 2

Als Maximalwert wurden beim ersten Versuch 155kN und beim zweiten 215kN registriert. Die Krafteinwirkung am Modul fand in einem Zeitraum von rund 12,5ms statt. Der Anstieg der Kraft erfolgte beim schnelleren Versuch 2 steiler als bei Versuch 1.

Spannungsmessung:

Während und nach den Versuchen wurden sowohl die Gesamtmodulspannung als auch die Spannung jeder einzelnen Zelle überwacht. In Abbildung 91 sind die Gesamtmodulspannungen der beiden Versuche über einen Zeitraum von 100 Millisekunden dargestellt.

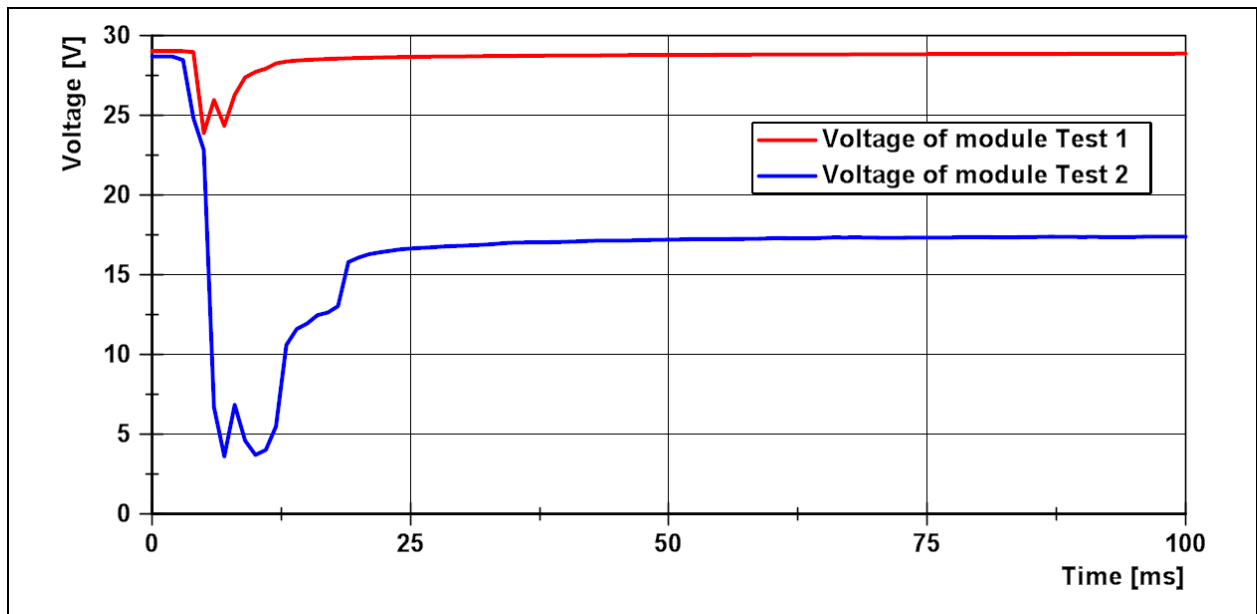


Abbildung 91: Versuch 1 und 2 - Modulspannung

Man sieht, dass die Modulspannung bei Versuch 1 während des Aufpralls kurz einbricht und sich danach wieder erholt. Dies lässt vermuten, dass am Modul kurzzeitig ein Kurzschluss auftrat. Die Ursache hierfür war höchstwahrscheinlich ein metallischer Bauteil des Moduls der eine oder mehrere Zellen durch eine kurze Berührung der Pole extern kurzgeschlossen hat. Ein bleibender Kurzschluss wurde nicht beobachtet, da die Spannung wieder nahezu auf ihren Ausgangswert anstieg.

Bei Versuch 2 fällt die Modulspannung im Moment des Aufpralls ebenfalls ab, erholt sich aber nicht mehr. Hier hat sich im Modul ein bleibender, interner Kurzschluss gebildet der zu einem „Thermal Runaway“, dem „thermischen Durchgehen“ der Akkuzellen, führen kann. Bei diesem Versuch ist dieses Ereignis nicht eingetreten, da mit hoher Wahrscheinlichkeit zu wenig Energie für eine solche Reaktion im Modul gespeichert war. Die Auswirkungen eines „Thermal Runaway“ werden im folgenden Kapitel „geladene Versuche“ gezeigt.

In Abbildung 92 ist die Aufzeichnung der Zellspannungen von Versuch 1 dargestellt. Diese verhalten sich ähnlich der Modulspannung in Abbildung 91. Nach einem kurzen Abfall der Spannungen einiger Zellen erholen sich diese schnell wieder und kehren fast – weil eine Teilentladung stattgefunden haben muss – zu ihrem Ausgangswert zurück.

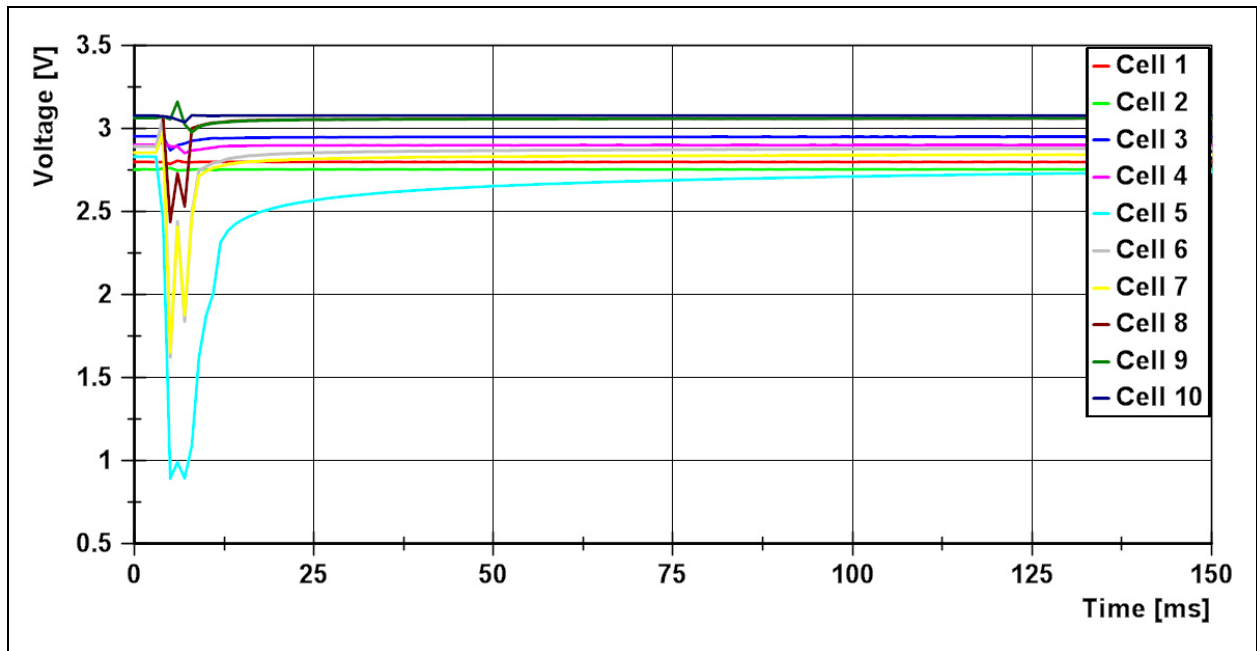


Abbildung 92: Versuch 1 – Zellspannungen

In Abbildung 93 sind die Zellspannungen von Versuch 2 dargestellt.

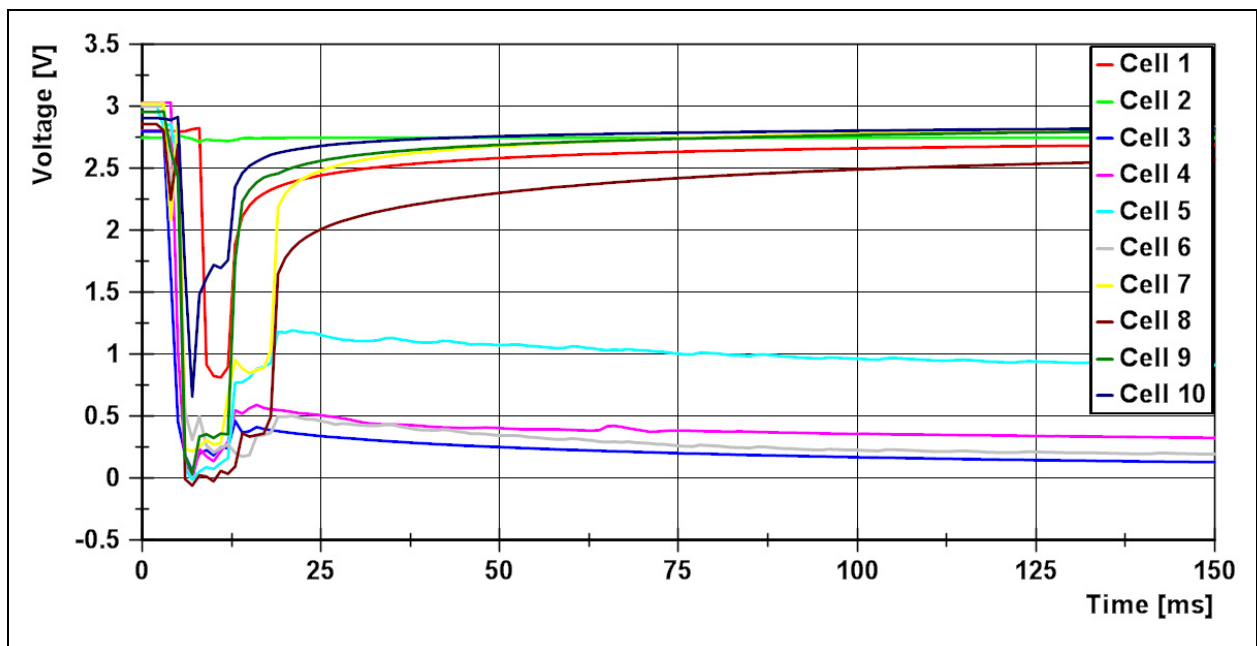


Abbildung 93: Versuch 2 – Zellspannungen

Es ist zu sehen, dass sich bei vier Zellen bleibende Kurzschlüsse gebildet haben. Betroffen waren die Zellen 3 bis 6, welche sich in der Mitte des Moduls – dort wo aufgrund der Impaktorform die größten Verformungen auftraten – befinden.

7.5.5 Auswertung der ungeladenen Versuche

Im Folgenden werden die aus den aufgezeichneten Versuchsdaten ermittelten Kraft-Weg-Kurven und die aus ihnen berechneten Deformationsenergien, die in die Akkumodule eingebracht wurden, gezeigt. Zur Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse wurde eine Vermessung der verformten Bremseinrichtung nach den Versuchen durchgeführt. Damit konnte näherungsweise auf die Maximalverformung der Module geschlossen werden.

Kraft-Weg-Kurven:

Aus den gewonnenen Daten wurden für beide Versuche Kraft-Weg-Kurven abgeleitet. In Abbildung 94 sind diese Kurven von Versuch 1 und 2 zu sehen.

