



Christoph Knauder

Entwicklung einer Prüfumgebung zur Untersuchung der mechanischen Eigenschaften von lithiumbasierenden Batterien

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

Durchgeführt am Institut für Fahrzeugsicherheit
Technische Universität Graz-Dekanat für Maschinenbau

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

Betreuer: Dipl.-Ing. Christian Ellersdorfer

Graz, Oktober 2012



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.

STATUTORY DECLARATION

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

Graz, am

(Unterschrift)

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

Danksagung

Großer Dank gebührt meinem Betreuer Dipl. Ing. Christian Ellersdorfer für die umfang- sowie ideenreiche Unterstützung bei der Bearbeitung der vorliegenden Diplomarbeit. Außerordentlicher Dank gebührt Dipl. Ing. Helmut Wurm für die vielen Ratschläge, informativen und interessanten Gespräche sowie die steuerungs- und messtechnische Betreuung meiner Diplomarbeit.

Meinen Dank möchte ich auch den Mitarbeitern des Instituts für Fahrzeugsicherheit aussprechen, welche meine Motivation bei der Bearbeitung der Diplomarbeit durch das sehr angenehme Arbeitsklima wesentlich beeinflussten.

Vielen Dank an Dipl. Ing. Christian Ellersdorfer, Dipl. Ing. Dr. techn. Wolfgang Sinz, Dipl. Ing. Dr. techn. Gregor Gstrein und Mag. Angelika Gruber-Marin für die weiterleitenden Gedanken, zahlreichen Bemerkungen und Ausbesserungen beim Korrekturlesen meiner Arbeit.

Prof. Hermann Steffan danke ich für die Gelegenheit, meine Arbeit am Institut für Fahrzeugsicherheit durchführen zu können.

Nicht zuletzt gilt mein größter Dank meinen Eltern, die zu jeder Zeit und bei jedem Anliegen hinter mir standen, mich unterstützten und mir das Studium erst ermöglichten.

Kurzfassung

Globale Erderwärmung, Feinstaubbelastung und andere Auswirkungen der Verbrennung von fossilen Brennstoffen beschäftigen derzeit unter anderem die Entwicklung von Fahrzeugen weltweit. Um das große Ziel der drastischen Reduktion des CO₂ Ausstoßes von Kraftfahrzeugen im Betrieb zu erreichen, sind technische Evolutionen in vielen Teilbereichen notwendig. Aus diesem Grund werden neben der Optimierung von klassischen Verbrennungskraftmaschinen auch alternative Antriebskonzepte entwickelt und weiter optimiert. Vor allem dem Hybrid-Antrieb von Fahrzeugen, aber auch dem rein elektrischen Antrieb, kommt eine immer größer werdende Bedeutung zu, da der CO₂ Ausstoß vollständig bzw. bei Hybridantrieben in großem Ausmaß im Fahrbetrieb vermieden werden kann. Sowohl bei der Entwicklung von Hybridsystemen als auch bei den rein elektrisch betriebenen Fahrzeugen scheinen derzeit Lithium-Ionen Batterien als Energiespeicher die vielversprechendste Variante. Lithium-Ionen Akkumulatoren haben auf Grund ihrer hohen Zellspannungen und der hohen Energiedichte im Vergleich zu anderen Batterietechnologien das größte Potential als Energiespeicher für Fahrzeuge. Bei der fahrzeugsicherheitstechnischen Betrachtung unter mechanischen Belastungen müssen für diese Energiespeicher geeignete Prüfverfahren und -vorrichtungen eingesetzt werden, um Versuche laut der Normung durchführen zu können. Neben den gesetzlichen Betrachtungen sind auch Untersuchungen mit Hilfe von numerischen Simulationen und Experimenten unerlässlich. Dadurch können rechnergestützt Eigenschaften der Batteriezellen abgebildet werden und dadurch in der virtuellen Fahrzeugentwicklung eingesetzt werden.

Gerade die experimentelle Untersuchung der mechanischen Belastbarkeit von Lithium-Ionen Akkus ist noch Neuland, aber auch Grundlage für die Validierung von prognosefähigen Simulationsmodellen. Das Durchführen von Versuchen an geladenen Batteriezellen birgt, auf Grund der brennbaren Bestandteile von Lithium-Ionen Batterien, wie etwa dem Elektrolyten, Gefahren. Der „Thermal Runaway“ von Batteriezellen kann beispielsweise bis zur Explosion oder einem Brand der Energiespeicher führen. Unter diesem Effekt wird ein selbstverstärkender Prozess bei welchem Wärme produziert wird, verstanden, der bei Lithium-Ionen Batterien beispielsweise durch einen internen Kurzschluss auftreten kann. Deshalb muss neben der Prüfvorrichtung auch die Prüfumgebung für diese Extremfälle ausgelegt werden.

Ziel dieser vorliegenden Diplomarbeit ist die Entwicklung einer Prüfumgebung, welche diese speziellen Anforderungen erfüllt. Neben der Durchführbarkeit von genormten Versuchen muss die Anlage vor allem für Tests unter erweiterten Randbedingungen geeignet sein, welche sich durch Versuche für die Validierung der numerischen Simulation ergeben. Für das Durchführen von ungeladenen und geladenen Batterieversuchen im quasi-statischen Belastungsfall muss des Weiteren auch eine geeignete Steuerung zur Betätigung der Prüfvorrichtung entwickelt werden. Durch die entwickelte Steuerung ist ein automatisierter Versuchsablauf möglich, welcher einen bestmöglichen Schutz des Bedienpersonals vor austretenden Gasen und Partikeln, Feuer und Explosionen gewährleistet. Neben der sicheren Versuchsdurchführung soll die Steuerungsentwicklung eine sehr hohe Reproduzierbarkeit der Versuche ermöglichen. Dabei kommt ein integriertes Mess- und Steuerungssystem zur Einstellung der Kraft und der Vorschubgeschwindigkeit eines doppelseitig wirkenden Hydraulikzylinders sowie zur hochgenauen Messdatenerfassung zum Einsatz. Versuche an geladenen und ungeladenen Lithium-Ionen Batterien haben gezeigt, dass alle Anforderungen mit der entwickelten Anlage sehr gut erfüllt werden können.

Abstract

Global warming, fine dust and other noxious effects of burning fossil fuels are a great deal to current vehicle development. In order to reduce CO₂ emitted by cars, technical evolutions in many fields are required. Besides the optimization of conventional internal combustion engines, alternative propulsion technologies are developed.

Hybrid and fully electric vehicles gain importance in the fight for reduced CO₂ emissions. Both, in hybrid systems as well as in fully electric vehicles, lithium-ion battery-technology is the most promising electrical energy storage technology. High cell voltage and high energy density - compared to other battery technologies - make lithium-ion batteries the most promising solution for use in vehicles.

For mechanical testing in vehicle safety, appropriate test methods and devices are required to conduct experiments meeting normative or legislative requirements.

The experimental study of the mechanical stability of lithium-ion batteries, which is also the basis for the validation of numerical models, still is uncharted territory. Experiments with charged battery cells have inherent risks, due to combustible components of lithium-ion batteries. A 'thermal runaway', which is a self-reinforcing process in which heat is produced due to an internal short circuit, eventually can lead to explosion or fire. Therefore, test-rig and environment have to be designed appropriately for withstanding these extreme conditions.

Aim of the present thesis is the development of a test rig and environment for mechanical testing of batteries. The test rig shall be capable of conducting most legislative and normative tests as well as tests needed to validate numerical models. For conduction of quasi-static tests with uncharged and charged battery specimens, a user-friendly control-unit is developed. The control-unit allows fully automated testing, providing the highest possible protection to the operator from venting gases, fire and explosion. Further, the control-unit provides highest reproducibility. An integrated measurement and control system is used for accurate data acquisition and for adjusting the force and the feed speed of a double-sided acting hydraulic cylinder. Experiments on charged and uncharged lithium-ion batteries have shown that the developed test-rig is meeting all the requirements mentioned before.

Inhaltsverzeichnis:

1	Einleitung und Ziel der Arbeit	1
2	Theorie / Grundlagen	4
2.1	Aufbau und Funktion einer Batterie	4
2.1.1	Grundsätzlicher Aufbau	4
2.1.2	Zellchemie.....	7
2.1.3	Zellenausführungen	8
2.2	Einteilung von Missbrauchstests an Traktionsbatterien für Fahrzeuge	9
2.2.1	Normen und gesetzliche Bestimmungen	11
2.2.2	Vorgeschriebene mechanische Prüfverfahren an Lithium-Ionen Batterien	11
2.2.3	Nicht vorgeschriebene mechanische Prüfverfahren an Lithium-Ionen Batterien	16
2.3	Gefahrenquellen beim Testen von lithiumbasierenden Traktionsbatterien	17
3	Ableitung von Anforderungen an die zu entwickelnde Prüfumgebung und Lastenhefterstellung	21
3.1	Abgeleitete Anforderungen an die zu entwickelnde Prüfvorrichtung	21
3.2	Die verwendete Lithium-Ionen Batterie	23
3.3	Durchführung von Prinzipversuchen zur Erstellung eines Lastenheftes.....	24
3.3.1	Erkenntnisse aus den Prinzipversuchen in Bezug auf die mechanischen Eigenschaften der Werkstattpresse:	30
3.3.2	Erkenntnisse aus den Prinzipversuchen in Bezug auf die Steuerungs- und Messtechnik:	31
3.4	Das Lastenheft für die Entwicklung der Prüfvorrichtung:	34
3.4.1	Konzeptionelle Auslegungen der mechanischen Komponenten	37
3.4.2	Konzeptionelle Auslegungen der steuerungs- und messtechnischen Komponenten	44
4	Auslegung und Konstruktion der Prüfvorrichtung.....	48
4.1	Anforderungen an eine statische Prüfvorrichtung	48
4.1.1	Gründe für die Eigenkonstruktion	49
4.2	Konstruktion der mechanischen Komponenten	50
4.2.1	Rahmenkonstruktion:	50
4.2.2	Zylinderanbindung:.....	54
4.2.3	Untersuchung des Gesamtdeformationsverhaltens der Prüfvorrichtung	58
4.3	Komponenten der Prüfvorrichtung.....	59
4.3.1	Die mechanischen Komponenten der Prüfvorrichtung:	60
4.3.2	Die mess- und steuerungstechnischen Komponenten der Prüfvorrichtung:	69

5	Die Inbetriebnahme der Prüfvorrichtung.....	76
5.1	Die Betätigung der Hydraulikkomponenten für die Inbetriebnahme der Prüfvorrichtung:	76
5.2	Die Inbetriebnahme der Prüfvorrichtung	77
6	Die Entwicklung der Mess- und Steuerungssoftware.....	81
6.1	Anforderungen und Randbedingungen an die Mess- und Steuerungssoftware	82
6.2	Grundlegende Erklärungen zu den Programmier- und Kommunikationsebenen des CompactRIO-Systems	85
6.3	LabVIEW® Programmierung der Messdatenerfassung	88
6.3.1	Die Messdatenübertragung vom FPGA nach LabVIEW® Real-Time und die Erstellung der Messdatei	92
6.3.2	Die notwendige Begrenzung der weggesteuerten Datenerfassung	93
6.3.3	Die Erstellung der Messdatei am Echtzeit-System	98
6.4	Die Ansteuerung der Hydraulikkomponenten und die LabVIEW® Programmierung der Betriebszustände der Prüfvorrichtung	100
6.4.1	Die Anbindung der Hydrauliksystemkomponenten an das CompactRIO-System	100
6.4.2	Die LabVIEW® Programmierung des manuellen Betriebs	101
6.4.3	Die LabVIEW® Programmierung des automatischen Betriebs	103
6.4.4	Die programmatische Umsetzung der gewählten Abbruchkriterien.....	104
6.4.5	Die programmatische Umsetzung des Sicherheitskonzepts.....	107
6.5	Vergleich der Datenerfassung des entwickelten Messdatenerfassungssystems und der Kayser Threde MINIDAU®	108
6.6	Auszug durchgeführter Versuche mit der entwickelten Prüfumgebung PRESTO 420:.....	110
6.7	Ausblick auf die weitere Entwicklung des Mess- und Steuerungssystems	113
7	Zusammenfassung	115
8	Ausblick	117
9	Literaturverzeichnis	118
10	Abbildungsverzeichnis	120
11	Tabellenverzeichnis	123
12	Abkürzungsverzeichnis	124
	Anhang	i

1 Einleitung und Ziel der Arbeit

Folgendes Kapitel ist an, (Zinniker, 2001), (Lucien F.Trueb, 1997), und (Schwertle, 2009) angelehnt.

Betrachtet man die historische Entwicklung der Elektromobilität (Schwertle, 2009), so fällt auf, dass bereits im 19. Jahrhundert erste Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb entwickelt und fahrtüchtig ausgeführt wurden (siehe Abbildung 1). Schon vor der Einführung der ersten benzinbetriebenen Kraftfahrzeuge durch Carl Benz und Gottlieb Daimler wurden erste dampf- und elektrisch betriebene Fahrzeuge verwendet.

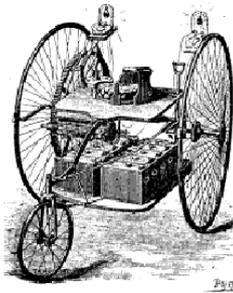


Abbildung 1: Eines der ersten Elektrofahrzeuge der Welt (Wakefield, 1993)

Durch die Entwicklung des Verbrennungsmotors und der damit verbundenen Erhöhung der Reichweite von Fahrzeugen, traten Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb in den Hintergrund der Fahrzeugindustrie. Rohstoffknappheit, umweltschädliche Emissionen aus der Verbrennung von fossilen Brennstoffen und daraus folgende gesetzliche Vorschriften seitens der Politik, treiben zurzeit die Entwicklung von „CO₂-freien bzw. CO₂-reduzierten Antriebskonzepten“ rasant voran. Besonders der Einsatz von Lithium-Ionen Batterien kristallisiert sich auf Grund der hohen massenspezifischen Energie von beispielsweise 100 bis 158Wh/kg und Zellenspannungen von 2.5 bis 4.2V im Vergleich zu anderen Batterietypen als zukunftssträchtige Technologie der chemischen Energiespeicher für Elektromobile heraus. (David Linden, 2001)¹

Bei Betrachtung von Elektrofahrzeugen fällt die Batterie als größte, in diesen Fahrzeugen verbaute Masse auf. Heutige Batteriepacks haben eine Masse von in etwa 200 Kilogramm und ermöglichen eine Reichweite von etwa 100 Kilometern². Um eine Reichweitenerhöhung der

¹ Handbook of Batteries 3rd Edition: S 35.35

² Chevrolet Volt: Masse des Batteriesystems=198,1kg; Reichweite im reinen Batteriebetrieb ca. 56 Kilometer, mit vollständig geladener Batterie und vollem Kraftstofftank ca. 610 Kilometer(Chevrolet)

Fahrzeuge bestmöglich durchführen zu können, ist sowohl die Entwicklung der Batterietechnologie hin zu höheren spezifischen Energiedichten, als auch der konsequente Leichtbau des Fahrzeuges selbst anzustreben. Neuentwicklungen von Fahrzeugen mit elektrischen Traktionsbatterien müssen im Vergleich zu konventionell betriebenen Kraftfahrzeugen in Hinblick auf die Fahrzeugsicherheit ein zumindest gleich hohes Sicherheitsniveau erreichen. Dabei kommen völlig neue Herausforderungen, wie z.B. Schutz gegen Stromschlag, Management von Batteriesystemen und das Verhalten von Batterien und Batteriemodulen bei und nach Crashesituationen zum Tragen.

Besonders die Koppelung des Verhaltens von Batteriezellen unter mechanischen Belastungen mit dem elektrischen Verhalten (Kurzschluss) ist bisher noch wenig erforscht und daher ein aktuelles Thema vieler Forschungs- und Entwicklungsabteilungen von Fahrzeugherstellern sowie von wissenschaftlichen Instituten weltweit.

Dabei ist es neben der Entwicklung eines prognosefähigen Finite-Elemente Modells notwendig, Daten von mechanischen Belastungstests, wie beispielsweise Kraft-Weg Verläufe, von Batteriezellen zu ermitteln. Mit Hilfe der ermittelten Daten soll einerseits die Validierung und Bewertung des Rechenmodells erfolgen. Andererseits soll experimentell die sicherheitstechnische Betrachtung beim Durchführen von mechanischen Versuchen an Lithium-Ionen Batterien ermöglicht werden.

Ziel dieser Arbeit ist es, durch Entwicklung einer Prüfvorrichtung zur Durchführung von quasi-statischen, mechanischen Belastungstests, die Ermittlung dieser notwendigen Daten zu ermöglichen. Dabei werden Tests bis zum Zerstören der Batterien durchgeführt, da gerade die Grenzbelastung, ab welcher ein Versagen eintritt, von großem Interesse ist. Gleichzeitig soll eine sicherheitstechnische Untersuchung des Ablaufs solcher Batterietests durchgeführt und mitsamt der Prüfvorrichtung zu einer Prüfumgebung kombiniert werden.

Bei der Bearbeitung dieser Arbeit wurde wie folgt vorgegangen:

- Literaturrecherche über:
 - Derzeit verwendete Lithium-Ionen Zellen in automotiven Anwendungen;
 - Aufbau und Funktion von Lithium-Batterien;
 - Vorgeschriebene bzw. zusätzlich notwendige quasistatische Tests an Lithium-Ionen Batterien;

Bestehende Prüfanlagen bzw. Prüfinstitutionen welche bereits mit quasi-statischen Prüfanlagen arbeiten;

Anforderungen an eine Prüfvorrichtung zum Testen von Batteriezellen;

Gefahrenquellen beim mechanischen Testen von Batterien;

- Durchführung von Prinzipversuchen zum Ermitteln der Gefahren und Auswirkungen bei mechanischer Belastung von Batteriezellen
- Entwicklung einer Prüfvorrichtung zur Durchführung von Zelltests mit ungeladenen und geladenen Batterien;
Auslegung, Konstruktion und Aufbau der Prüfvorrichtung;
- Entwicklung einer Steuerung zur Bedienung und Steuerung des Prüfstandes;
- Entwicklung eines geeigneten Datenerfassungssystems zur genauen Erfassung von Messdaten;
- Durchführung von Versuchen an Lithium-Ionen Batterien und anderen Versuchskörpern zur Überprüfung der Funktionen der entwickelten Prüfvorrichtung;

2 Theorie / Grundlagen

Das folgende Kapitel soll grundlegende Themen der Batterietechnik kurz beschreiben sowie die Lithium-Ionen Technologie erläutern. Des Weiteren soll auf die Prüfung von Batterien, insbesondere die mechanischen Prüfungen, eingegangen werden. Dieses Kapitel und dessen Unterkapitel sind inhaltlich an (Zinniker, 2001), (Kassatly, 2010), und (Moosbauer, 2010) angelehnt.

2.1 Aufbau und Funktion einer Batterie

Die Batterie ist ein Energiespeicher, welcher als Kernstück ein elektrochemisches Element enthält, das auch gemäß dem Erfinder Luigi Galvani galvanisches Element genannt wird. Die Geschichte der Batterietechnik geht weit ins frühe 19. Jahrhundert zurück.

2.1.1 Grundsätzlicher Aufbau

Die wesentlichen Elemente, die eine Batterie bilden, sind Anode und Kathode, welche als Elektroden bezeichnet werden, Separator und Elektrolyt. Anode und Kathode sind meist Metalle mit unterschiedlichem elektrochemischem Potential wie z.B. Kupfer und Zink, oder Nickel und Cadmium, die über einen äußeren Kreislauf miteinander verbunden sind. Werden die Elektroden in einen Elektrolyten getaucht, so kann eine Spannung abgegriffen werden. Die Elektroden werden entsprechend ihrer Polarität positive Elektrode (Kathode) und negative Elektrode (Anode) genannt. An ihnen laufen die elektrochemischen Prozesse der Batterie ab. Der Separator agiert als ionendurchlässiges, aber elektronenblockierendes Trennelement zwischen den beiden Elektroden und verhindert so den internen Kurzschluss der Batterie. Als Elektrolyt kommen sowohl verschiedene flüssige Lösungen eines Leitsalzes, als auch Feststoffe und Polymere, wo dieses Leitsalz in Makromolekülen oder in einer Polymermatrix eingegliedert ist, zum Einsatz. Das Leitsalz wird zur Erhöhung der Leitfähigkeit des Elektrolyten eingesetzt.

Im Folgenden werden die Begriffe Batterie, Akkumulator, Primärzelle und Sekundärzelle erläutert und deren Unterscheidungsmerkmale aufgezeigt: (Zinniker, 2001)

Batterie:

Bei Batterien ist eine Umkehrung der chemischen Hauptreaktion nicht oder nur unvollständig möglich.

Akkumulator:

Die chemische Hauptreaktion ist beim Akkumulator (Akku) vollständig umkehrbar. Die Anzahl der Zyklen (Ladung-Entladung) ist allerdings nicht unbeschränkt, da durch falsche Handhabung des Akkumulators wie z.B. vollständige Entladung bei jedem Entladezyklus, oder durch innere Vorgänge in der Batterie, wie beispielsweise durch Nebenreaktionen (Korrosion), die Zyklenzahl begrenzt wird.

Trotz obiger Anführungen ist zu erwähnen, dass keine einheitliche Nomenklatur zwischen Batterie und Akkumulator in der Literatur zu finden ist. Auch wenn von Akkumulatoren gesprochen wird, wird meist der Ausdruck Batterie verwendet. Die eindeutige technische Unterscheidung zwischen wieder aufladbaren und nicht wieder aufladbaren chemischen Energiespeichern kann durch die Begriffe Primär- und Sekundär-Elemente erfolgen.

Primär- und Sekundär-Elemente:

Bei den chemischen Kernelementen einer Batterie wird in der klassischen Betrachtungsweise zwischen Primär- und Sekundär-Elementen unterschieden. Bei Sekundär-Elementen ist die chemische Reaktion umkehrbar. Sie kommen in Akkus zum Einsatz, da sie sich Laden und Entladen lassen. Primär-Elemente finden in Batterien Verwendung und sind nur für den einmaligen Einsatz ausgelegt.

Die Vorgänge bei der Umformung der chemischen Energie einer Batterie in elektrische Energie, sind bei Lithium Batterien anders als bei herkömmlichen Batterietechnologien, wie beispielsweise dem Bleiakкумуляtor.

Lithium-Ionen Zellen arbeiten grundsätzlich gleich wie galvanische Elemente. Allerdings werden bei der Lithium-Ionen Technologie die chemischen Reaktionen nicht direkt von den Elektrodenmaterialien durchgeführt. Stattdessen werden Lithium-Ionen zwischen den Aktivmaterialien ausgetauscht und in die Strukturen der Anode und der Kathode eingelagert. Dies wird in der Literatur als Interkalationsverbindung bezeichnet. Dabei werden Ionen in eine Trägerstruktur eingelagert, ohne diese Trägerstruktur auffallend zu verändern.