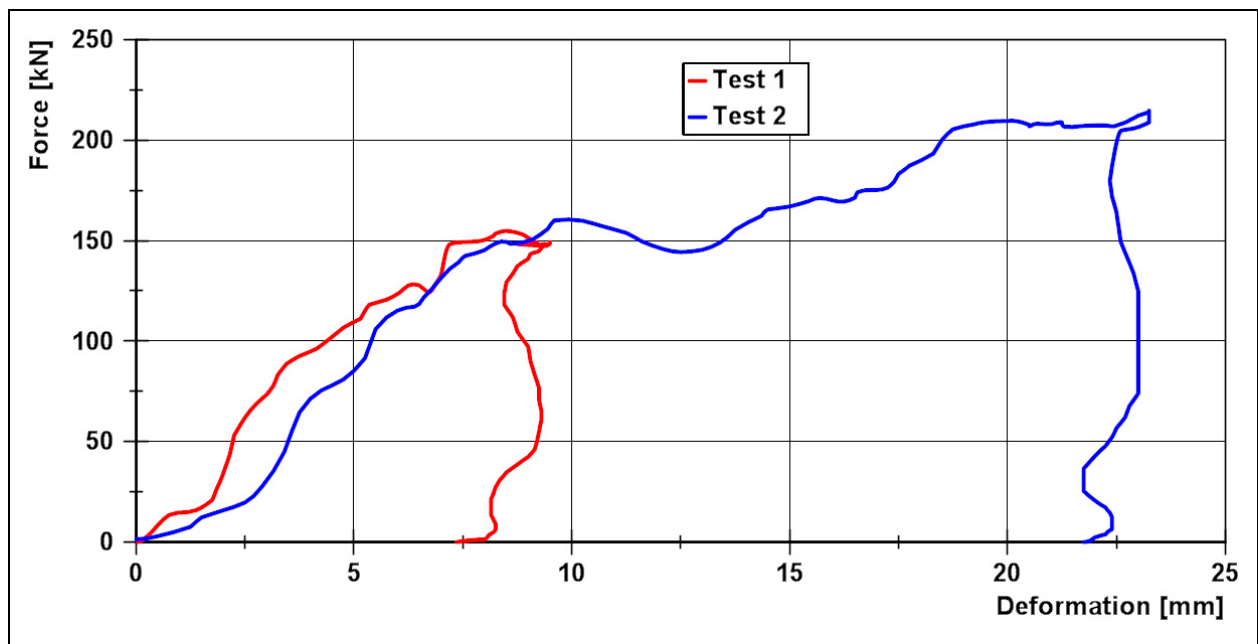


Abbildung 94: Kraft-Weg-Kurven von Versuch 1 und 2

Anstieg und Verlauf der beiden Kurven sind ähnlich, was darauf schließen lässt, dass die Unterschiede in der Versuchsgeschwindigkeit keinen wesentlichen Einfluss auf den Versuchsausgang hatten. Die maximal erreichte Kraft bei Versuch 2 betrug mit 210kN ca. 40% mehr als bei Versuch 1, die Deformation von 23,25mm war mehr als doppelt so hoch (ca. 240%). Bei Versuch 2 ist ein Plateau im Kraft-Weg-Verlauf ab 19mm Verformung zu erkennen, was auf das Reißen einer Schweißnaht am Modul zurückzuführen ist. Laut Vorsimulationen wurde hier ein weiterer Kraftanstieg erwartet.

In die Module eingebrachte Deformationsenergien:

Durch Integration der ermittelten Kraft-Weg-Kurven konnten wiederum die in das Akkumodul eingebrachten Deformationsenergien bestimmt werden.

In Abbildung 95 sind diese Energien dargestellt.

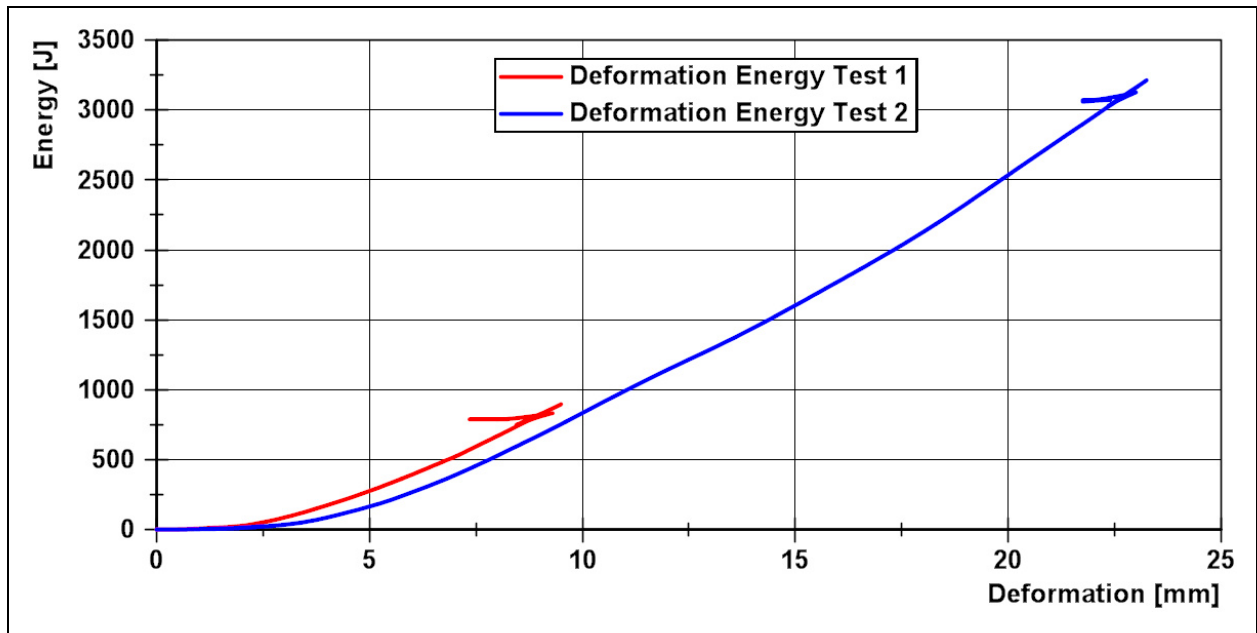


Abbildung 95: Eingebrachte Energien von Versuch 1 und 2

Bei Versuch 1 wurden 900J in das Modul eingebracht, was in etwa der geforderten Energie von einem Kilojoule entspricht. Im Vergleich zu den Inbetriebnahmeversuchen konnte diese Forderung demnach viel besser umgesetzt werden, was in der Optimierung der Auslegung der Bremseinrichtung begründet liegt. Bei Versuch 2 wurde wegen der höheren Geschwindigkeit eine weit größere Energiemenge von 3250J eingebracht.

Vermessung der Bremseinrichtung nach der ersten Versuchsreihe:

Die Bestimmung der Endverformung am Modul über die Vermessung der Stauchrohre ist keine exakte Methode, da Elastizitäten am Versuchsaufbau, vor allem in den Stauchrohrhaltern, nicht berücksichtigt werden. Zur Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse stellen diese Werte jedoch eine gute Möglichkeit dar. Die Modulverformung lässt sich durch Kenntnis des Abstandes zwischen Impaktor und Modul (vor dem Versuch) feststellen, wenn der Stoßwagen auf Kontakt mit der Bremseinrichtung steht. Dieser Abstand sollte laut Auslegung 14mm betragen, wurde jedoch bei der ersten Versuchsreihe nicht überprüft. Die Ergebnisse besitzen daher nur wenig Aussagekraft. Alle Stauchrohre der ersten Versuchsreihe wurden auf eine Ausgangslänge von 150mm vorgestaucht. In Tabelle 15 ist die Vermessung von Versuch 1 dargestellt.

Bezeichnung:	1-L	1-R
Position (in Fahrtrichtung):	Links	Rechts
Ausgangslänge:	150mm	150mm
Länge gestaucht:	123mm	125mm
Resultierende Verformung:	27mm	25mm

Tabelle 15: Versuch 1 – Stauchrohrvermessung

Die Berechnung der maximalen Modulverformung über die Stauchrohre ergibt bei Versuch 1 12mm. Dieser Wert liegt 2,5mm (+26%) über dem Wert der anhand der optischen Wegmessung ermittelt wurde. Das Schwingen der Referenzmarke, Elastizitäten sowie Abweichungen im Versuchsaufbau können Einfluss auf die Abweichung der Ergebnisse haben. In Tabelle 16 ist die Vermessung der Stauchrohre aus Versuch 2 aufgelistet.

Bezeichnung:	2-L	2-R
Position:	Links	Rechts
Ausgangslänge:	150mm	150mm
Gestauchte Länge:	113mm	115mm
Verformung:	37mm	35mm

Tabelle 16: Versuch 2 – Stauchrohrvermessung

Die Berechnung der Modulverformung über die Stauchrohrängen ergab bei Versuch 2 22mm. Dieser Wert liegt 1,25mm (-5%) unter dem Wert der optischen Wegmessung. Auch hier traten Schwingungen auf, die die Wegmessung möglicherweise verfälscht haben. Diese Werte sind unter Berücksichtigung der zahlreichen Einflussfaktoren durchaus plausibel.

7.6 Geladene Modulversuche

In einer zweiten Versuchsreihe wurden ebenfalls zwei Module getestet. Die Energiespeicher hatten einen Ladezustand von 80% SOC. Für diese Versuche musste eine Reihe von Anpassungen des Prüfaufbaus vorgenommen werden. So ist etwa am Freilufttestgelände, auf dem die Tests durchgeführt wurden, keine permanente Crashwand vorhanden. Aus diesem Grund wurde eine Barriere konstruiert die überwiegend aus Stahl-I-Trägern besteht. Die Konstruktion wurde am Testgelände in einer Betongrube, an der eine im Boden eingearbeitete Führungsschiene vorbeiführt, verankert. Diese Lösung stellt, unter Berücksichtigung von Kosten- und Zeitaufwand, einen Kompromiss dar. Ideal wäre ein massiver Crashblock mit hoher Masse wie er am Institut für Fahrzeugsicherheit der Technischen Universität Graz zur Verfügung steht. Für die prinzipiellen Betrachtungen, wie sie hier angestellt werden, ist die verwendete Barriere jedoch vollkommen ausreichend. Es fließt lediglich ein Teil der gesamten Versuchsenergie in die Crashwand die sich beim Aufprall elastisch verformt. Ebenfalls angepasst wurde die Führung des Crashwagens. Diese erfolgte in einer Schiene im Boden seitlich des Wagens. Zudem konnten einige Verbesserungen gegenüber den ungeladenen Versuchen umgesetzt werden.

7.6.1 Angepasster Prüfaufbau

In Abbildung 96 ist ein CAD-Modell des Prüfaufbaus am Freilufttestgelände dargestellt. Gut zu erkennen ist die Betongrube, in der die für die Versuche konstruierte Crashwand verankert ist. Sie stützt sich an einem Fundamentrohr, welches in der Grube fest eingearbeitet ist, ab. In der Abbildung ist auch die seitliche Führungsschiene zu sehen in welche ein Seilzugmechanismus integriert ist.

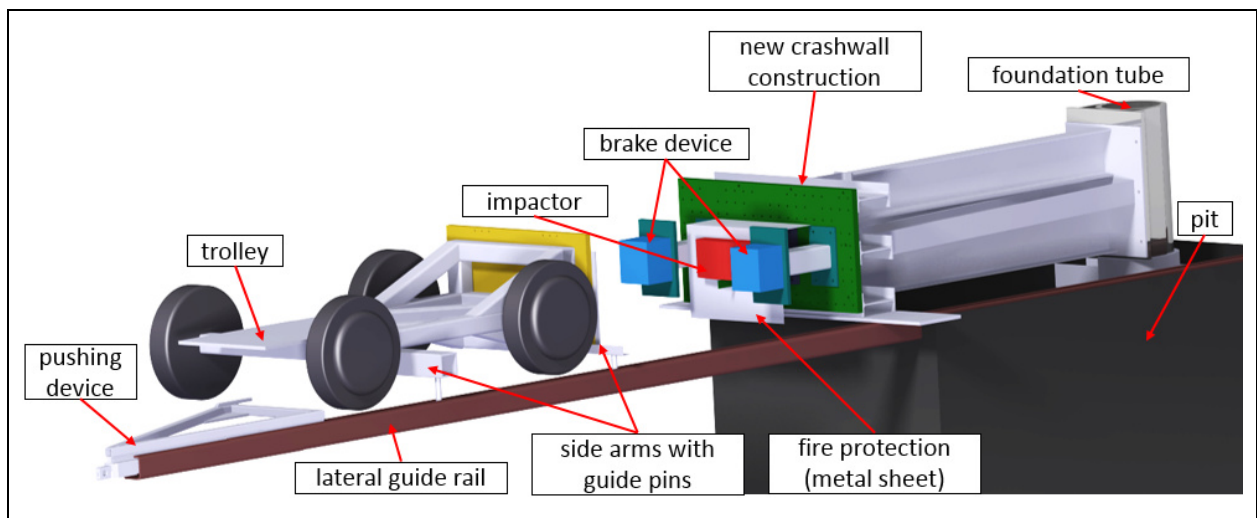


Abbildung 96: CAD-Modell des Prüfaufbaus für die geladenen Versuche

Am Wagen wurden seitlich zwei Ausleger mit Bolzen aus Stahl angebracht. Diese Bolzen führen den Stoßwagen in der Schiene bis zum Aufprall. Das seitliche Spiel beschränkt sich dadurch auf $\pm 2,5\text{mm}$ was demselben Wert, der auf der Crashanlage der Technischen Universität Graz erreicht wurde, entspricht. (siehe Abbildung 97)



Abbildung 97: Führung und Antrieb des Stoßwagens am Freilufttestgelände

Ebenfalls in der Abbildung ersichtlich ist, dass der Stoßwagen von hinten mit einem Ausleger mittig angeschoben wird. Beim Abbremsen der Seilzuganlage kurz vor dem Aufprall klinkt sich dieser Ausleger, der nur an Stahlseilen eingehängt ist, vom Stoßwagen aus und bleibt stehen. Der Wagen mit dem Modul bewegt sich indes frei rollend, durch die Schiene geführt, weiter auf den Aufbau an der Crashbarriere zu.

7.6.2 Verbesserungen zu den ungeladenen Versuchen

- Die Bremseinrichtung wurde durch Aluminiumwaben ersetzt (Aufgrund der beschriebenen Vorteile und der Verfügbarkeit der Wabenelemente).
- Bei der Spannungsmessung konnte die Abtastrate auf 5kHz gesteigert werden, um noch genauere Daten zu erhalten.
- Die Referenzmarke für die Wegmessung wurde versteift, um ein Schwingen und damit Abweichungen in den Weg-Zeit-Kurven zu minimieren.
- Die Bestimmung der exakten Startposition der Deformation am Modul wurde durch eine einfache Maßnahme zusätzlich verbessert. Vor dem Versuch wird der Stoßwagen mit Modul – bei demontierter Bremseinrichtung – auf Kontakt mit dem Impaktor vorgeschoben. Ein Standbild des Videobildes mit der Position des Wagens wird gespeichert. Bei den Vortests und der ersten Versuchsreihe (mit ungeladenen Modulen) wurde der Kraftanstieg als Startpunkt gewählt. Mit der zusätzlichen Maßnahme konnte nun überprüft werden, ob diese Werte übereinstimmen und plausibel sind.

7.6.3 Randbedingungen für die zweite Versuchsreihe

In Tabelle 17 sind die Randbedingungen für die beiden geladenen Versuche dargestellt.

Bezeichnung:	Versuch 3 & 4
Sollgeschwindigkeit:	14km/h
Bremseinrichtung:	2x Aluminiumwabenblock
Masse Stoßwagen inkl. Akkumodul:	410kg

Tabelle 17: Randbedingungen der geladenen Modulversuche

Für beide Versuche wurde eine Geschwindigkeit von 14km/h gewählt. Die Bremseinrichtung wurde aber etwas kleiner dimensioniert als noch bei den ungeladenen Versuchen, sie nimmt also weniger Energie auf. Grund dafür ist, dass beim Versuch 1 (ungeladen) und einer eingebrachten Deformationsenergie von 900J kein bleibender Kurzschluss zu beobachten war, ein solcher aber bei den geladenen Versuchen „gewünscht“ wurde, um das Verhalten der Module bei solchen kritischen Ereignissen zu untersuchen. Es wurde also mehr Energie in das Modul geleitet, damit Deformationswerte möglich sind, die einen Zellkurzschluss hervorrufen.

7.6.4 Aufgezeichnete Daten und Beobachtungen

Bei den geladenen Versuchen (Versuch 3 und 4) wurden dieselben Daten wie zuvor aufgezeichnet.

Geschwindigkeit des Stoßwagens:

Die Geschwindigkeiten des Stoßwagens vor dem Aufprall sind in Tabelle 18 dargestellt.

Bezeichnung:	Versuch 3	Versuch 4
Sollgeschwindigkeit:	14,00km/h	14,00km/h
Lichtschranke:	14,71km/h	14,51km/h
Videoanalyse:	14,78km/h	14,26km/h

Tabelle 18: Soll- und Ist-Geschwindigkeiten der zweiten Versuchsreihe

Moduldeformation:

In Abbildung 98 ist das Weg-Zeit-Diagramm der beiden Versuche dargestellt.

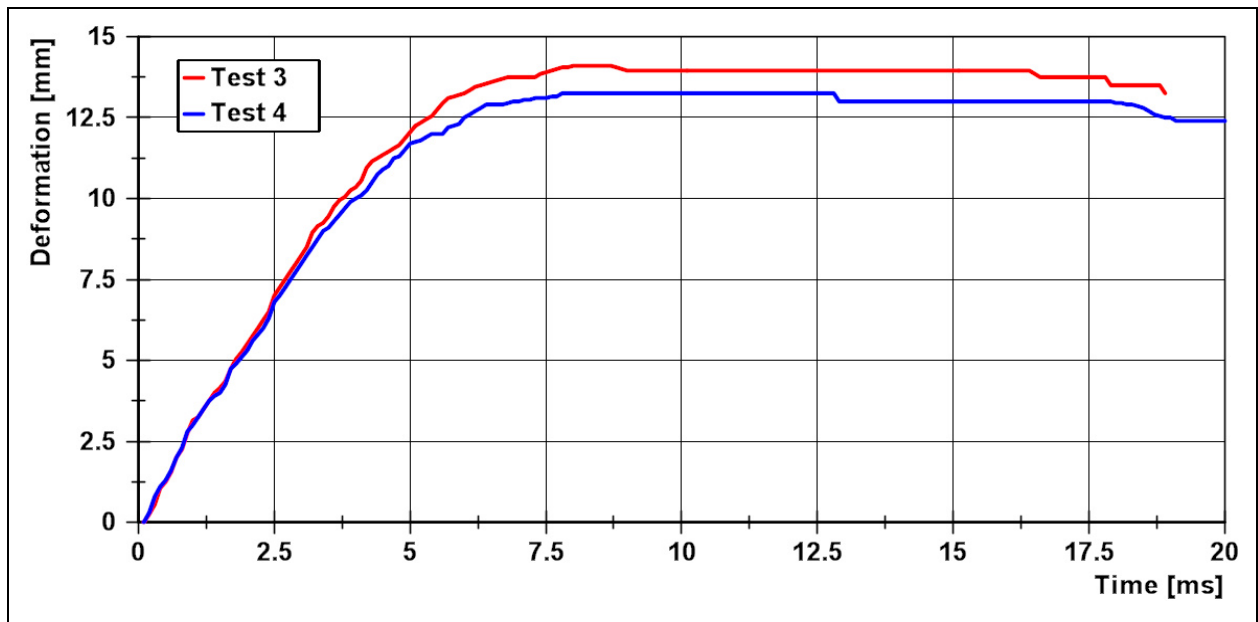


Abbildung 98: Weg-Zeit-Kurve von Versuch 3 und 4

Die maximale Verformung beim etwas schnelleren Versuch 3 (+0,5km/h bzw. +3%) beträgt 14,10mm, bei Versuch 4 beträgt sie 13,25mm. Die Verformung bei Versuch 3 liegt somit rund 6% unter dem Wert von Versuch 4. Der Anstieg der beiden Kurven ist nahezu ident. Durch die Versteifung der Referenzmarke konnte das Schwingen, welches bei den ungeladenen Versuchen auftrat, nahezu eliminiert werden. Dies stellte eine wichtige Verbesserung dar, da so die maximale Deformation zuverlässig bestimmt werden konnte. Nach Erreichen des Maximalwertes fielen die Deformationswerte nicht, wie in der ersten Versuchsreihe, sofort wieder ab. Dies liegt an der Elastizität der Crashwand. Der Wagen wird von der Crashwand „zurückgeschoben“, was in Abbildung 99 anhand der Wegmessung zu zwei verschiedenen Zeitpunkten zu sehen ist. Das Modul löst sich erst nach einer gewissen Zeit vom sich zurückbewegenden Impaktor.

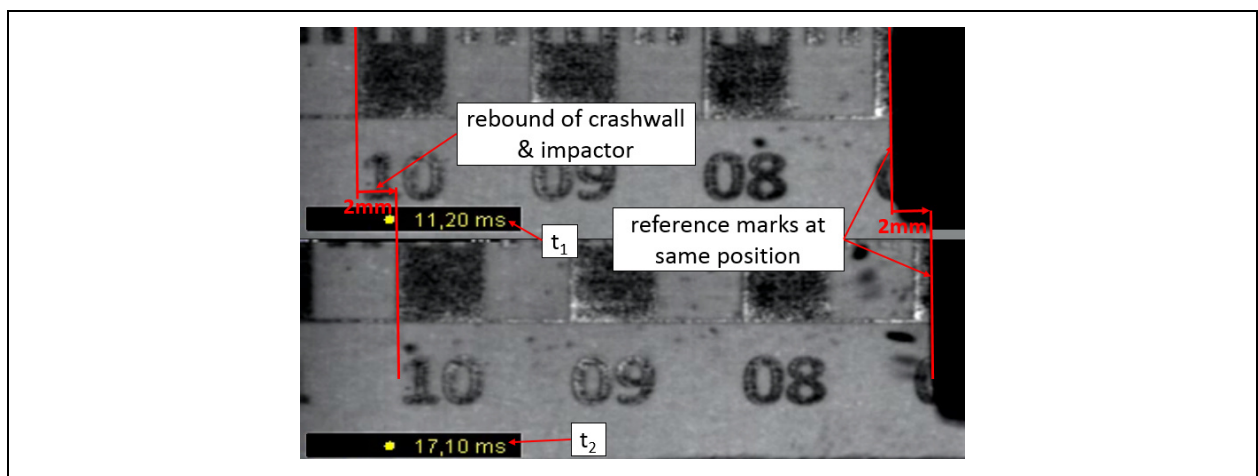


Abbildung 99: Rebound der Crashwand und „Zurückschieben“ des Stoßwagens

Krafteinwirkung am Modul:

In Abbildung 100 sind die Kraft-Weg-Kurven von Versuch 3 und 4 dargestellt. Diese unterscheiden sich, aufgrund der abweichenden Charakteristik der Crashwand, von jenen der ersten Versuchsreihe. Man erkennt die Elastizität der Barriere daran, dass der Kraftabfall fast doppelt so lange dauerte als bei den ungeladenen Versuchen (massive Crashbarriere). So lag nach dem Erreichen der Maximaldeformationen (bei einer Versuchszeit von etwa 8ms) an den Modulen immer noch Kraft an. Zum Vergleich ist dazu auch der Kraftverlauf von Versuch 1 (gleiche Sollgeschwindigkeit wie Versuch 3 und 4) aus der ersten Versuchsreihe in Abbildung 100 zu sehen.