Die Abbildung 2 zeigt den Aufbau eines Lithium-Ionen Akkumulators:

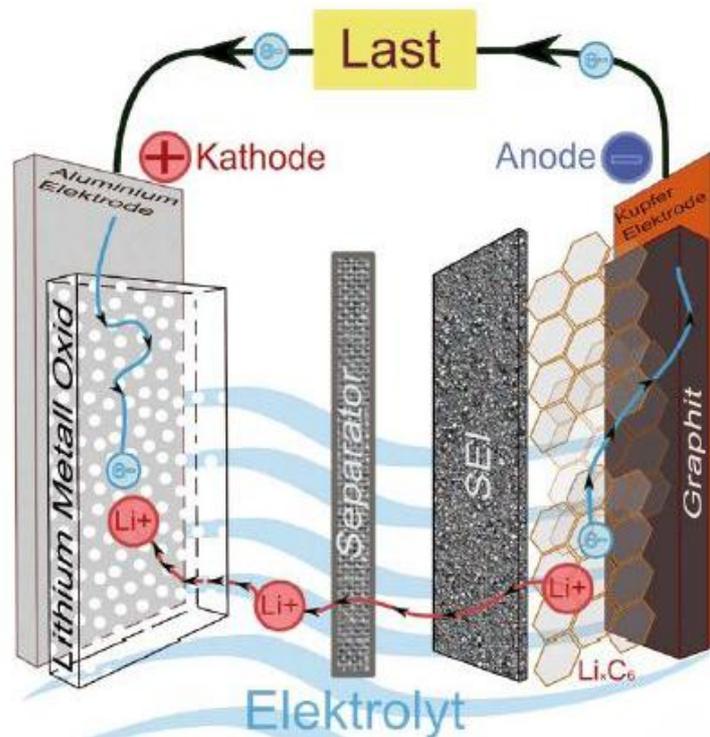


Abbildung 2: Aufbau eines Lithium-Ionen Akkumulators beim Entladen (Conte, 2009)

Abbildung 2 zeigt die wesentlichen Elemente eines Lithium-Ionen Akkus. Das positive Elektrodenmaterial ist üblicherweise ein Metalloxid auf einer Aluminiumfolie. Die negative Elektrode ist typischerweise graphitisierter Kohlenstoff, welcher auf einer Kupferfolie aufgebracht ist. Für Separatoren kommen sehr dünne (zwischen 10 und 30 μm)³, feinstporöse Folien zur Anwendung. Beim ersten Einlagerungszyklus der Lithium-Ionen an der Graphitseite entsteht eine das Anodenmaterial schützende Deckschicht, welche als Solid Electrolyte Interface (SEI) bezeichnet wird. Diese passivierende Deckschicht übernimmt den Schutz des Stromableiters vor der Beschädigung durch den Elektrolyten. Sie ist aber auch für Alterungsprozesse der Batterie verantwortlich und erhöht den Innenwiderstand der Zelle.

Die Verwendung eines alternativen Anodenmaterials aus einem Titanatspinel, welcher keine SEI bildet und benötigt, ist derzeit ein Inhalt von Forschungsaktivitäten, die sich mit der Verbesserung von Lithium-Ionen Batterien beschäftigen.

³ Nach (David Linden, 2001); S. 35.29

2.1.2 Zellchemie

Als Grundlage der Vorgänge in chemischen Energiespeichern ist die Redoxreaktion anzuführen. Abbildung 3 zeigt den grundsätzlichen Ionenaustausch in einem elektrochemischen Element bei Ladung und Entladung.

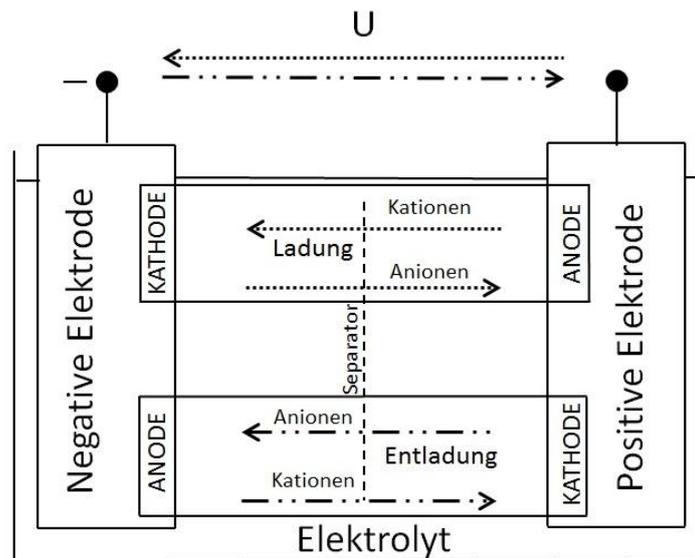


Abbildung 3: Elektronen- und Ionenbewegung in einem elektrochemischen Element

(Zinniker, 2001)

Die Redoxreaktion besteht aus einer Oxidationsreaktion, welche an der Anode erfolgt und der Reduktionsreaktion, welche an der Kathode stattfindet. Bei der Oxidation werden von der Elektrode Elektronen abgegeben, während bei der Reduktion Elektronen aufgenommen werden. Abbildung 3 zeigt, dass bei der Entladung die positive Elektrode reduziert wird, sie ist die Kathode. An der negativen Elektrode kommt es zu einer Oxidation, sie wird zur Anode. Beim Ladezyklus erfolgen die Reaktionen umgekehrt. Die positive Elektrode wird oxidiert, sie ist nun die Anode, die Reduktionsreaktion läuft an der negativen Elektrode ab. Diese ist nun die Kathode.

Wie vorhin beschrieben arbeiten Lithium-Ionen-Batterien nach dem gleichen Prinzip. Anstelle der Reduktions- und Oxidationsreaktionen direkt an den Elektrodenmaterialien werden Lithium-Ionen in Nanostrukturen an den Elektroden ein- bzw. ausgelagert (siehe Abbildung 2).

Die Abbildung 4 zeigt diese Einlagerungsvorgänge beim Lade- und Entladezyklus:

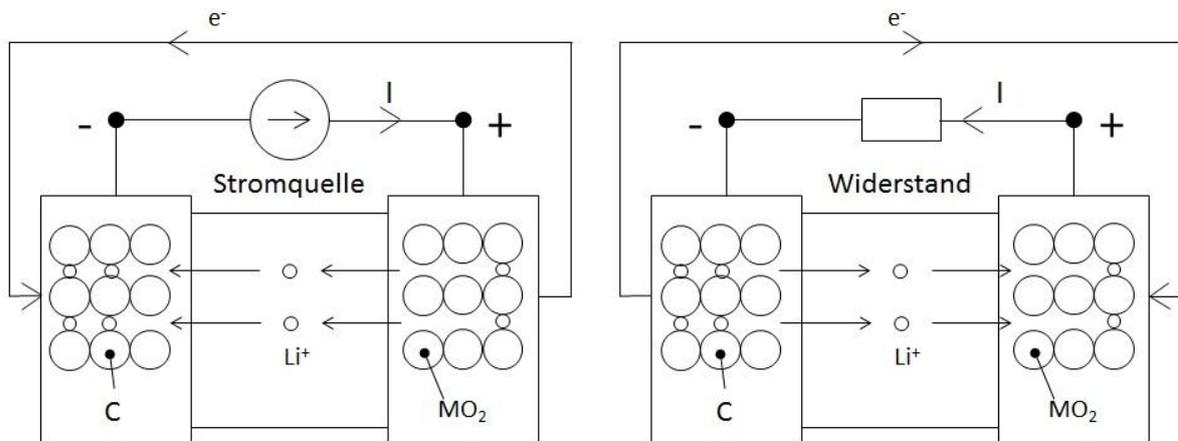


Abbildung 4: Speicherung der Lithium-Ionen bei Ladung (links) und Entladung (rechts) nach (Zinniker, 2001)

Beim Ladevorgang werden die Lithium-Ionen (Li^+) aus dem Wirtsgitter der Metalloxidschicht (MO_2) oxidiert und an der Anode in die Graphitstruktur (C) eingelagert. Beim Entladevorgang wird an der Graphitstruktur (C) oxidiert, die Lithium-Ionen (Li^+) bewegen sich durch den Elektrolyten und den Separator zur Struktur der Metalloxidschicht (MO_2). Das M in obiger Abbildung steht für das verwendete Metall der Metalloxidschicht. Üblicherweise wird Kobalt, Nickel oder Mangan verwendet.

2.1.3 Zellenausführungen

Die geometrische Ausführung von Batteriezellen ist durchaus verschieden. Zylindrische, prismatische Ausführungen sowie Knopfzellen sind üblich. Bei den prismatischen Zellen gibt es zwei unterschiedliche Ausführungsvarianten:

- Flache, quasi-prismatische Ausführung (Pouch-Zellen)
- Prismatische Ausführung z.B. Metal-Can Zellen⁴

Die zylindrische und prismatische Ausführungsart kommt derzeit für die Verwendung in Fahrzeugen mit elektrischem Energiespeicher zur Anwendung.

Die Einzelzellen werden zu Batteriemodulen zusammengefasst. Mehrere Module bilden gemeinsam das Batteriepack eines Fahrzeuges. Je nach Anforderung an die Leistungsfähigkeit

⁴ Stabile prismatische Batteriezelle mit einem Gehäuse aus Metallblechen

und dem verfügbaren Bauraum im Fahrzeug werden die Batteriemodule mit unterschiedlicher Anzahl von Batterien bestückt. Beispielsweise wurden im A3plus Programm „Klimamobil – 0-Emissionsfahrzeuge im öffentlichen Nahverkehr“ für den Antrieb eines Elektrobusses 16 Batteriemodule mit je 48 Pouch-Einzelzellen verbaut. Dies ergibt eine Gesamtanzahl von 768 Einzelzellen im Fahrzeug (Breitfuß, 2010). In einem Sportwagen der Firma (Fa.) Tesla Motors Inc., dem Tesla Roadster, kommen 6.831 zylindrische Lithium-Ionen Zellen vom Typ 18650⁵ zum Einsatz (Teslamotors). Die beiden Beispiele zeigen, dass es zur Zeit keine einheitliche Zellenform bei den Speichersystemen für Fahrzeuge gibt.

2.2 Einteilung von Missbrauchstests an Traktionsbatterien für Fahrzeuge

Batteriebetriebene Fahrzeuge müssen zumindest dieselbe Sicherheit sowohl in Crashsituationen als auch im normalen Betrieb wie konventionell betriebene Fahrzeuge aufweisen. Darum ist, neben vielen anderen Prüfungen an den Fahrzeugen, auch das Prüfen der verwendeten Traktionsbatterien unumgänglich. Es werden Tests von Einzelzellen, Modulen, Batteriepacks bis hin zum Crashversuch am Gesamtfahrzeug, durchgeführt. Diese Prüfungen lassen sich, wie in Abbildung 5 dargestellt, unterteilen in:

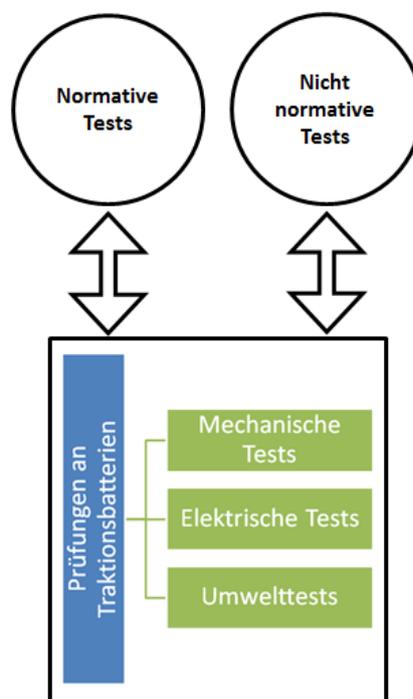


Abbildung 5: Einteilung der Prüfungen an Traktionsbatterien

⁵ Zellentyp 18650: Zylindrische Zelle mit einem Durchmesser von 18mm und einer Länge von 65mm

Die in Abbildung 5 gewählte Unterteilung der Prüfungen an Traktionsbatterien ist an das Handbuch zur Untersuchung von Energiesystemen für Elektrofahrzeuge mit Lithium-Ionen Batterien angelehnt (BATSO, 2011). Die unterschiedlichen Prüfungen an Traktionsbatterien treffen sowohl für normative, als auch für nicht normative Tests zu.