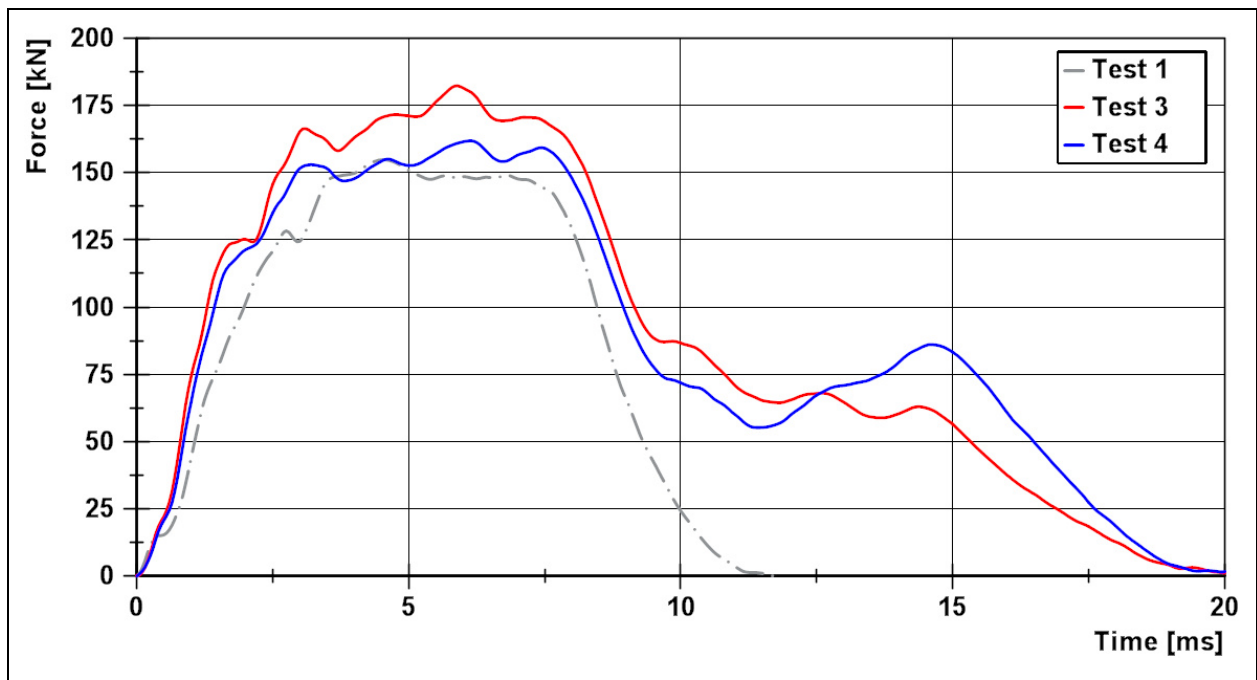


Abbildung 100: Kraft-Zeit-Kurve von Versuch 3 und 4

Die Kraftwerte lagen bei Versuch 3, aufgrund der etwas höheren Geschwindigkeit, über denen von Versuch 4. Das Maximum betrug 180kN bei Test 3 und 160kN (-11%) bei Test 4. Die Kurvencharakteristik ist bei beiden Versuchen ähnlich.

Spannungsmessung:

Die Spannungsmessung konnte gegenüber der ersten Versuchsreihe verbessert werden. Die Abtastrate wurde auf 5kHz gesteigert. Es wurden wieder sowohl die Gesamtspannung des Moduls als auch die Spannungen der Einzelzellen während und nach den Versuchen überwacht. In Abbildung 101 sind die Modulspannungen der beiden Tests über einen Zeitraum von 150ms dargestellt.

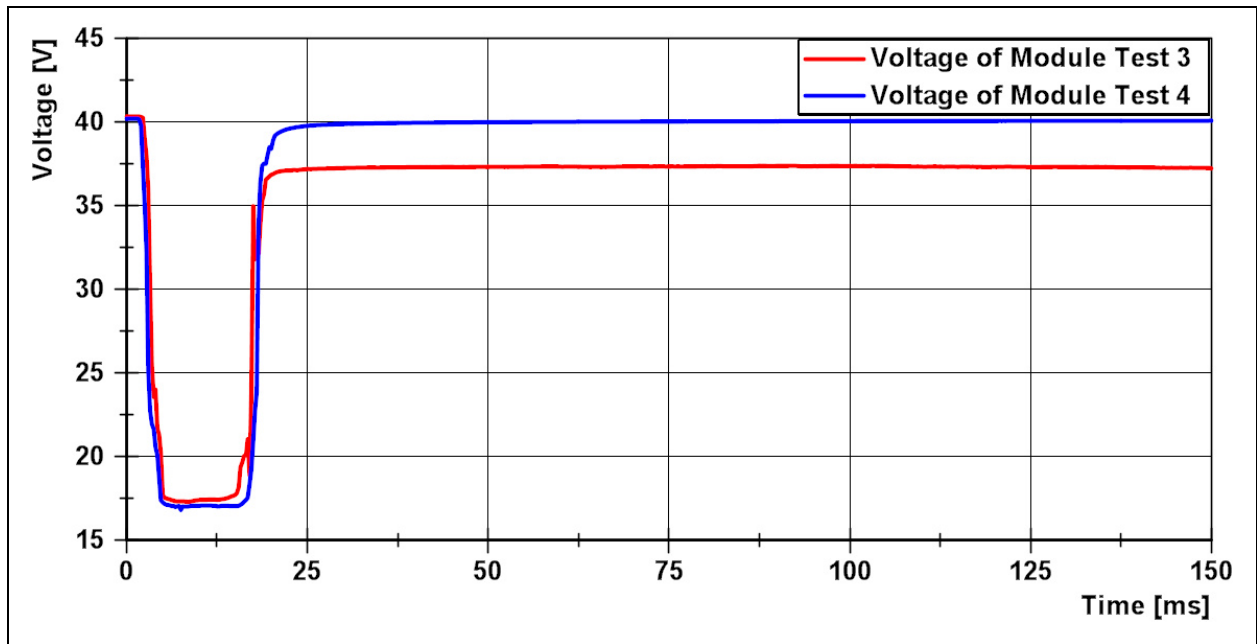


Abbildung 101: Versuch 3 und 4 – Modulspannung

Man erkennt, dass bei Versuch 3 und 4 die Spannung beim Aufprall rapide abfällt. In diesen Fällen muss – wie schon bei der ersten Versuchsreihe – von einem zeitweiligen externen Kurzschluss ausgegangen werden. Bei Versuch 4 erholt sich die Spannung wieder vollständig. Bei Versuch 3 geschieht dies nicht. Der Test hat zu einem bleibenden, internen Kurzschluss im Modul geführt, der einen „Thermal Runaway“ auslöste.

In Abbildung 102 und Abbildung 103 ist die Aufzeichnung der Zellspannungen von Versuch 3 bzw. Versuch 4 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich bei Versuch 3 neun Zellen nach einem kurzen Spannungsabfall wieder erholen. Zelle 4 hat Schaden genommen. Diese Zelle befand sich im mittleren Bereich des Moduls, wo die größten Deformationen auftraten.

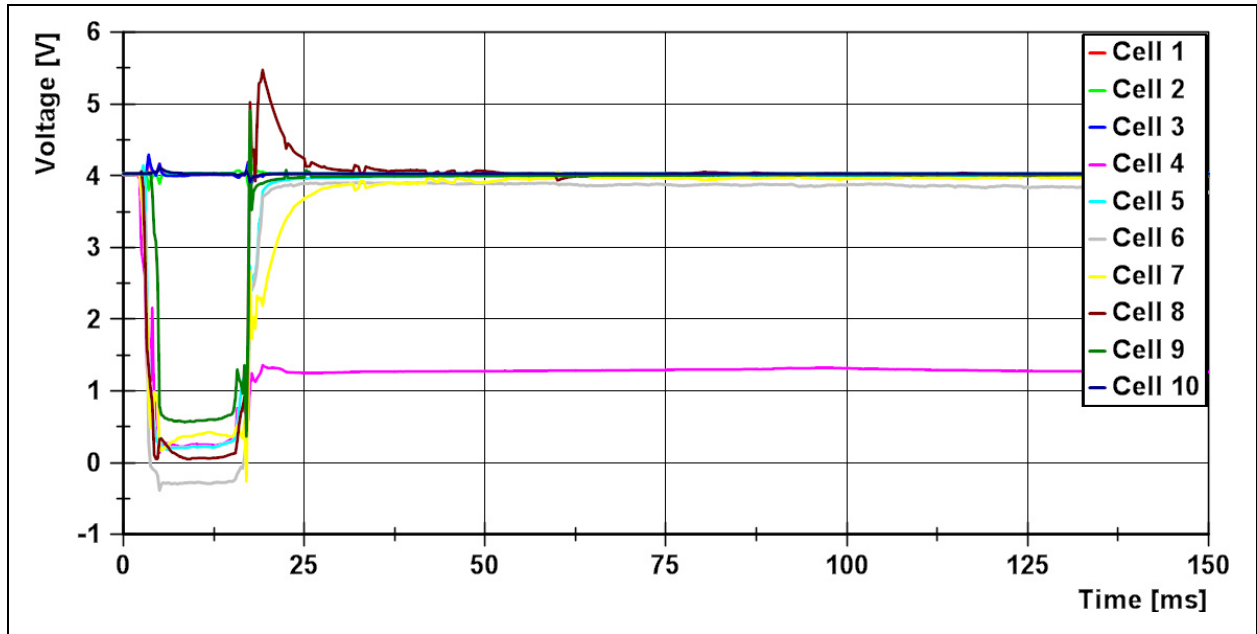


Abbildung 102: Versuch 3 – Zellspannungen

Bei Versuch 4 erholen sich nach dem Spannungsabfall alle Zellen.