Mechanische Tests:

Die mechanischen Tests an Batterien lassen sich nach Abbildung 6 grundsätzlich in quasi-statische und dynamische Versuche unterteilen. Dabei wird das Versagen, beziehungsweise die tolerierte Belastung bis zum Versagen der Batterie untersucht und bewertet.

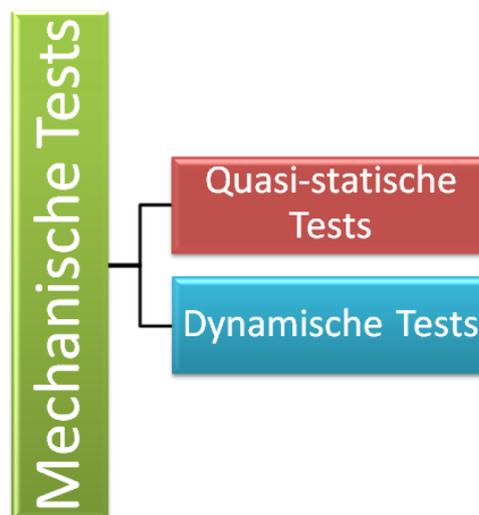


Abbildung 6: Unterteilung der Beanspruchungsart bei mechanischen Tests

Bei dynamischen Batterieversuchen werden die Versuchsträger mit verschiedenen Belastungspulsen beaufschlagt, sowie Eindrück- und Penetrationsversuche durchgeführt, um die Robustheit der Speichersysteme bei diesen Belastungen zu untersuchen (Doughty, et al., 2006)⁶. Das Zusammendrücken von Batterien zwischen Platten sowie Penetrations- und Eindrückversuche mit verschiedenen Impaktoren bei geringen Belastungsgeschwindigkeiten von z.B. 15mm/s bei einem Stauchtest (BATSO, 2011)⁷ zählen zu den quasi-statischen Versuchen.

⁶ Vgl.: FreedomCAR Electrical Energy Storage System Abuse Test Manual for Electric and Hybrid Electric Vehicle Applications– Mechanical Shock Test (Ausgabe von August 2006); S.21-22

⁷ Vgl.: BATSO 01 Second Edition: Manual for Evaluation of Energy Systems for Light Electric Vehicle (LEV) – Secondary Lithium Batteries; S.18-19

Elektrische Tests:

Diese Versuche sollen die elektrische Sicherheit bei der Verwendung der Batterien gewährleisten. Es werden z.B. Entlade- und Ladetests oder Kurzschluss tests durchgeführt.

Umwelttests:

Zu den Umwelttests zählt das Testen von Batterien unter verschiedenen Umgebungsbedingungen, wie Höhensimulationen, Erhitzung oder Temperaturzyklen. Dabei soll z.B. die Zulässigkeit des Transports über den Luftweg (Transportvorschriften) sowie die Funktion der Batterien unter wechselnden Umwelteinflüssen überprüft werden.

Da die Diplomarbeit ausschließlich, auf die Entwicklung einer Prüfvorrichtung zur Untersuchung der mechanischen Eigenschaften von lithiumbasierenden Batterien ausgerichtet ist, wird in den folgenden Unterkapiteln lediglich auf die mechanischen Tests an Lithium-Ionen Batterien eingegangen. Nachfolgend wird die Bezeichnung elektrische Energiespeicher (EES) für Batteriezellen und Batteriemodule verwendet.

2.2.1 Normen und gesetzliche Bestimmungen

Die Normungen und die legislativen Bestimmungen für Traktionsbatterien und Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb sind sehr umfangreich. Es gibt diverse Normvorschriften für Fahrzeuge mit Lithium-Ionen Batterien als elektrischen Energiespeicher, um unterschiedlichste Kriterien abzudecken. Funktionale Sicherheit (z.B.: ISO 26262), Crashesicherheit (z.B.: SAE J2929), Geräuschanforderungen an leise Fahrzeuge, elektrische Sicherheit (z.B.: FMVSS 305), Anforderungen an aufladbare elektrische Energiespeichersysteme, sind nur einige Beispiele dafür. Eine Übersicht über derzeit existierende Normen ist im Anhang der Arbeit zu finden.

2.2.2 Vorgeschriebene mechanische Prüfverfahren an Lithium-Ionen Batterien

Brand, Ausgasen (Venting) oder Explosion sind die gravierendsten Resultate einer mechanischen Belastung von Lithium-Ionen Batterien. Mechanische Prüfverfahren sollen Batterien derart belasten, dass eine Aussage, ab welcher mechanischen Beanspruchung ein Versagen eintritt, getroffen werden kann, beziehungsweise welche Resultate sich auf Grund einer bekannten mechanischen Last ergeben. Dazu wurden Richtlinien erlassen, welche die Versuchskonfigurationen zur Durchführung von mechanischen Belastungstests beinhalten. Impaktorformen, Belastungsrichtung und –geschwindigkeit, Einwirkdauer sowie

Abbruchkriterien werden vorgeschrieben. Tabelle 1 listet einen Auszug, der zurzeit gültigen Normen und legislativen Bestimmungen von mechanischen Belastungstests an elektrischen Energiespeichern auf. Mit der, im Rahmen dieser Diplomarbeit, entwickelten Prüfanlage können die in Tabelle 1 orange markierten Tests durchgeführt werden.

Norm:	Gilt für:	MECHANISCHE TESTS:	Eindruck Test	Aufprall Test	Feuchtig-keits Test	Shock Test	Vibrations Test	Fall-Test, Package Fall-Test	(Nagel) Penetrations -Test	Ein-tauchen	Über-schlag
UL 1642	Zellen und 'kleine Batterie-packs', auf Lithium basierend		x	x	x	x	x	x			
FreedomCar	HEV/EV Batterie- und Kondensatoren- Sicherheit		x			x		x	x	x	x
SAE J2464	HEV/EV Batterie-Sicherheit		x			x		x	x	x	x
USABC			x			x	x	x	x	x	x
BATSO 01	LEV mit auf Lithium basierenden Batterie-zellen		x			x	x	x			
UN 38.3				x		x	x				
IEC 62281 und IEC 62133	Transport Sicherheitstests von Lihium Batterien		x			x	x	x			
INERIS ELLICERT Version D	HEV und EV		x			x	x	x	x	x	
IEC 62660-2 (IEC 61982)	Elektrisch angetriebene Straßenfahrzeuge mit Li-Ionen-Zellen		x			x	x				
ISO 12405-1 und -2	HEV/EV Li-Ion Traktionsbatterien, Sicherheit und Performance					x	x				
UL 2271	LEV		x	x		x	x	x	x		
UL 2580	EV		x								
DIN V VDE V 0510-11						x					

Tabelle 1: Normative und legislative Bestimmungen für mechanische Belastungstests an elektrischen Energiespeichern

Ergänzend zu Tabelle 1 sind in Tabelle 2 die Parameter und eine Kurzbeschreibung des Eindrücktests an einem Batteriemodul nach dem FreedomCAR Abuse Test Manual (Doughty, et al., 2006)⁸ angeführt:

Testbezeichnung:	Kurzbeschreibung:	Parameter:
Kontrollierter Eindrücktest	Flacher Eindrückversuch mit halbkreisförmigen strukturierter Impaktoren, welche auf einer flachen Platte im Abstand von 30mm angeordnet sind (laut Abbildung 7) (Abstand=30mm, Radius=75mm); flache, gegenüberliegende Platte; beide Platten elektrisch isoliert;	<u>Stufe 1:</u> Eindrückung bis zu einer Verschiebung die 15% der Höhe des Moduls entspricht; <u>Stufe2:</u> Eindrückung bis zu einer Verschiebung die 50% der Gesamthöhe des Moduls entspricht, oder einer Kraft die 1000mal dem Gewicht des Moduls entspricht; Prüfstopp je nachdem welches Abbruchkriterium zuerst eintritt

Tabelle 2: Kontrollierter Eindrückversuch nach dem FreedomCAR Abuse Test Manual (Doughty, et al., 2006)

Die in Tabelle 2 beschriebene Impaktorplatte⁸ ist in folgender Abbildung 7, dargestellt.

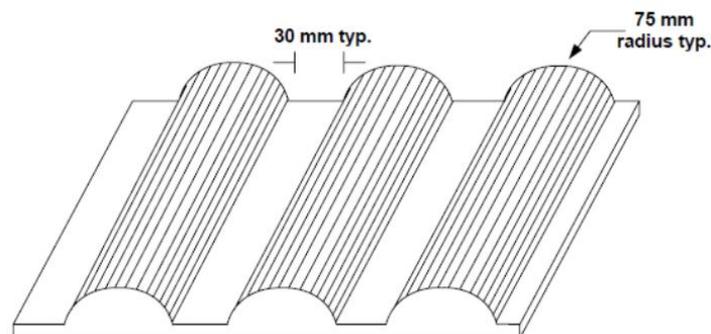


Abbildung 7: Impaktorplatte für Eindrückversuche nach dem FreedomCAR Abuse Test Manual

Neben der dargestellten Impaktorplatte in Abbildung 7 kommen auch flache Platten und andere Impaktorformen, wie beispielsweise zylindrische Impaktoren, bei Eindrücktests zum Einsatz.

⁸ Vgl.: FreedomCAR Electrical Energy Storage System Abuse Test Manual for Electric and Hybrid Electric Vehicle Applications (Ausgabe August 2006)– Controlled Crush; S.17-18

Die Ergebnisse der vorhin beschriebenen mechanischen Tests an EES, können nach einer Bewertungsskala beurteilt werden (Doughty, et al., 2006) ⁹. Diese Skala unterscheidet acht Gefahrenpotentiale welche in Tabelle 3 angeführt sind.

Hazard Level	Description	Classification Criteria & Effect
0	No effect	No effect. No loss of functionality.
1	Passive protection activated	No defect. No leakage. No venting, fire, or flame, no rupture. No explosion. No exothermic reaction or thermal runaway. Cell reversibly damaged. Repair of protection device needed.
2	Defect/Damage	No leakage. No venting, fire, or flame. No rupture. No explosion. No exothermic reaction or thermal runaway. Cell reversibly 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 or active mass.
7	Explosion	Explosion (i.e., disintegration of the cell).

Tabelle 3: Gefahrenpotentiale und Beschreibungen (Doughty, et al., 2006)

Die Bewertungsskala nach Tabelle 3 zeigt Gefahrenstufen durch Fehler an den Batterien welche durch die abnormale Belastung der EES resultieren.¹⁰ Die Schwere der Reaktion der EES auf Belastungstests wird in der Skala mit steigendem Level bewertet.

⁹ Vgl.: FreedomCAR Electrical Energy Storage System Abuse Test Manual for Electric and Hybrid Electric Vehicle Applications (Ausgabe August 2006); S.15-16

¹⁰ Vgl.: Sicherheitsaspekte beim Testen von Lithium-Ionen Batterien (Groiß, et al.) S.2 und 3

Abbildung 8 zeigt einen mit der Prüfvorrichtung durchgeführten Penetrationstest an einer Lithium-Ionen Batterie:



Abbildung 8: Penetrationstest an einer Lithium-Ionen Zelle (Hazard Level 6) vor (links) und nach (rechts) dem Versuch

Die Zelle wurde, wie in Abbildung 8 dargestellt, mit einem Nagel zwischen den beiden Polen penetriert, worauf eine heftige Reaktion (Venting, Austritt von Aktivmassen und Elektrolyt) der Zelle folgte. Die Reaktion der Zelle auf die aufgebrachte mechanische Belastung ist dadurch mit Hazard Level 6 zu bewerten.

2.2.3 Nicht vorgeschriebene mechanische Prüfverfahren an Lithium-Ionen Batterien

Neben den vorgeschriebenen Prüfverfahren werden auch mechanische Tests an Lithium-Ionen Batterien durchgeführt, die ausschließlich der Entwicklung von mechanischen Rechenmodellen dienen. Die Ermittlung von schadensfrei ertragbaren mechanischen Belastungen von EES in Hinblick auf die Fahrzeugsicherheit und die Minimierung des Fahrzeuggewichtes ist hierbei der treibende Faktor. Dies kann neben der Erhöhung der Crashesicherheit auch zur Steigerung der Reichweite von Elektrofahrzeugen beitragen.

In diesem Bereich sind bislang nur wenige Informationen publiziert worden, da die Entwicklung eines funktionsfähigen, mechanischen Rechenmodells einen enormen Wettbewerbsvorteil mit sich bringt. Das Labor für Aufprall- und Unfallverhalten des Massachusetts Institute of Technology (MIT) veröffentlichte eine Arbeit, welche mechanische Testkonfigurationen an Lithium-Ionen Batterien zur Validierung von mathematischen Rechenmodellen, beinhaltet

(Wierzbicki T., 2010). Diese weichen im Bereich der Prüfkräfte und Prüfgeschwindigkeiten von den Parametern der normativen Vorschriften ab (siehe Tabelle 4). Es kommen Knickversuche, Dreipunktbiegungsversuche, Impaktorversuche bei geringen Vorschubgeschwindigkeiten von 0.5 bis 3mm/min zur Anwendung (Sinz, et al., 2012). Versuche für das Validieren eines prognosefähigen FE-Modells sollen vor allem hochgenaue Kraft-Deformations-Kurven (z.B. Wegauflösung in hundertstel Millimeter Schritten, Kraftauflösung in zehntel Newton Schritten mit zuordenbaren Spannungswerten) liefern und die Deformationen der Einzelzelle mittels Foto- und Videodokumentation aufzeichnen. Hier werden im Vergleich zu genormten Tests erhöhte Anforderungen an die Messtechnik der Prüfvorrichtungen gestellt, um die Validierung des mathematischen Rechenmodells bestmöglich zu unterstützen. Im Bereich von genormten mechanischen Tests hat die Erfüllung der laut Norm geforderten Parameter (Belastungskraft, Belastungsgeschwindigkeit, Erfüllung der Abbruchkriterien) Priorität.

2.3 Gefahrenquellen beim Testen von lithiumbasierenden Traktionsbatterien

Das Beachten von Gefahren beim Testen von Hochvolt-Batteriezellen ist zum Schutz des Personals, der umliegenden Infrastruktur und der Umwelt wichtig. Gefahren entstehen sowohl durch mögliche interne und externe Kurzschlüsse, elektrischen Schlag, durch mögliche Explosionen und Brand, als auch durch Austritt von toxischen Gasen und Bestandteilen der EES.

Die von Fahrzeugbatterien ausgehenden Gefahren können nach (Sinz, et al., 2012) eingeteilt werden in:

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

Die unterschiedlichen Gefahren und Gefahrenpotentiale werden nun näher beschrieben.

- Thermische Gefahren

Lithium-Ionen Batterien enthalten hochentzündliche Bestandteile wie den Elektrolyt oder die Komponenten der Zellreaktionen, wie Wasserstoff (H₂) und Methan (CH₄). Durch Überhitzen der Batterien kann es zur Beschädigung und zum Schmelzen des Separators, bis hin zur

Selbstentzündung der Zelle kommen. Dieses thermische „Durchgehen“ der Batterie wird als „Thermal Runaway“ bezeichnet und tritt bei Temperaturen um 180°C ein. Weitere Folgen von thermischer Überbelastung können Kurzschlüsse, Austritt von heißem Elektrolyt und anderen Batteriebestandteilen oder sogar Explosionen der Zelle sein. Explosionen sind jedoch im Bereich des normalen Ladungszustandes (bis 100% SOC¹¹) der Batterien selten. Erst durch Überladung der Zellen, beispielsweise auf 200% SOC, werden diese sehr gefährlich und können schlagartig Energie im Inneren der Batteriezelle freisetzen.

Folgende Liste zeigt kritische Temperaturen von Lithium-Ionen Batterien: (Sinz, et al., 2012)

- 110°C Schmelzpunkt von Polyethylen (PE)
- 130-250°C Exotherme Reaktion der Kathode mit dem Elektrolyten
- 180°C Beginn der selbstständigen Erhitzung von Lithium-Ionen Zellen

- Chemische Gefahren

Gefahren dieser Kategorie sind den gesundheitsschädlichen Bestandteilen der Batterien zuzuordnen. Eine HV-Batterie ist grundsätzlich gasdicht verschlossen. Wird eine Zelle jedoch durch mechanische Belastung (z.B. bei einem Unfall) geöffnet oder geht die Zelle aus, kann es zum Austritt gefährlicher Stoffe kommen. Eine umfangreiche Auflistung der möglichen austretenden Bestandteile gibt (Sinz, et al., 2012)¹². Eine Studie der Sandia National Laboratories untersuchte die Entflammbarkeit und Gaszusammensetzung von ausgasenden Lithium-Ionen Batterien vom Typ 18650¹³ bei thermischen Versagenstests. Die in der Studie untersuchten Batterien wurden in einem Prüfraum platziert und mit 3-4°C/min bis zum Eintreten des „Thermal Runaway“ erhitzt. Beim Versuch wurden die Gaszusammensetzungen beim Ausgasen der Batterie mittels Gaschromatographie gemessen. Das Resultat der Messung der entstehenden Gase ist in Abbildung 9 zu sehen.

¹¹ State of Charge: Bezeichnet den Ladungszustand von Batterien

¹² Vgl.: Concepts for Mechanical Abuse Testing of High-Voltage Batteries; SAE 2012; S.25

¹³ Zellentyp 18650: Zylindrische Zelle mit einem Durchmesser von 18mm und einer Länge von 65mm

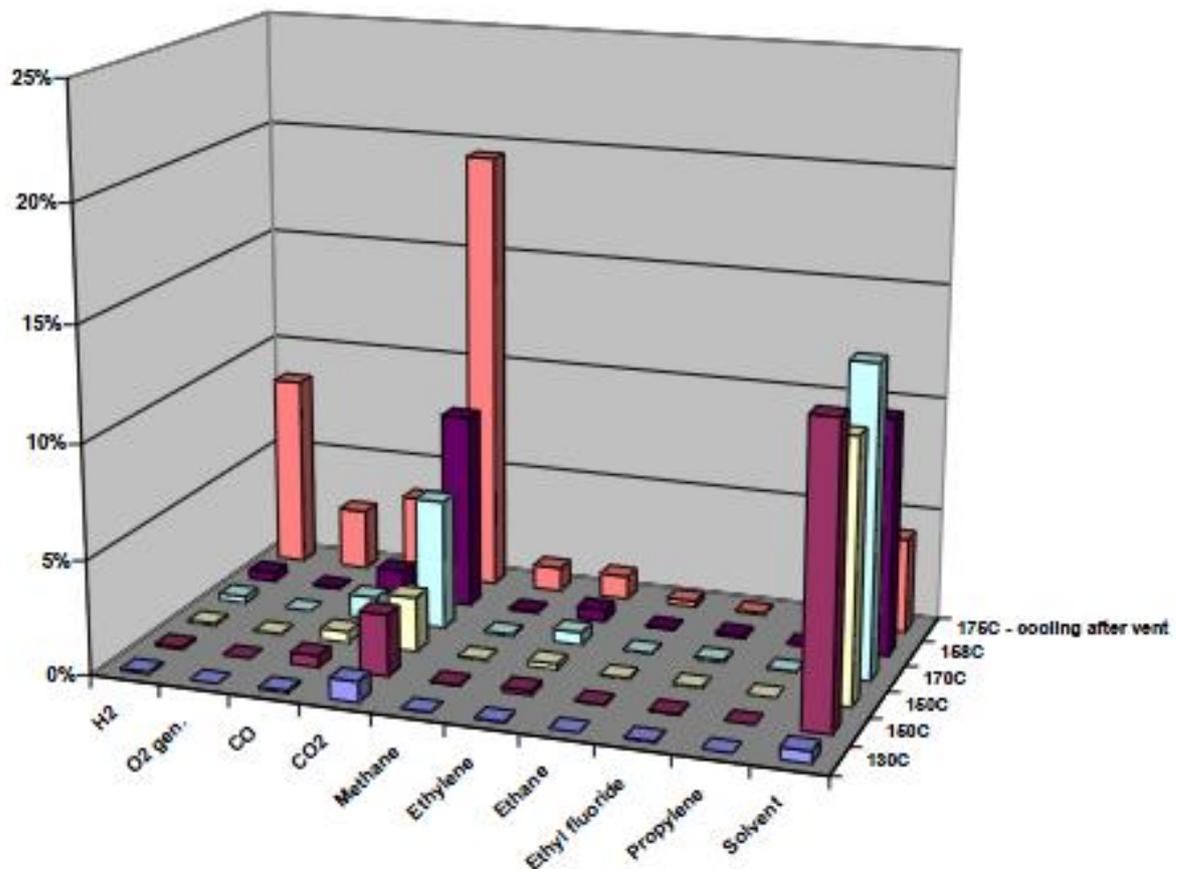


Abbildung 9: Gaszusammensetzung beim Ausgasen von Lithium-Ionen Batterien (Roth, et al., 2004)¹⁴

Die Hauptbestandteile des Gasgemisches laut Abbildung 9 sind Kohlendioxid (CO₂) und Kohlenmonoxid (CO). Aber auch brennbare Gase wie Wasserstoff (H₂), Methan (CH₄) und Ethylen (C₂H₄) konnten gemessen werden. Während diesen Versuchen kam es trotz vorhandener Fremdzündquellen nicht zu einer brennbaren Gaszusammensetzung. Die Studie der Sandia National Laboratories zeigt außerdem, dass vor allem der Elektrolyt an den chemischen Reaktionen teilnimmt und wesentlichen Einfluss auf die Gas- und Hitzeentwicklung hat¹⁵. Des Weiteren kann das Leitsalz LiPF₆, welches oft für Elektrolyten von Lithium-Ionen Batterien verwendet wird, in Verbindung mit Feuchtigkeit Fluorwasserstoffsäure (Flusssäure) und Phosphin bilden.

¹⁴ Vgl.: Advanced Technology Development Program for Lithium-Ion Batteries: Thermal Abuse Performance of 18650 Li-Ion Cells; S.40

¹⁵ Vgl.: Advanced Technology Development Program for Lithium-Ion Batteries: Thermal Abuse Performance of 18650 Li-Ion Cells; S.130

- Elektrische Gefahren

Elektrische Spannung und elektrischer Strom sind ebenfalls als Gefahren, die von EES ausgehen, anzuführen. In heutigen Hybrid- oder Elektrofahrzeugen werden Batteriepacks angeordnet, die eine Gesamtspannung von mehreren hundert Volt erreichen¹⁶. Hier sind besondere Schutzmaßnahmen zur Verhinderung von Unfällen, die z.B. durch Berühren von Bauteilen, die unter Hochvolt-Spannungen stehen, hervorgerufen werden. Beim mechanischen Testen der Batterien ist auf eine geeignete Isolierung der Prüfvorrichtung bzw. des Testequipments zu achten. Dadurch können Kurschlüsse durch das Berühren der Pole mit dem Prüfequipment und somit Störungen der Messungen vermieden werden. Bei Versuchen mit Batteriemodulen ist auch der Schutz des Bedienpersonals vor elektrischem Schlag vorzusehen. Hier muss bei Arbeiten an geladenen Hochvolt-Komponenten unbedingt auf die Einhaltung entsprechender Vorschriften (z.B.: Arbeiten unter Hochvolt) und auf eine dementsprechende Ausbildung der Mitarbeiter geachtet werden. Entsprechende Sicherheits- und Ausbildungsstandards wurden bereits vorgestellt (Schaub, 2010).