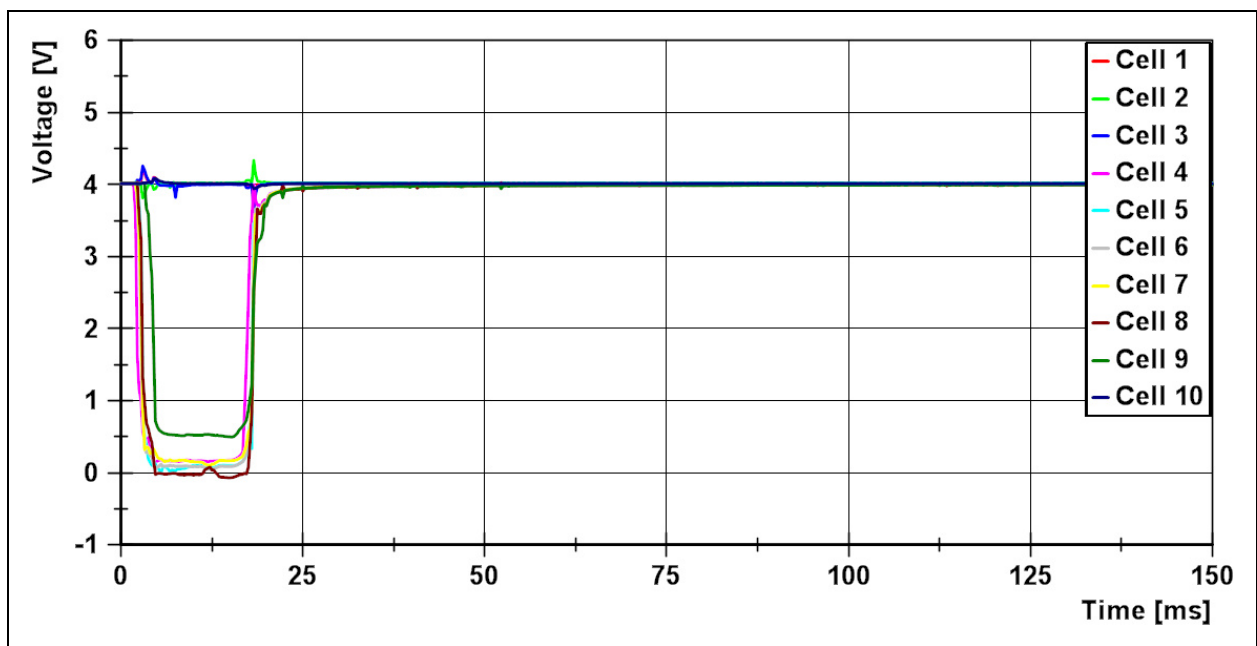


Abbildung 103: Versuch 4 – Zellspannungen

Durch den Kurzschluss bei Versuch 3 kam es zu heftigen Reaktionen der beschädigten Zelle, sie geriet in Brand. Durch das Feuer wurden auch die anderen Zellen – eine nach

der anderen – beschädigt. Das gesamte Modul brannte in einem Zeitraum von ungefähr sechs Minuten ab. Die Modulspannung über diesen Zeitraum ist in Abbildung 104 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Spannung nach und nach weiter abfällt bis sie schließlich den Wert null erreicht.

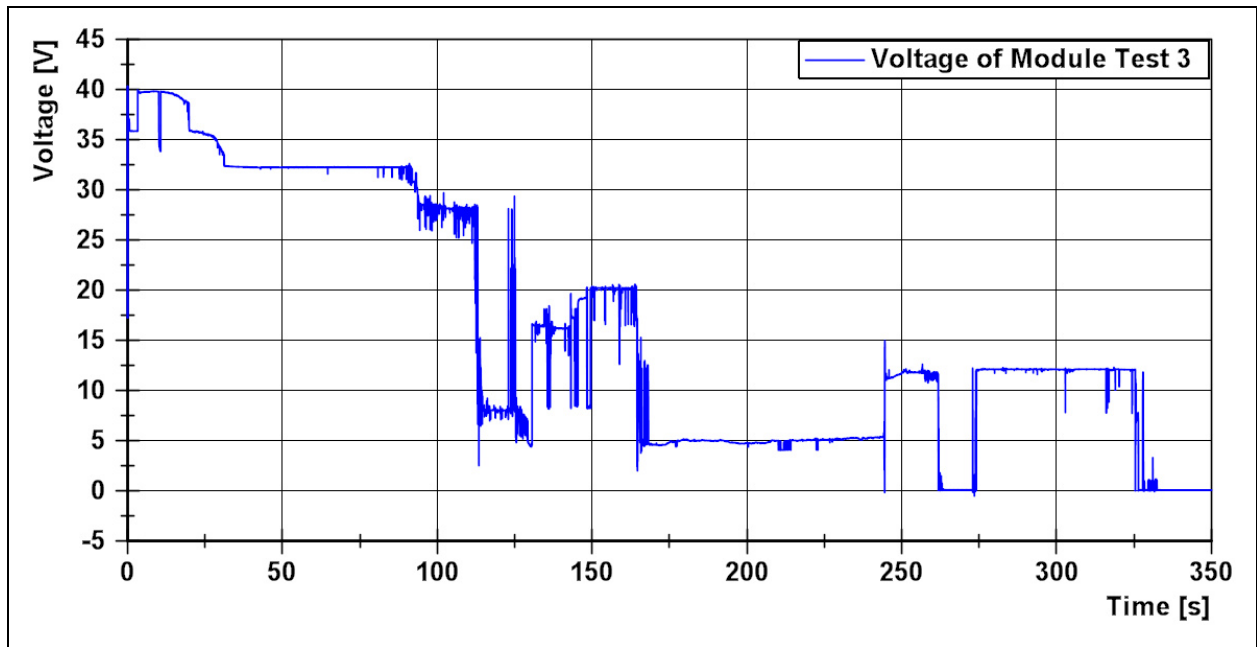


Abbildung 104: Versuch 3 – Modulspannung (langer Zeitraum)

In Abbildung 105 sind zwei Fotos zu sehen, welche die heftigen Reaktionen des Energiespeichers bei Versuch 3 zeigen. Starke Rauchentwicklung (oberes Foto) gefolgt von Stichflammen (unteres Foto) waren zu beobachten.



Abbildung 105: Reaktionen des elektrischen Energiespeichers nach Versuch 3

7.6.5 Auswertung der geladenen Versuche

Die Auswertung der Tests erfolgte nach dem gleichen Schema, das bei den Vortests bzw. den ungeladenen Versuchen angewandt wurde.

Kraft-Weg-Kurven der Versuche wurden aus den gewonnenen Daten erstellt und die in die Akkumodule eingebrachten Energien berechnet. Die Vermessung der Bremseinrichtung wurde nach dem Versuch durchgeführt. Damit konnte wieder – zur Kontrolle der Ergebnisse – grob auf die Maximalverformung der Module geschlossen werden.

Kraft-Weg-Kurven:

Für beide Versuche konnten aus den aufgezeichneten Daten Kraft-Weg-Kurven erstellt werden. Abbildung 106 zeigt diese für Versuch 3 und 4.

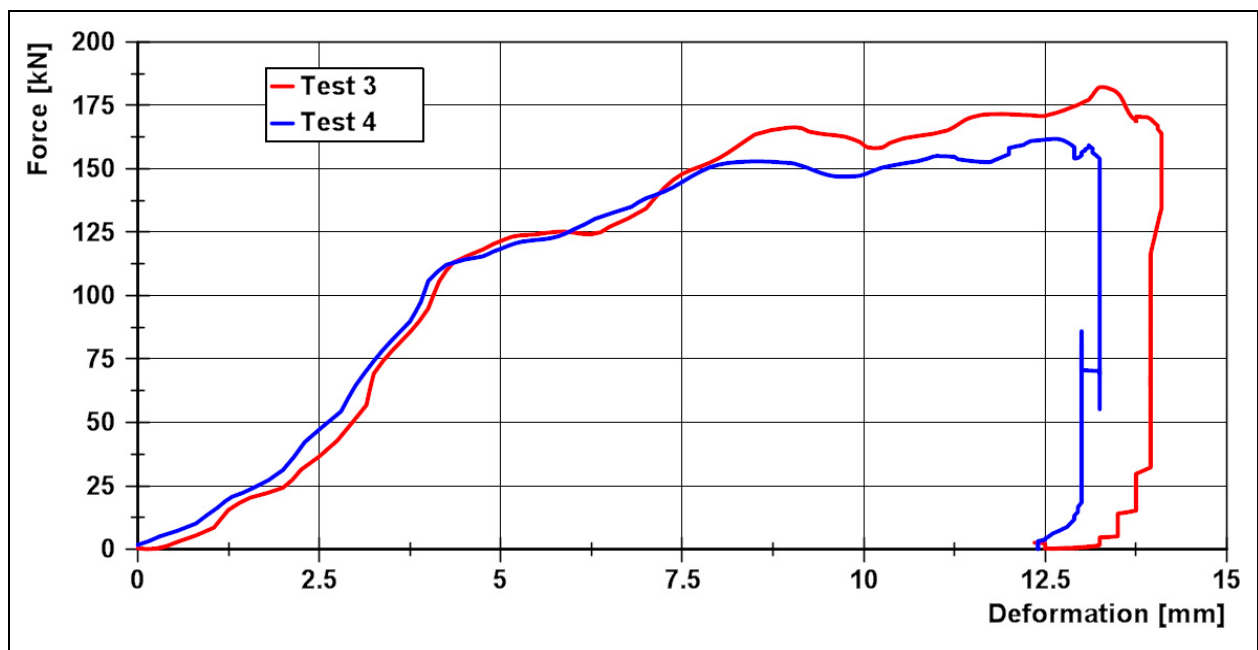


Abbildung 106: Kraft-Weg-Kurven von Versuch 3 und 4

Die durch die Kurven und die Abszisse eingeschlossenen Flächen entsprechen wiederum den in die Akkumodule eingebrachten Energien. Bis zu einer Versuchszeit von 8,5ms sind die Ergebnisse der beiden Versuche nahezu ident. Bei Versuch 3 kam es aufgrund der höheren Geschwindigkeit in weiteren Verlauf des Tests zu etwas höheren Kraft- und Deformationswerten.

In die Module eingebrachte Deformationsenergien:

Durch Integration der ermittelten Kraft-Weg-Kurven wurden wieder die in das Akkumodul eingebrachten Energien bestimmt. In Abbildung 107 sind die Energieverläufe dargestellt. Bei Versuch 3 und 4 wurden Energiemengen von etwa 1670J bzw. 1460J (-12,5%) in die Module eingebracht.

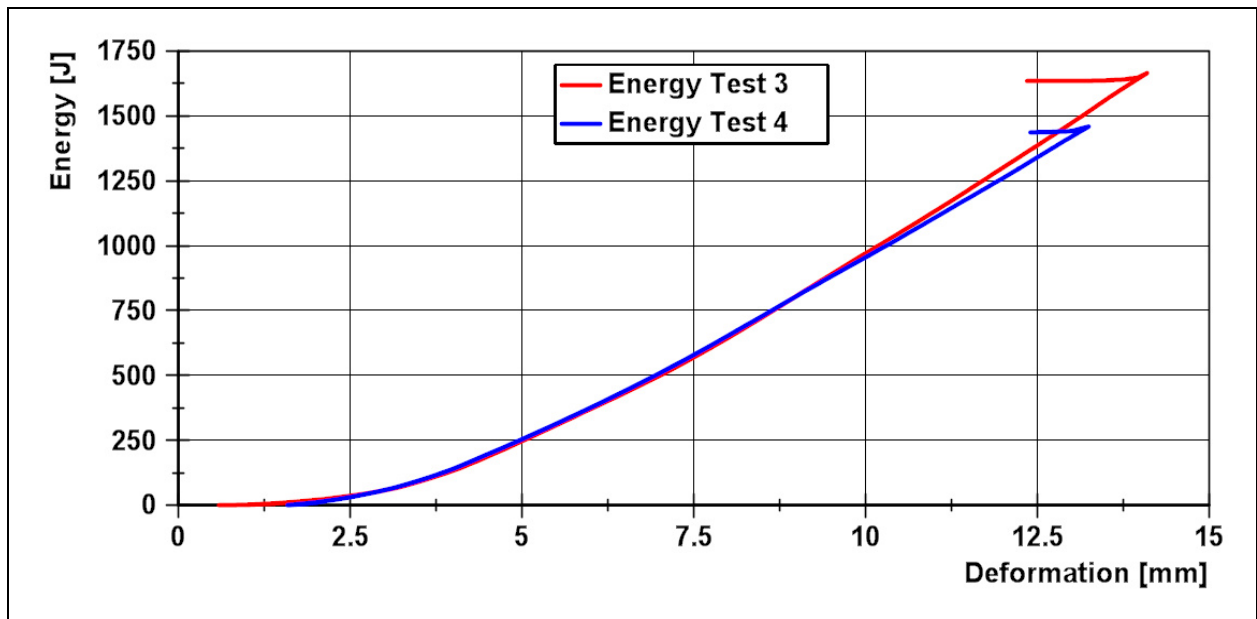


Abbildung 107: Eingebrachte Energien von Versuch 3 und 4

Während bei Versuch 4 mit 1460J und einer Moduldeformation von 13,25mm kein bleibender Kurzschluss auftrat, konnte dieses Ereignis beim dritten Versuch mit 1670J und einer Verformung von 14,10mm beobachtet werden. Der Unterschied der Verformung beträgt weniger als 1mm. Dies lässt vermuten, dass das Modul bei Versuch 4 bis kurz vor dem Auftreten eines bleibenden Kurzschlusses belastet wurde. Die kritische Belastung, die zum Versagen des Moduls führt, konnte so dem Wertebereich von Versuch 3 bis 4 zugeordnet werden. Verformungen und Energien unterhalb dieses Bereichs, so wie sie bei Versuch 1 in das Modul eingebracht wurden, stellten sich als nicht kritisch heraus. Es ist jedoch auch möglich, dass es geringfügige Unterschiede im mechanischen Verhalten unter den Modulen gibt und es dadurch zu einer Streuung der Ergebnisse kommt. Betrachtet man die Werte von Deformationsenergie und Moduldeformation aller durchgeführten Tests, so liegt die zweite Versuchsreihe zwischen den beiden Versuchen der ersten Serie mit ungeladenen Modulen.

Vermessung der Bremseinrichtung nach der zweiten Versuchsreihe:

Wie bereits bei den Stauchrohren in der ersten Versuchsreihe wurde eine Vermessung der verformten Aluminiumwabenelemente zur Plausibilitätsprüfung des mittels optischer Wegmessung generierten Maximalwertes der Modulverformung vorgenommen. In Tabelle 19 sind die Ergebnisse von Versuch 3 dargestellt.

Bezeichnung:	L121 04 N	R118 06 N
Position (in Fahrtrichtung):	Links	Rechts
Ausgangslänge:	121mm	118mm
Gestauchte Länge:	91,5mm	89,5mm
Resultierende Verformung:	29,5mm	28,5mm

Tabelle 19: Versuch 3 – Wabenvermessung

Nach Abzug des Abstandes zwischen Modul und Impaktor (16mm) ergibt sich für Versuch 3 laut Vermessung eine Modulverformung von 13mm. Verglichen zur Verformung, die mit der Wegmesseinrichtung gemessen wurde, beträgt die Differenz in etwa 1mm. Die Werte sind plausibel. Tabelle 20 zeigt die Ergebnisse von Versuch 4.

Bezeichnung:	L121 03 N	R118 07 N
Position (in Fahrtrichtung):	Links	Rechts
Ausgangslänge:	121mm	118mm
Gestauchte Länge:	92mm	90mm
Verformung:	29mm	28mm

Tabelle 20: Versuch 4 – Wabenvermessung

Der Abstand zwischen Modul und Impaktor betrug 16,50mm. Es ergibt sich somit ebenfalls eine Modulverformung von 13,00mm. Die gemessene Verformung beträgt 13,25mm – die Werte stimmen also sehr gut überein und wurden daher als plausibel erachtet.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel der Diplomarbeit war es, eine dynamische Prüfumgebung zu entwickeln, mit der die mechanischen Eigenschaften von Hochvoltbatteriemodulen in frühen Projektphasen – getrennt vom Gesamtfahrzeug aber mit ähnlichen Randbedingungen – untersucht werden können. Aufbauend auf einer Ist-Stand-Analyse von derzeit bestehenden Prüfumgebungen und Normen wurde ein Konzept ausgearbeitet, aufgebaut und damit – unter Einhaltung von Sicherheitsvorkehrungen – erfolgreich Versuche mit Akkumodulen unter Realbedingungen durchgeführt. Das Konzept ist einfach aufgebaut und flexibel. Die Methode kann also auf verschiedene Akkumodule und Lastkonfigurationen angewandt werden.

Lastfälle für die durchzuführenden Versuche wurden durch eine Analyse der Belastungen, die auf einen elektrischen Energiespeicher im Fahrzeug wirken können, definiert. Es ist mit der vorgestellten Prüfvorrichtung möglich, realistische Belastungen, die bei Unfällen wirken, getrennt vom Gesamtfahrzeug auf ein Akkumodul wirken zu lassen, dabei das Verhalten der Li-Ionen Technologie im Crashfall zu untersuchen und wichtige Daten für die Validierung von Simulationsmodellen aufzuzeichnen. Zu diesen Daten zählen Kraft-Weg-Diagramme, Videomaterial und die Informationen aus der Spannungsmessung zur Kurzschlussdetektierung.

8.1 Durchgeführte Versuche

Zwei Versuchsreihen mit jeweils zwei Akkumodulen wurden erfolgreich durchgeführt. Mit den Erkenntnissen aus Vortests und der ersten Versuchsreihe konnten zahlreiche Verbesserungen des Prüfaufbaus umgesetzt werden. Kraft-Weg-Kurven für die Validierung von Simulationsmodellen konnten von allen Versuchen abgeleitet werden. Dass eine im Vorhinein definierte Energiemenge in das Akkumodul eingebracht werden kann, wurde bereits in der ersten Versuchsreihe mit den ungeladenen Modulen nachgewiesen. Bei Versuch 2 konnten 900J in das Modul eingebracht werden, was in etwa einem Kilojoule (der Forderung aus dem Lastfall) entspricht. Dies wurde bereits ohne die Verbesserungen für die zweite Versuchsreihe erreicht. Leider konnte für die Freiluftversuche nicht auf einen massiven Crashblock zurückgegriffen werden, um die verbesserte Genauigkeit zu demonstrieren. Die Nachgiebigkeit der Crashwand stellt eine zusätzliche Unbekannte dar, welche in der Simulation des Prüfaufbaus berücksichtigt werden muss. Für die grundsätzlichen Beobachtungen (es sollte ein Zellkurzschluss zur Untersuchung der Reaktionen des Energiespeichers herbeigeführt werden) war jedoch – trotz dieser Einschränkung – auch die zweite Versuchsreihe gut geeignet.

Um die Effektivität aller Verbesserungen zu zeigen, wäre eine dritte Versuchsreihe mit einer starren Crashwand notwendig gewesen. Dies war aus zeitlichen Gründen im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht möglich.

Bei den Versuchen 2 und 3 konnten Zellkurzschlüsse beobachtet werden. Mit der umfangreichen Spannungsmessung war es möglich, den Zeitpunkt des Kurzschlusses festzustellen. Bei Versuch 3 wurden heftige Reaktionen nach dem Versuch beobachtet, welche zum Abbrand des gesamten Moduls geführt haben.

8.2 Verbesserungsmöglichkeiten

Die Versuche haben die grundsätzliche Funktion des Prüfkonzeptes bewiesen und es wurden sowohl nach den Vortests als auch nach der ersten Versuchsreihe zahlreiche Verbesserungen in das Prüfkonzept integriert. Es bleibt aber noch Raum für Weiterentwicklungen, so z.B. bei der Ableitung von Belastungsszenarien.

8.2.1 Lastfälle

Die Simulationsmatrix für die Gesamtfahrzeugsimulationen zum Ableiten von Belastungen auf die Energiespeicher umfasst in dieser Arbeit vier Konfigurationen. Diese Matrix lässt sich fast beliebig weiter ausbauen. Es können z.B. bei anderen Einbaulagen der Akkumodule auch Heckcrashkonfigurationen simuliert werden. Ebenso können Realunfallszenarien in die Betrachtungen miteinbezogen werden.

Im Optimalfall führt man solche Simulationen mit einem Finite-Elemente-Modell eines Elektrofahrzeuges durch. Damit sind die realitätsnahesten Ergebnisse zu erwarten. Dies kann z.B. im Entwicklungsprozess geschehen um verschiedene Einbaulagen zu untersuchen. So könnten die Energiespeicher auch Belastungen ausgesetzt werden, die in Crashzonen auf sie wirken. Steht ein solches Fahrzeugmodell zur Verfügung, ist es möglich, daraus direkt Belastungen abzuleiten, um dann Versuche durchzuführen. Es soll durch die damit einhergehende Verbesserung von Simulationsmodellen in Zukunft möglich sein, teilweise auf aufwendige und teure Tests mit Gesamtfahrzeugen zu verzichten.

Ebenfalls können Überlegungen zur Einspannung des Akkumoduls angestellt werden. Bisher wurde von einem „Worst-Case“-Szenario ausgegangen. Das heißt, dass die gesamte Energie in ein einziges Akkumodul fließt und das Modul mit seiner Rückwand an der starren Aufspannplatte des Stoßwagens anliegt. Um hier realistischere Verhältnisse zu schaffen, wäre es möglich die Lagerung der Module mehr an die im Pack vorgesehene anzupassen (z.B. die Platzierung zweier Akkumodule hintereinander). Man muss jedoch bedenken, dass dadurch die Randbedingungen für Simulationsmodelle bzw. der Versuchsaufbau ebenfalls komplexer werden.

8.2.2 Barriere

Um wirklich exakte Ergebnisse zu erhalten, ist es unumgänglich für die Versuche eine starre Barriere mit massivem Crashblock zu verwenden. Die zweite Versuchsreihe – auf einem Freiluftgelände ohne diese Einrichtung – hat ergeben, dass Energie, aufgrund der Nachgiebigkeit, in die Konstruktion der Barriere fließt. Es handelt sich dann um eine weitere Unbekannte deren Einfluss schwer abzuschätzen ist und die im Simulationsmodell des Prüfaufbaus berücksichtigt werden muss.

8.2.3 Messtechnik

Für die Wegmessung bietet sich die Verwendung eines Lasermesssystems an. Solche Systeme arbeiten hochpräzise und sind für hochdynamische Anwendungsfälle bestens geeignet. Da das Ablesen von Daten nicht notwendig ist, ist der Zeitaufwand bei der Auswertung von Versuchsdaten erheblich geringer. Zudem ist die Möglichkeit von Ablesefehlern nicht mehr gegeben. Diese Variante der Wegmessung ist jedoch mit hohen Kosten verbunden.

Eine weitere mögliche Verbesserung stellt der Einsatz von zwei zusätzlichen Kraftmesselementen an den beiden Bremseinrichtungen dar. Somit könnten alle Energieflüsse im Versuch genau ausgewertet werden. Ebenfalls könnte so der genaue Auftreffzeitpunkt des Wagens auf die Bremseinrichtung ermittelt werden. Man hätte dann noch mehr Parameter für die Validierung der Simulationsmodelle zur Verfügung.