- Mechanische Gefahren

Mechanische Gefahren durch Batteriezellen entstehen durch die hohe verbaute Masse der Energiespeicher in Fahrzeugen, welche die Fahrzeugeigenschaften und das Fahrverhalten zum Teil erheblich verändern kann. Dies ist jedoch für die Entwicklung der Prüfvorrichtung nicht ausschlaggebend und wird deshalb nicht genauer erläutert.

Die aufgelisteten Gefahren zeigen, dass beim Testen von Lithium-Ionen Batterien Vorsichtsmaßnahmen zu treffen sind. Einerseits muss das Prüfpersonal vor den giftigen und reizenden Bestandteilen der Batterien, wie dem Elektrolyt oder austretenden Gasen geschützt werden. Andererseits sind die Prüfanlage und die umliegende Infrastruktur selbst so auszuführen, dass ein Brand oder das Ausgasen einer Zelle die Anlage und die umliegende Infrastruktur möglichst nicht beschädigt.

¹⁶ Vgl.: Tesla Roadster Gesamtspannung 375V (Teslamotors); Renault Kangoo Be Bop ZE Gesamtspannung 400V (Hybrid-Autos.info)

3 Ableitung von Anforderungen an die zu entwickelnde Prüfumgebung und Lastenhefterstellung

In diesem Kapitel wird die Ableitung von Anforderungen an die mechanischen als auch mess- und steuerungstechnischen Komponenten der Prüfvorrichtung beschrieben. Die Ableitung der Anforderungen erfolgt einerseits durch eine Zusammenfassung der durchgeführten Literaturrecherche von bestehenden Vorschriften und Normen, andererseits durch die Durchführung von Prinzipversuchen an ESS. Des Weiteren wird auf die Lithium-Ionen Batterien, welche bei den Prinzipversuchen verwendet wurden, eingegangen und deren Aufbau beschrieben. Die Erkenntnisse aus der Literaturrecherche und den Prinzipversuchen werden in einem Lastenheft zusammengefasst. Basierend auf dem erstellten Lastenheft erfolgt die konzeptionelle Auslegung der Komponenten der Prüfvorrichtung.

3.1 Abgeleitete Anforderungen an die zu entwickelnde Prüfvorrichtung

Nachdem im Kapitel 2.2 die grundsätzlichen mechanischen Tests an EES beschrieben wurden, sollen in diesem Unterkapitel elementare Anforderungen an die zu konzipierende Prüfvorrichtung abgeleitet werden. Die zu entwickelnde Prüfvorrichtung soll prinzipiell die Möglichkeit bieten, genormte Tests an Einzelzellen und Batteriemodulen durchführen zu können.

Das Hauptziel der Prüfanlage ist aber die Generierung von Validierungsdaten für die Erstellung eines prognosefähigen FE-Rechenmodells im quasi-statischen Belastungsfall. Die Entwicklung des mechanischen Rechenmodells wurde in einer parallel durchgeführten Diplomarbeit mit dem Titel „Entwicklung eines Finite Elemente Modells zur Untersuchung der mechanischen Eigenschaften von lithiumbasierenden Batterien“ (Lichtenegger, 2012) durchgeführt.

Für die Validierung von numerischen Batteriemodellen eignen sich quasi-statische Versuche sehr gut. Ist das quasi-statische Verhalten der Batteriezellen in der Simulation gut abbildbar, kann eine Erweiterung in Richtung dynamischer Belastung erfolgen. Dies ist jedoch nicht Arbeitsinhalt der vorliegenden Diplomarbeit. Zu erwähnen ist jedoch, dass dynamische Versuche nicht nur für die numerische Simulation wichtig sind, sondern generell für die Beurteilung der Batteriezellen unter mechanischen Belastungen.

Wie schon erwähnt liegt der Fokus dieser Arbeit ausschließlich auf quasi-statischen Tests. Darum ist bei der Auslegung der zu entwickelnden Prüfanlage besonders darauf zu achten, dass vor allem entsprechende geeignete Validierungsversuche mit der Prüfanlage durchgeführt werden können. Die Erfüllung der Vorgaben für diese Tests hat bei der Entwicklung dieser Prüfvorrichtung ständig Vorrang gegenüber normativen Forderungen. Neben Versuchen an Einzelzellen soll die Prüfvorrichtung auch das Testen von Batteriemodulen ermöglichen. Daraus ergibt sich die Anforderung an die Größe des Prüfaufbaus. Tabelle 4 zeigt eine Zusammenfassung der Anforderungen an die Prüfvorrichtung für quasi-statische Belastungstests an Hochvolt-Traktionsbatterien aus der Literaturrecherche.

Anforderungen an quasi statische Versuche:	Normung	Bemerkung	Validierung von quasi-statischen FE-Berechnungsmodellen	Bemerkung
Höchste Prüfgeschwindigkeit	80 mm/s	FreedomCAR Abuse Test Manual - Penetrationstest;	3 mm/s	(Wierzbicki T., 2010)
Geringste Prüfgeschwindigkeit	15 mm/s	BATSO 01;	0.5 mm/min	(Wierzbicki T., 2010)
Höchste Prüfkraft	1000xModul-masse bzw. 300 kN	Ineris Ellicert Version D;	200 kN	(Wierzbicki T., 2010)
Geringste Prüfkraft	13 KN	UL 1642	-	
Versuche an:				
Einzelzellen				
Batteriemodulen				
Messdatenerfassung von:				
Aufgebrachte Kraft		FreedomCAR; BATSO 01		
Deformationsweg		FreedomCAR; BATSO 01		
elektrische Spannung		FreedomCAR; BATSO 01		
Temperatur		FreedomCAR; BATSO 01		
Videodokumentation		FreedomCAR;		
Fotodokumentation		FreedomCAR;		
chemische Analyse		FreedomCAR;		
Flammbarkeitsanalyse		FreedomCAR;		

Legende:

	wird durchgeführt
	wird nicht durchgeführt

Tabelle 4: Abgeleitete Anforderungen aus der Literaturrecherche

In Tabelle 4 sind die durchaus voneinander abweichenden Anforderungen bei der Entwicklung der Prüfvorrichtung erkennbar. Die Vorschubgeschwindigkeiten von 0.5 – 3mm/min¹⁷ sind deutlich geringer als in den Prüfnormen (z.B.: 15mm/s¹⁸). Die Prüfkraft variieren von wenigen Kilonewton bis hin zu hohen Prüfkraften (ca.200 kN) bei Batteriemodulen¹⁹.

3.2 Die verwendete Lithium-Ionen Batterie

Um praktische Erfahrungen mit dem Testen von lithiumbasierenden Batterien zu sammeln, wurden Prinzipversuche an Lithium-Ionen Batterien durchgeführt. Die Zellen wurden vom Austrian Institute of Technology (AIT) für die Durchführung der vorliegenden Diplomarbeit zur Verfügung gestellt. Dabei wurden sowohl geladene als auch ungeladene Zellen getestet. Aus den Versuchen konnte sowohl das Verhalten der Zellen unter mechanischer Belastung, als auch die Reaktion (Ausgasen, Brand) von geladenen Zellen unter dieser Beanspruchung untersucht und daraus weitere Anforderungen für die zu entwickelnde Prüfvorrichtung abgeleitet werden.

Die verwendeten Testbatterien sind Lithium-Ionen Zellen mit gelartigem Elektrolyt der Fa. Amita Technologies Inc. (Modellbezeichnung: 7799130L). Diese Zellen werden Lithium-Polymer Batterien genannt und sind aktuelle, am Markt erhältliche Batteriezellen, welche hauptsächlich im Bereich des Modellbaus eingesetzt werden. Der Aufbau der Zelle ist jedoch sehr ähnlich wie jener von Traktionsbatterien für Fahrzeuge. Lediglich die Kapazität ist etwas geringer. Tabelle 5 listet einen Auszug der technischen Daten der Versuchszellen auf:

Positives Material	LiMn ₂ O ₄
Negatives Material	Graphit
Nennspannung [V]	3,8
Kapazität [Ah]	8,2
Anzahl der Betriebszyklen	1700
Gewicht [kg]	0,2
Energie [Wh]	31,4
Energiedichte gravimetrisch [Wh/kg]	157
Energiedichte volumetrisch [Wh/l]	316

Tabelle 5: Auszug technischer Daten der Versuchszelle (Amita Technologies Inc.)

¹⁷ Vgl.: (Wierzbicki T., 2010); S.3

¹⁸ Vgl.: BATSO 01 Second Edition: Manual for Evaluation of Energy Systems for Light Electric Vehicle (LEV) – Secondary Lithium Batterys; S.18-19

¹⁹ Vgl.: FreedomCAR Electrical Energy Storage System Abuse Test Manual for Electric and Hybrid Electric Vehicle Applications– Mechanical Shock Test (Ausgabe von August 2006); S.18

Das Foto einer Einzelzelle ist in Abbildung 10 dargestellt. Die Zelle besteht aus einer Aluminium-Kunststoffhülle, auch „Pouch“ genannt, dem gelartigen Elektrolyt, 24 Anodenfolien, 23 Kathodenfolien und dem gewickelten Separator. Die Abmessungen der Zelle betragen 130x98x8 (LxBxH in mm) bei einem Gewicht von 0,2kg. Genauere Untersuchungsergebnisse über den internen Aufbau sind der Diplomarbeit von (Lichtenegger, 2012) zu entnehmen. Ein detailliertes Datenblatt der verwendeten Lithium-Polymerzelle ist im Anhang der Diplomarbeit zu finden. Am oberen Ende von Abbildung 10 sind die beiden Stromableiter der positiven und negativen Elektroden sichtbar.