8.3 Ausblick

Um zu sehen, ob sich das in dieser Arbeit entwickelte Prüfkonzept bewährt, wäre nun der nächste Schritt, die gesamte Vorgehensweise in den Entwicklungsprozess eines Elektro- oder Hybridfahrzeugs bzw. dem eines elektrischen Energiespeichers einzugliedern. Die Prüfumgebung könnte angepasst werden, um damit beispielsweise Versuche auf Packebene durchzuführen. Die aufgezeigten Verbesserungsvorschläge sollten dabei berücksichtigt und das Sicherheitskonzept weiter verbessert werden. Um zuverlässige Ergebnisse mit einer neuen Prüfmethode zu erhalten, bedarf es eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses.

9 Literaturverzeichnis

- [1] M. Lienkamp, „Elektromobilität - Hype oder Revolution?“, München, 2012.
- [2] J. Richter und D. Lindenberger, „Potenziale der Elektromobilität bis 2050 - Eine szenarienbasierte Analyse der Wirtschaftlichkeit, Umweltauswirkungen und Systemintegration“, Köln, 2010.
- [3] PwC - PricewaterhouseCoopers, Fraunhofer LBF und FH FFM, „Elektromobilität - Normen bringen die Zukunft in Fahrt“, 2012.
- [4] BMW Group et al., „Ergebnisse Feldversuch. Modellregion Elektromobilität München.“, München, 2011.
- [5] ZEIT ONLINE GmbH, „Brennendes Elektroauto: GM kämpft gegen Imageschaden an“, 13. Dezember 2011. [Online]. Available: <http://www.zeit.de/auto/2011-12/elektroauto-brand-chevrolet-volt>. [Zugriff am 24. September 2013].
- [6] ChinaAutoWeb, „Three BYD e6 Passengers Killed in Fiery Crash, Spurring EV Safety Concern“, 27. Mai 2012. [Online]. Available: <http://chinaautoweb.com/2012/05/three-byd-e6-passengers-killed-in-fiery-crash-spurring-ev-safety-concern/>. [Zugriff am 24 September 2013].
- [7] Tesla Motors, Inc., „Tesla Model S Achieves Best Safety Rating Of Any Car Ever Tested“, 13. August 2013. [Online]. Available: <http://www.teslamotors.com/about/press/releases/tesla-model-s-achieves-best-safety-rating-any-car-ever-tested>. [Zugriff am 27. September 2013].
- [8] Tesla Motors, Inc., „Technische Daten und Standfeatures des Model S“, [Online]. Available: http://www.teslamotors.com/de_CH/models/specs. [Zugriff am 27. September 2013].
- [9] Tesla Motors, Inc., „Model S Fire, Blog“, 4. Oktober 2013. [Online]. Available: <http://www.teslamotors.com/blog/model-s-fire>. [Zugriff am 29. Oktober 2013].
- [10] derStandard.at GmbH, „Tesla-Aktie bricht nach Feuer in E-Flitzer ein“, 3. Oktober 2013. [Online]. Available: <http://derstandard.at/1379292960540/Vorfahrt-auf-Norwegens-Strassen-befluegelt-E-Mobil>. [Zugriff am 29. Oktober 2013].

- [11] Johnson Controls Inc., „Lithium-Ion Battery Modules“, Februar 2012. [Online]. Available:
http://www.johnsoncontrols.com/content/us/en/products/power_solutions/products/lithium-ion_technology1/modules.html. [Zugriff am 29. Oktober 2013].
- [12] Underwriters Laboratories Inc., „UL Standard for Safety for Lithium Batteries.“, 1999.
- [13] D. H. Doughty und C. C. Crafts, „Freedom Car. Electrical Energy Storage System Abuse Test Manual for Electric and Hybrid Electric Vehicle Applications“, Sandia National Laboratories, USA, 2006.
- [14] United Nations, „Recommendations On The Transport Of Dangerous Goods ST/SG/AC.10/11/Rev.5“, New York und Genf, 2009.
- [15] International Organization for Standardization, „ISO 12405-1:2011 (E): Electrically propelled road vehicles — Test specification for lithium-ion traction battery packs and systems — Part 1: High-power applications“, Genf, 2011.
- [16] W. Sinz, „Concepts for Mechanical Abuse Testing of High-Voltage Batteries“, SAE International, 2012.
- [17] D. Shi, X. Xiao, W. Wu, X. Huang und H. Kia, „Stress Analysis of the Separator in a Lithium-Ion Battery“, SAE Technical Paper 2011-01-0670, 2011.
- [18] L. Wech, R. Richter und R. Justen, „Crash Safety Aspects Of HV Batteries For Vehicles“, Paper No 11-0302, Deutschland, 2011.
- [19] CETECOM, „Abuse Tests: Crashbahn“, [Online]. Available:
<https://www.cetecom.com/fileadmin/files/images/Testing/Battery/Crashbahn.png>. [Zugriff am 02. November 2013].
- [20] CETECOM, „Crash test bench“, [Online]. Available:
<https://www.cetecom.com/fr/testing/environmental-simulation/crash-test-bench.html>. [Zugriff am 16. November 2013].
- [21] CETECOM, „Abuse Tests: Penetration“, [Online]. Available:
<https://www.cetecom.com/fileadmin/files/images/Testing/Battery/Penetration.png>. [Zugriff am 02. November 2013].

- [22] S. Heindl, „Entwicklung eines makroskopischen Finite Elemente Modells einer 18650 Li-Ionen Zelle für Crashbelastungen“, Graz, 2013.
- [23] NCAC - National Crash Analysis Center, „Development & Validation of a Finite Element Model for the 2010 Toyota Yaris Passenger Sedan“, Ashburn, Virginia, 2011.
- [24] NCAC - National Crash Analysis Center NCAC, „2010 Toyota Yaris FE Model“, Ashburn, Virginia, 2011.
- [25] Volvo Car Group Corporate Communications, „Volvo Car Group Global Media Newsroom - Volvo C30 Electric battery box“, 08. Juni 2011. [Online]. Available: <https://www.media.volvocars.com/image/low/38550/1/5>. [Zugriff am 13. Oktober 2013].
- [26] Volvo Car Group Corporate Communications, „Volvo Car Group Global Media Newsroom - Battery installation“, 08. Juni 2011. [Online]. Available: <https://www.media.volvocars.com/image/low/38544/1/5>. [Zugriff am 13. Oktober 2013].
- [27] J. Bakker, R. Justen, C. Sachs, F. Friesen, D. Otte und L. Hannawald, „Analysis of Fuel Cell Vehicles Equipped with Compressed Hydrogen Storage Systems from a Road Accident Safety Perspective“, DOI: 10.4271/2011-01-0545, SAE 2011 World Congress & Exhibition, 2011.
- [28] Euro NCAP, „Seitenaufprall auf einen Pfahl“, [Online]. Available: <http://de.euroncap.com/Content-Web-Page/37060e34-ae52-41de-8add-b9b65e52188b/seitenaufprall-auf-einen-pfahl.aspx>. [Zugriff am 23. Oktober 2013].
- [29] Euro NCAP, „Pole Side Impact“, [Online]. Available: <http://www.euroncap.com/Content-Web-Page/90769bbc-bb74-4129-a046-e586550c3ece/pole-side-impact.aspx>. [Zugriff am 17. September 2013].
- [30] Euro NCAP, „Frontal Impact“, [Online]. Available: <http://www.euroncap.com/tests/frontimpact.aspx>. [Zugriff am 22. Oktober 2013].
- [31] U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, „Laboratory Test Procedure For New Car Assessment Program Frontal Impact Testing“, Washington, USA, 2012.

- [32] C. Ellersdorfer, „Entwicklung eines Crash-Ersatzversuches für Hochvoltbatteriemodule zur Absicherung der virtuellen Entwicklung“, Grazer Symposium Virtuelles Fahrzeug, 2013.
- [33] Hexcel Composites, „HexWeb™ Honeycomb Attributes and Properties“, 1999. [Online]. Available: http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Honeycomb_Attributes_and_Properties.pdf. [Zugriff am 21. Oktober 2013].

10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kritische Faktoren für den Erfolg von Elektromobilität [3].....	1
Abbildung 2: Beispiel für ein Akkumodul der Firma Johnson Controls [11]	4
Abbildung 3: Schematische Darstellung eines Impact-Tests [13].....	9
Abbildung 4: Schematische Darstellung eines Falltests [14].....	10
Abbildung 5: Testkonfiguration mit feststehendem Impaktor [19].....	14
Abbildung 6: Testkonfiguration mit bewegtem Impaktor [19].....	14
Abbildung 7: Batterietests des TÜV Süd mit bewegtem Impaktor [19]	15
Abbildung 8: Verschiedene Impaktorformen mit variabler Masse (TÜV Süd) [19].....	15
Abbildung 9: Dynamische Prüfumgebung der Firma CETECOM [20]	17
Abbildung 10: Reaktionen einer Zelle während eines Nagelpenetrationstests [22].....	18
Abbildung 11: Vorgehensweise zur Durchführung von Modulversuchen	23
Abbildung 12: Original und Finite-Elemente-Modell des „Toyota Yaris 2010“ (Limousine) [23]	25
Abbildung 13: Mögliche Einbaulagen eines Akkupacks im Modell des Toyota Yaris 2010	26
Abbildung 14: Einfluss der Impaktorform auf den Versuchsausgang	27
Abbildung 15: Elektrische Energiespeicher im Mitteltunnel des VOLVO C30 Electric [25] [26]	28
Abbildung 16: CAD-Modell eines Akkumoduls mit 10 Zellen.....	29
Abbildung 17: Fiktive Unterbringung der Akkupacks im Fahrzeugmodell.....	29
Abbildung 18: Vergleich von Intrusionen bei Crash-Tests und realen Unfällen [27].....	31
Abbildung 19: Seitenaufprall auf einen Pfahl nach Euro-NCAP [29]	33
Abbildung 20: Simulationsmodell des Euro-NCAP-Pfahl-Seitenaufpralltests	33
Abbildung 21: Simulationsmodell Toyota Yaris beim Pole-Seitenaufprall (Blick von unten)	34
Abbildung 22: Pfahl-Seitenaufprall – Vergleich der Intrusion am FE-Modell „Toyota Yaris“ mit Intrusionen aus genormten Crashtests und realen Unfällen	34

Abbildung 23: Knotenpunkte zur Auswertung der Deformationen am Mitteltunnel für den Lastfall „Euro-NCAP-Pfahl-Seitenaufprall“	35
Abbildung 24: Überlagerung des verformten mit dem nicht-verformten Mitteltunnel („Euro-NCAP-Pfahl-Seitenaufprall“)	35
Abbildung 25: In den Mitteltunnel eingebrachte Deformationsenergie beim „Euro-NCAP-Pfahl-Seitenaufpralltest“	36
Abbildung 26: Relative Verformung der betrachteten Knotenpunkte für die Konfiguration „Euro-NCAP-Pfahl-Seitenaufprall“	37
Abbildung 27: „Euro-NCAP-Pfahl-Seitenaufpralltest“ – dreidimensionale Darstellung der Deformationen der Knotenpunkte	37
Abbildung 28: Relativgeschwindigkeit der Knotenpunkte („Euro-NCAP-Pfahl-Seitenaufpralltest“)	38
Abbildung 29: Theoretische Impaktorform für Lastfall „Euro-NCAP-Pole-Seitenaufprall“	39
Abbildung 30: Frontalaufprall nach Euro-NCAP und USA-IIHS [30].....	40
Abbildung 31: IIHS Test CEF0610 – Vergleich zwischen realem Crashtest (links) und Simulationsmodell des Validierungstests (rechts) [24]	40
Abbildung 32: Simulationsmodell für den Lastfall „Euro-NCAP-Frontalaufprall mit 64km/h“	41
Abbildung 33: Auswahl der Knotenpunkte zur Auswertung von Verformungen am Mitteltunnel für den Lastfall „Euro-NCAP-Frontalaufprall mit 64km/h“	41
Abbildung 34: Überlagerung des verformten und des nicht verformten Mitteltunnel für den Lastfall „Euro-NCAP-Frontalaufprall mit 64km/h“	42
Abbildung 35: In den Mitteltunnel beim Lastfall „Euro-NCAP-Frontalaufprall“ eingebrachte Energie	42
Abbildung 36: „Euro-NCAP-Frontalaufprall“ – Verformung der betrachteten Knotenpunkte	43
Abbildung 37: „Euro-NCAP-Frontalaufprall“ – dreidimensionale Darstellung der Deformation der Knotenpunkte	44
Abbildung 38: „Euro-NCAP-Frontalaufprall“ – Geschwindigkeit der Knotenpunkte	44
Abbildung 39: Theoretische Impaktorform Lastfall „Euro-NCAP-Frontalaufprall 64km/h“	45
Abbildung 40: Frontalaufprall nach „US-NCAP“ [31]	46

Abbildung 41: „NHTSA Test 5677“ – Vergleich des Validierungs-Crashtest (links) mit der Simulation (rechts) [24]	46
Abbildung 42: „US-NCAP-Frontalaufprall“ – Simulationsmodell	47
Abbildung 43: „US-NCAP-Frontalaufprall“ – Überlagerung des verformten und des nicht verformten Mitteltunnel	47
Abbildung 44: „US-NCAP-Frontalaufprall“ – in den Mitteltunnel eingebrachte Deformationsenergie	48
Abbildung 45: „US-NCAP-Frontalaufprall“ – Verformungen der Knotenpunkte	48
Abbildung 46: „US-NCAP-Frontalaufprall“ – dreidimensionale Darstellung der Deformationen der Knotenpunkte	49
Abbildung 47: „US-NCAP-Frontalaufprall“ – Geschwindigkeiten der Knotenpunkte	49
Abbildung 48: Theoretische Impaktorform für den Lastfall „US-NCAP-Frontalaufprall“	50
Abbildung 49: Schematische Darstellung des Frontalaufpralls nach NHTSA [31]	51
Abbildung 50: „NHTSA-Test 6069“ - Gegenüberstellung realer Crashtest (links) und Simulation (rechts) [24]	51
Abbildung 51: „NHTSA-Frontalaufprall mit 40km/h“ – Überlagerung des verformten (rot) mit dem nicht verformten Mitteltunnel (grau)	52
Abbildung 52: „NHTSA-Frontalaufprall mit 40 km/h“ – in den Mitteltunnel eingebrachte Deformationsenergie	52
Abbildung 53: „NHTSA-Frontalaufprall mit 40km/h“ – Deformationen der Knotenpunkte	53
Abbildung 54: „NHTSA-Frontalaufprall mit 40km/h“ – dreidimensionale Darstellung der Deformationen der Knotenpunkte	53
Abbildung 55: „NHTSA-Frontalaufprall mit 40km/h“ – Geschwindigkeiten der Knotenpunkte	54
Abbildung 56: Theoretische Impaktorform Lastfall „NHTSA-Frontalaufprall 40km/h“	54
Abbildung 57: Prinzip zur zeitlichen Abfolge des Wirkens von Beschleunigung und Deformation	56
Abbildung 58: Möglichkeiten mit aktuellen Prüfumgebungen und neue Anforderungen [32]	58
Abbildung 59: Skizze von Konzept 1	59
Abbildung 60: Skizze von Konzept 2	60

Abbildung 61: Skizze von Konzept 3.....	61
Abbildung 62: Zeitlicher Ablauf des Versuchskonzeptes.....	64
Abbildung 63: Aufteilung der kinetischen Energie in Bremsenergie und Deformationsenergie.....	65
Abbildung 64: CAD-Modell des grundsätzlichen Prüfaufbaus ohne Impaktor	66
Abbildung 65: CAD-Modell des verwendeten Stoßwagens.....	66
Abbildung 66: Komponenten an der Crashwand.....	67
Abbildung 67: Stauchrohr aus Stahl nach einem Versuch	68
Abbildung 68: Typischer Kraft-Weg-Verlauf eines Stauchrohres aus Stahl.....	69
Abbildung 69: Aluminium-Honigwabenstruktur in Blockform	70
Abbildung 70: Typischer Kraft-Weg-Verlauf einer Aluminium-Honigwabe [33].....	71
Abbildung 71: Positionierung der Videotechnik	72
Abbildung 72: Funktionsweise des optischen Wegmesssystems.....	74
Abbildung 73: Maßstab und Referenzmarke zur Erstellung von Weg-Zeit-Kurven	75
Abbildung 74: Videobild der Wegaufzeichnung.....	75
Abbildung 75: Crashanlage des Vehicle Safety Institutes der Technischen Universität Graz	79
Abbildung 76: Freilufttestgelände zur Durchführung der Versuche mit geladenen Modulen	80
Abbildung 77: Impaktor für den Lastfall „Euro-NCAP-Pfahl-Seitenaufprall“.....	82
Abbildung 78: Belastung des Moduls im Versuch (Lastfall „Euro-NCAP-Pfahl- Seitenaufprall“).....	82
Abbildung 79: Prüfaufbau eines Inbetriebnahmeversuches vor dem Test	84
Abbildung 80: Schaltplan für die Spannungsmessung beim Inbetriebnahmeversuch ...	85
Abbildung 81: Aufbau eines Inbetriebnahmeversuches nach dem Test.....	85
Abbildung 82: Weg-Zeit-Kurven der Inbetriebnahmeversuche.....	86
Abbildung 83: Kraft- und Spannungsverläufe der beiden Inbetriebnahmeversuche.....	87
Abbildung 84: Kraft-Weg-Kurven der Inbetriebnahmeversuche	88
Abbildung 85: In die Aluminiumwaben eingebrachte Energien bei den Inbetriebnahmeversuchen.....	88

Abbildung 86: CAD-Modell des Prüfaufbaus der Versuche mit ungeladenen Akkumodulen	91
Abbildung 87: Prüfaufbau für Versuche mit ungeladenen Akkumodulen	91
Abbildung 88: Weg-Zeit-Kurven von Versuch 1 und 2.....	93
Abbildung 89: Schwingen der Referenzmarke zur Wegmessung (Blick von oben).....	93
Abbildung 90: Kraft-Zeit-Kurven von Versuch 1 und 2	94
Abbildung 91: Versuch 1 und 2 - Modulspannung.....	95
Abbildung 92: Versuch 1 – Zellspannungen.....	96
Abbildung 93: Versuch 2 – Zellspannungen.....	96
Abbildung 94: Kraft-Weg-Kurven von Versuch 1 und 2.....	97
Abbildung 95: Eingebrachte Energien von Versuch 1 und 2	98
Abbildung 96: CAD-Modell des Prüfaufbaus für die geladenen Versuche	100
Abbildung 97: Führung und Antrieb des Stoßwagens am Freilufttestgelände.....	101
Abbildung 98: Weg-Zeit-Kurve von Versuch 3 und 4.....	103
Abbildung 99: Rebound der Crashwand und „Zurückschieben“ des Stoßwagens	103
Abbildung 100: Kraft-Zeit-Kurve von Versuch 3 und 4	104
Abbildung 101: Versuch 3 und 4 – Modulspannung.....	105
Abbildung 102: Versuch 3 – Zellspannungen.....	106
Abbildung 103: Versuch 4 – Zellspannungen.....	106
Abbildung 104: Versuch 3 – Modulspannung (langer Zeitraum)	107
Abbildung 105: Reaktionen des elektrischen Energiespeichers nach Versuch 3.....	107
Abbildung 106: Kraft-Weg-Kurven von Versuch 3 und 4.....	108
Abbildung 107: Eingebrachte Energien von Versuch 3 und 4	109

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einteilung von Prüfverfahren nach UL1642 [13]	7
Tabelle 2: EUCAR-Hazard-Levels [14].....	8
Tabelle 3: Simulationsmatrix zur Ermittlung von Randbedingungen	32
Tabelle 4: Randbedingungen für Lastfall „Euro-NCAP-Pfahl-Seitenaufprall“	39
Tabelle 5: Randbedingungen des Lastfalles „Euro-NCAP-Frontalaufprall“	45
Tabelle 6: Randbedingungen des Lastfalles „Frontalaufprall nach US-NCAP“	50
Tabelle 7: Randbedingungen des Lastfalles „Frontalaufprall nach NHTSA 40km/h“.....	54
Tabelle 8: Ergebnisse aller ausgewerteten Gesamtfahrzeugsimulationen	55
Tabelle 9: Subjektive Bewertung der Konzepte.....	63
Tabelle 10: Technische Daten des Stoßwagens	67
Tabelle 11: Randbedingungen des Lastfalls „Euro-NCAP-Pole-Seitencrash“	81
Tabelle 12: Randbedingungen des Inbetriebnahmeversuchs	83
Tabelle 13: Randbedingungen der ersten Versuchsreihe	90
Tabelle 14: Soll- und Ist-Geschwindigkeiten der ersten Versuchsreihe	92
Tabelle 15: Versuch 1 – Stauchrohrvermessung	99
Tabelle 16: Versuch 2 – Stauchrohrvermessung	99
Tabelle 17: Randbedingungen der geladenen Modulversuche	102
Tabelle 18: Soll- und Ist-Geschwindigkeiten der zweiten Versuchsreihe	102
Tabelle 19: Versuch 3 – Wabenvermessung.....	110
Tabelle 20: Versuch 4 – Wabenvermessung.....	110

12 Abkürzungsverzeichnis

BMW	Bayrische Motoren Werke
bps	Bilder pro Sekunde
BYD	Build Your Dreams (chinesischer Automobilhersteller)
CAD	Computer Aided Design
CEO	Chief Executive Officer
CO ₂	Kohlendioxid
E	Energie
EES	elektrischer Energiespeicher
EUCAR	European Council for Automotive Research & Development
FE	Finite-Elemente
g	Erdbeschleunigung
IIHS	Insurance Institute for Highway Safety
ISO	International Organization for Standardization
J	Joule
kg	Kilogramm
kHz	Kilohertz
kJ	Kilojoule
km/h	Kilometer pro Stunde
kN	Kilonewton
kWh	Kilowattstunde
Li-Ion	Lithium-Ionen
LiPF ₆	Lithiumhexafluorophosphat
LKW	Lastkraftwagen
LSTC	Livermore Software Technology Corporation
<i>m</i>	Masse
m	Meter
m/s	Meter pro Sekunde

mAh	Milliamperestunde
MDB	Movable Deformable Barrier
mm	Millimeter
ms	Millisekunde
N	Newton
NCAC	National Crash Analysis Center
NCAP	New Car Assessment Programme
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration
ODB	Offset Deformable Barrier
PwC	PricewaterhouseCoopers
s	Sekunde
SOC	State Of Charge
TU Graz	Technische Universität Graz
TÜV	Technischer Überwachungsverein
UL	Underwriters Laboratories
UN	United Nations
USA	United States of America
V	Volt
v	Geschwindigkeit
ZEDATU	Zentrale Datenbank zur Tiefenanalyse von Verkehrsunfällen