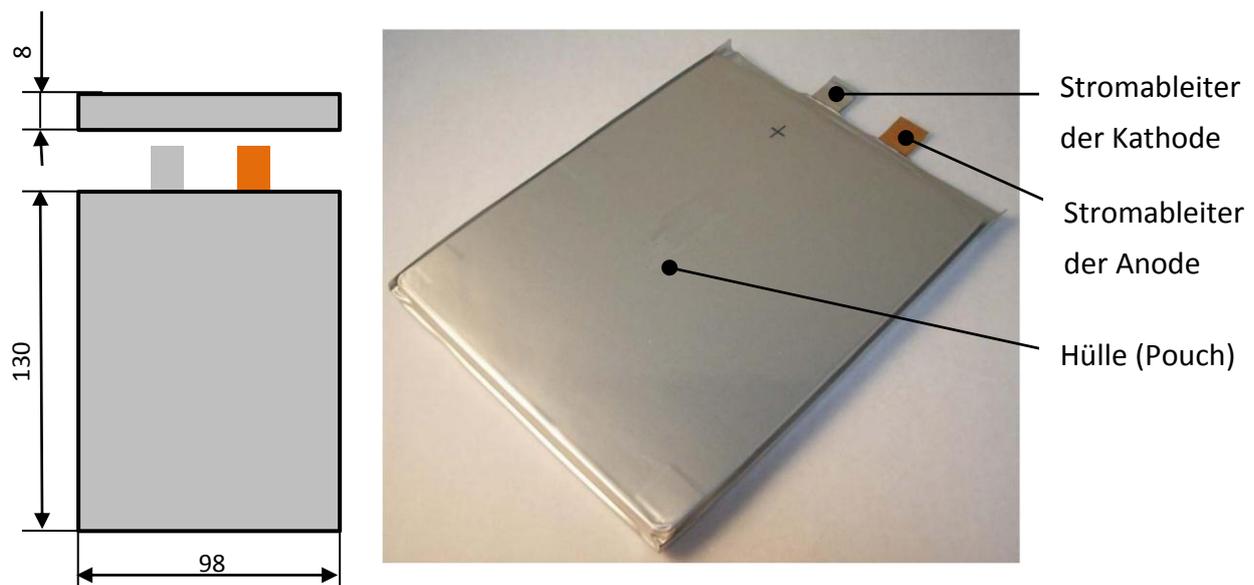


Abbildung 10: Lithium-Ionen Batterie für Versuchsdurchführungen

Wie in Kapitel 2.1.3 bereits angesprochen, werden mehrere, wie in Abbildung 10 dargestellte, Einzelzellen zu Batteriemodulen zusammengefasst, um einerseits die für Fahrzeugantriebe erforderliche Gesamtspannung und andererseits die Strombelastbarkeit des Batteriesystems zu gewährleisten. Die durchgeführten Prinzipversuche sowie daraus ableitbare Erkenntnisse werden im folgenden Unterkapitel beschrieben.

3.3 Durchführung von Prinzipversuchen zur Erstellung eines Lastenheftes

Durch die Durchführung von Vorversuchen konnten Erkenntnisse über Entstehung und die räumliche Ausbreitung von Rauch, Gasen und Flammen sowie die Verschmutzung der Prüfanlage durch den möglichen Austritt von Elektrolyt und anderen Bestandteilen der Lithium-Ionen Batterien gewonnen werden. Aus diesen Erkenntnissen sind ausschlaggebende objektive Daten für die Auslegung und Konstruktion der Prüfvorrichtung ableitbar. Des Weiteren ist auch

der Bedarf von benötigter Sicherheitsausrüstung für das Bedien- und Prüfpersonal erfassbar. Für die Versuchsdurchführung wurde eine handelsübliche Werkstattpresse (ERBA 5) entsprechend umgebaut. Die Presse wurde dahingehend adaptiert, dass die hydraulischen Komponenten möglichst feuergeschützt an der Unterseite des Hubtisches angeordnet sind (siehe Abbildung 11). Um erste Messergebnisse für die Validierung des Simulationsmodells bereitzustellen, wurden bei den Prinzipversuchen auch die Prüfkraft und der Verfahrweg der Hydraulikkolbenstange gemessen. Ebenso wurde eine Foto- und Videodokumentation der Prinzipversuche erstellt. Die technischen Daten der adaptierten Werkstattpresse, des verwendeten Hydraulikaggregats und des Messsystems sind in Tabelle 6 angeführt:

Merkmal:	Daten:	Einheit:
Marke:	ERBA	-
Abmaße (LxBxH):	820x700x1800	mm
Gewicht:	101	kg
Verfügbare Arbeitsbereich:	0-930	mm
Arbeitsbreite:	540	mm
Kolbenstangendurchmesser:	60	mm
Kolbendurchmesser:	90	mm
Kolbenhub:	190	mm
Kolbengeschwindigkeit:	1	mm/s
Maximale Prüfkraft:	50	kN
Arbeitsdruck des Hydraulikaggregats:	80	bar
Messdatenerfassungssystem:	Kayser Threde MINIDAU®	-
Längenmessung mittels Linearpotentiometer:	150	mm
Kraftmessung mittels HBM-Kraftaufnehmer	50	kN
Auflösung (Analog-Digital Konvertierung):	12 bit	-

Tabelle 6: Technische Daten der adaptierten Werkstattpresse

Die ursprüngliche Betätigung der Werkstattpresse mittels Handpumpe wurde durch ein Hydraulikaggregat ersetzt. Dadurch wird eine konstante, reproduzierbare Vorschubgeschwindigkeit und Prüfkraft des Hydraulikstempels erreicht. In Tabelle 6 ist die Stempelgeschwindigkeit (1 mm/s) und die Prüfkraft (50kN), welche für die Prinzipversuche verwendet wurden, angegeben. Neben der Steuerung der Vorschubgeschwindigkeit bietet diese Art der Betätigung auch die Möglichkeit der Einhaltung eines Sicherheitsabstandes zur Prüfvorrichtung, was in Hinblick auf die Gefahrenquellen laut Kapitel 2.3 unbedingt erforderlich ist.

Abbildung 11 stellt die erweiterte Werkstattpresse in der CAD-Umgebung von Pro-Engineer® sowie den handelsüblichen Aufbau der Presse dar:

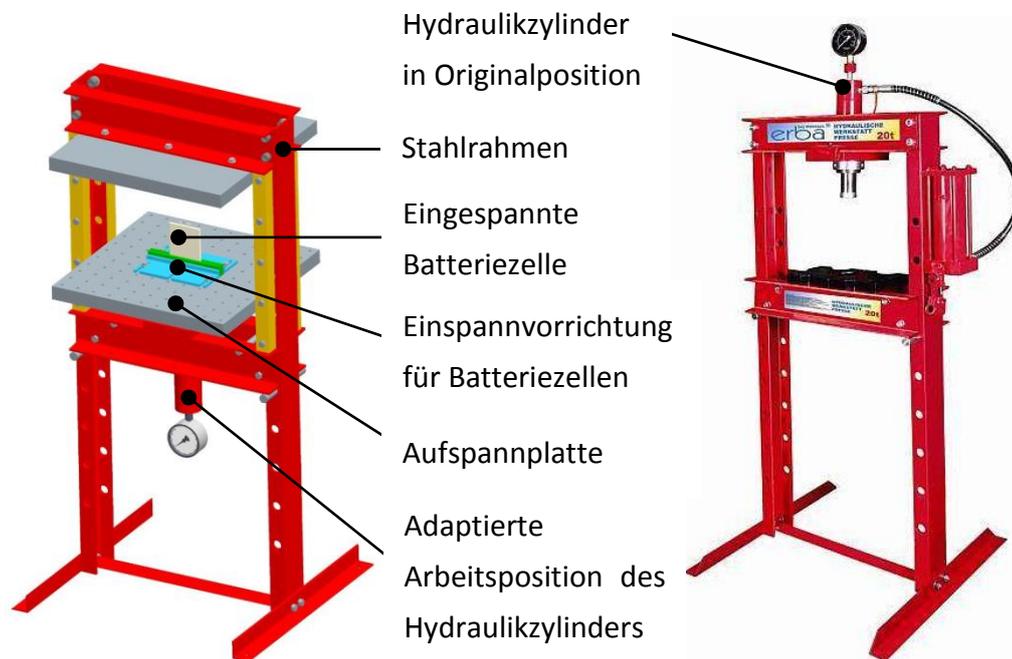


Abbildung 11: Werkstattpresse für Prinzipversuche – links: adaptierter Aufbau (ERBA 5);
rechts: handelsüblicher Aufbau

Um eine Betrachtung der Reaktionen der Versuchszellen zu ermöglichen, wurden Knick- und Penetrationsversuche durchgeführt. Die Knickversuche wurden sowohl mit ungeladenen als auch mit geladenen Batteriezellen gemacht. Tests mit ungeladenen Batteriezellen wurden in der institutseigenen Versuchshalle am Institut für Fahrzeugsicherheit der Technischen Universität Graz durchgeführt.

Die geladenen Prinzipversuche wurden am Institut für Brandschutztechnik in Linz (IBS Linz) durchgeführt, da hier sämtliche sicherheitstechnischen Vorkehrungen sowie die Möglichkeit der Brandbekämpfung gegeben sind. Zu diesen Vorkehrungen zählen eine ausreichend große Versuchshalle mit automatisiertem Lüftungssystem und Rauchgaswaschanlage, brandgeschützte Prüfstände sowie brandbekämpfungs- und brandschutztechnisch ausgebildete Mitarbeiter. Die brandgeschützten Prüfstände sind für genormte Abnahmetests von Brandschutztüren und gesamten Häuserfassaden ausgelegt.

Knicktests:

Erste Erkenntnisse über das mechanische Verhalten der Testbatterien wurden durch Knicktests an ungeladenen Batterien gewonnen. Dabei zeigte sich, dass es durch die Deformation der Zelle zum Aufplatzen der Aluminiumhülle kommen kann. Ein Austritt von Elektrolyt ist dadurch möglich.

Die Knickversuche an geladenen Lithium-Ionen Batterien liefen trotz der großen Deformation der Versuchsträger ohne Kurzschluss und Ausgasen der Zellen ab. Die große Deformation der Batteriezelle ist in nachfolgender Abbildung 12 zu sehen.

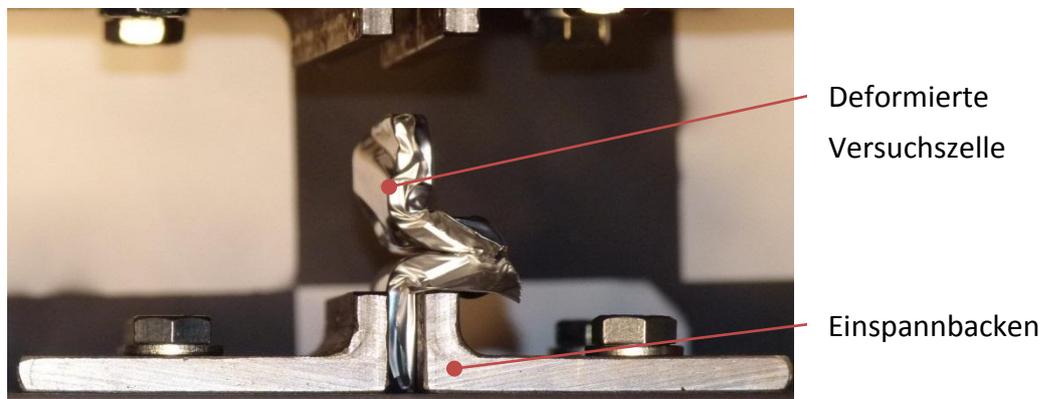


Abbildung 12: Deformierte Batteriezelle nach dem Prinzipversuch

Da es sowohl bei geladenen und ungeladenen Knicktests zum Aufreißen der Hülle kommen kann, ist das ungeschützte Berühren von Bestandteilen der Batterien unbedingt zu vermeiden. Die Verwendung von säurebeständigen Handschuhen und einer Schutzbrille beim Hantieren mit den deformierten Testbatterien ist daher unerlässlich.

Penetrationstest:

Um ein Ausgasen der Batterie im geladenen Zustand zu provozieren, wurden neben den Knicktests auch Penetrationsversuche durchgeführt. Dazu wurde ein Nagel in die obere Montageplatte eingeschraubt. Mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 1mm/s wurden die Prüfzellen anschließend penetriert. Bei der Penetration trat das Ausgasen der Zelle mitsamt der Emission von Partikeln und Elektrolyt bei allen Versuchen auf.

Die folgende Bildfolge zeigt das Ausgasen der Versuchszelle beim Nagelpenetrationsversuch in Zeitschritten von 5 Sekunden. Der Beginn der erkennbaren Reaktion wird als Zeitpunkt 0 ($t=0.0s$) festgelegt.



Abbildung 13: Ausgasen der Versuchszelle 0, 5, 10, 15 Sekunden nach optischer Erkennung des Ausgasens, Betrachtung seitlich (obere Bildfolge) und von Oben (untere Bildfolge)

Die große Gasmenge, welche schon beim Ausgasen lediglich einer Einzelzelle entsteht, ist in Abbildung 13 dargestellt. Eine Untersuchung der austretenden Bestandteile beim Ausgasen von Lithium-Ionen Batterien wurde in Kapitel 2.3 bereits vorgestellt. Der Schutz der Atemwege des Bedienpersonals vor den toxischen Bestandteilen des Gases ist unbedingt vorzusehen.

Der Extremfall eines Brandes trat beim Penetrationsversuch nur selten auf. Kam es jedoch zum Brand, so reagierte die Zelle sehr aggressiv. Die Hydraulikeinheit war durch die Anbindung an der Unterseite der Montageplatte gut vor den Flammen geschützt.

Abbildung 14 zeigt den Brand einer Einzelzelle bei einem Penetrationsversuch.



Abbildung 14: Brand einer Lithium-Ionen Zelle

Abbildung 14 zeigt deutlich, dass bei der Durchführung von geladenen Batterietests ein ausreichend großer Sicherheitsabstand zur Prüfvorrichtung unbedingt eingehalten werden muss. Am sinnvollsten ist die getrennte Anordnung von Prüf- und Kontrollraum, um den bestmöglichen Schutz des Bedienpersonals zu ermöglichen. Die Versuche selbst sind in brandgeschützter Umgebung durchzuführen. Die entstehende Rauch- und Gasmenge muss gefiltert und aus dem Prüfraum abgesaugt werden. Das Aufstellen der Prüfvorrichtung muss in einer öl- und säurebeständigen Schutzwanne erfolgen, um keine Umweltverschmutzung durch möglichen Hydraulikölverlust oder Elektrolyt- und Bestandteileaustritt aus den Batterien zu verursachen.

Beim Reinigen der Prüfvorrichtung ist das Tragen von Schutzmasken und Handschuhen ebenfalls vorzuschreiben, da das Einatmen und der Kontakt mit Schmutzpartikeln der getesteten Zellen unter allen Umständen zu verhindern ist.

Neben den Reaktionen der Zelle und den sich daraus ergebenden Sicherheitsvorkehrungen soll nun auf Erkenntnisse in Bezug auf die Funktion und die Stabilität der Prüfvorrichtung eingegangen werden.

3.3.1 Erkenntnisse aus den Prinzipversuchen in Bezug auf die mechanischen Eigenschaften der Werkstattpresse:

Bei den ersten Hubbewegungen der Presse wurde erkannt, dass die Führungsqualität des Hydraulikzylinders für Versuche zur Validierung von Simulationsmodellen nicht ausreichend ist. Bei Batterietests für die Validierung eines Simulationsmodells ist eine genaue Einhaltung von Randbedingungen erforderlich, um den Versuch im FE-Rechenmodell genau abbilden zu können. Da die Metallfolien, welche für die Elektroden der Batteriezellen verwendet werden, sehr dünn sind, müssen Messungen im hundertstel Millimeterbereich durchgeführt werden, um aussagekräftige Messergebnisse zu erhalten. Um die Genauigkeit der Messung zu ermöglichen, muss der Kolben entsprechend geführt sein. Eine weitere wesentliche Randbedingung, ist die genaue, reproduzierbare Einspannung bzw. Lage der Prüfbatterie während dem Versuch. Die schlechte Führungsqualität des Hydraulikzylinders lässt eine Rotations- und Kippbewegung der Kolbenstange und somit auch der Montageplatte zu.

Mit der adaptierten Werkstattpresse und dem Hydraulikaggregat kann eine maximale Druckkraft von 50kN erreicht werden. Bei dieser Maximalbelastung ergab sich an den Querträgern des Stahlrahmens eine Deformation von bis zu 1,75mm. Bei einer Montage der Wegmessung (Linearpotentiometer) an einem Querträger des Rahmens, wie in Abbildung 15 dargestellt, verfälscht diese Deformation dadurch direkt das Messergebnis. Eine direkte Abhängigkeit von der Deformation des Stahlrahmens besteht auch für die Position der Montageplatte und damit der Testbatterien. Dadurch kommt es zu einer Verfälschung der bereits vorhin erwähnten Randbedingungen (Einspannung, Lage der Prüfbatterie auf der Montageplatte). Ziel der zu entwickelnden Prüfvorrichtung muss also auch eine hohe Stabilität des Prüfstandes sein, um Deformationen und Lageänderungen auch bei hohen Belastungen zu minimieren.

Abbildung 15 zeigt den Aufbau der adaptierten Werkstattpresse für einen Prinzipversuch (Knickttest) an einer Testbatterie.

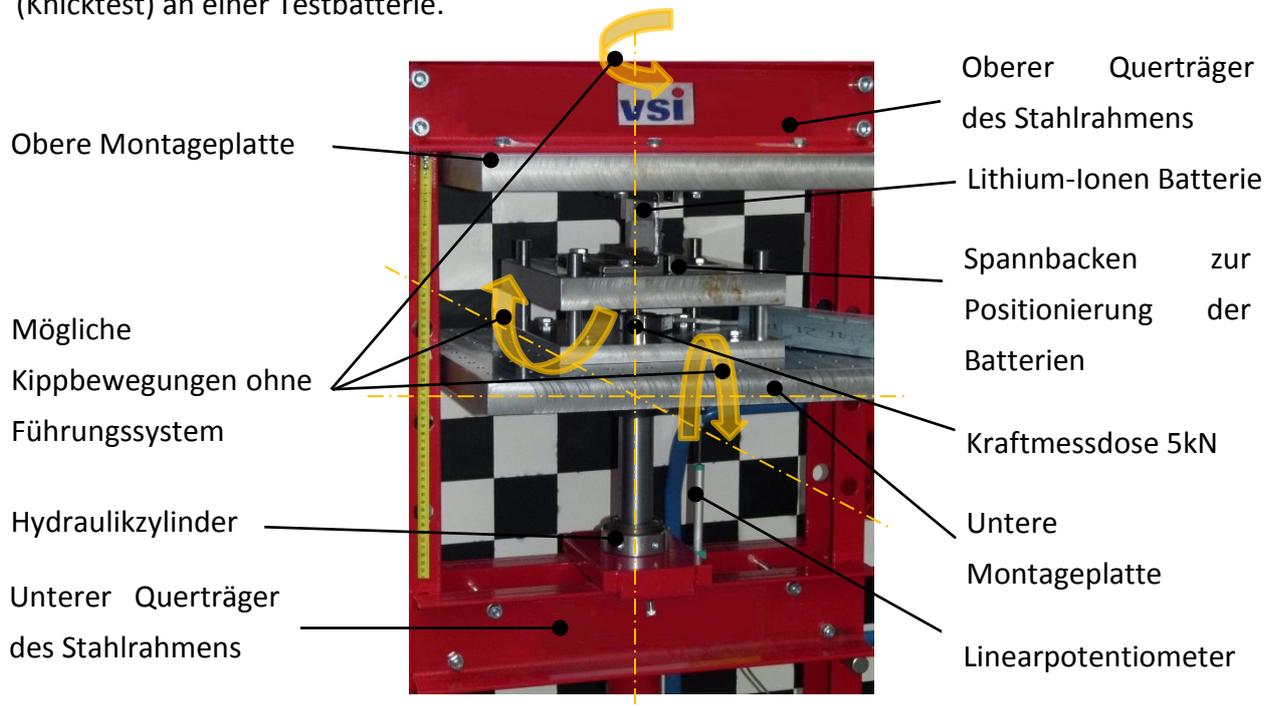


Abbildung 15: Adaptierte Werkstattpresse für Prinzipversuche

Durch eine geeignete Linearführung der unteren Montageplatte bei der Hubbewegung müssen eventuelle Kippbewegungen (siehe Abbildung 15) verhindert werden. Außerdem muss das Führungssystem auch die Aufnahme von Kräften eines außermittigen Kraftangriffs (die Kraft wird im Allgemeinen nicht zentral über dem Zylindermittelpunkt aufgebracht), welcher eine Kipp- und Schwenkbewegung der Montageplatten unterstützt, bewerkstelligen.

3.3.2 Erkenntnisse aus den Prinzipversuchen in Bezug auf die Steuerungs- und Messtechnik:

Neben der konstruktiven Auslegung und Gestaltung der Prüfvorrichtung ist auch die Entwicklung eines geeigneten Steuerungs- und Messsystems von enormer Wichtigkeit. Beide Systeme beeinflussen die Qualität der durchzuführenden Versuche in hohem Ausmaß. Folgende Aufgaben sind vom Steuerungs- und Messsystem zu erfüllen:

- Einfache und sichere Bedienung der Prüfvorrichtung, auch aus einem vom Prüfraum getrennten Kontrollraum
- Ermöglichen von reproduzierbaren Versuchsabläufen
- Möglichkeit zur exakten Steuerung von Prüfabläufen

- Möglichkeit der Erweiterung für zusätzliche Messdatenerfassung (möglichst flexible Gestaltung des Systems) und Automatisierung von Versuchsabläufen

Die Steuerung muss einerseits die Möglichkeit bieten, die Prüfvorrichtung von einem, vom Prüfraum getrennten Kontrollraum zu bedienen. Dies ist zum Schutz des Bedienpersonals vor den bereits beschriebenen Gefahrenquellen von lithiumbasierenden Batterien unbedingt notwendig. Neben sicherheitstechnischen Aspekten muss die Steuerung auch die Bedienung der Prüfvorrichtung möglichst einfach und reproduzierbar bewerkstelligen.

Das Messsystem MINIDAU® der Fa. Kayser Threde GmbH wurde für die Erfassung von Weg- und Kraftdaten bei den Prinzipversuchen verwendet. Dieses Messsystem ist für Messungen bei Crashversuchen ausgelegt. Erkenntnisse und eventuelle Nachteile dieses Messsystems in Bezug auf die Messdatenerfassung bei den durchgeführten Prinzipversuchen sind in folgender Auflistung angeführt:

- Geringe Speicherkapazität des Messsystems

Bei einer Erfassungsrate von 20 kHz wird, laut Datenblatt, mit dem Datenerfassungssystem eine Messdauer von 50 Sekunden erreicht. Im Bereich der Datenerfassung bei hochdynamischen Vorgängen während eines Crashtests ist diese Datenerfassungsdauer ausreichend (Dauer eines dynamischen Crashvorganges ca. 200 Millisekunden). Dieser begrenzte Messzeitraum ist bei Tests an Lithium-Ionen Batterien im Allgemeinen nicht ausreichend. Werden beispielsweise Versuche zur Untersuchung von schleichenden Kurzschlüssen durchgeführt, kann die Messdauer durchaus mehrere Minuten betragen. Wird beispielsweise ein Versuch durchgeführt, der fünf Minuten dauert, muss die Erfassungsrate auf 100 Hz reduziert werden. Die Erhöhung der Messdauer sollte jedoch nicht durch eine Reduktion der Datenerfassungsrate bewerkstelligt werden. Außerdem ist der im Messsystem verbaute Speicher flüchtig. Dies bedeutet, dass nach jedem durchgeführten Versuch ein Auslesen der Messdaten erfolgen muss.

- Analog/Digital Umwandlung mit einer Auflösung von 12bit

Eine Konvertierung von analogen Signalen, wie Kraft-, Weg-, oder Spannungsdaten, in digitale Daten zur computergestützten Verarbeitung mit einer Auflösung von 12bit, ist für die mechanische Untersuchung von EES, zur Validierung von prognosefähigen

Simulationsmodellen, nicht ausreichend. Ein anschauliches Beispiel kann bei Betrachtung eines Kraftaufnehmers mit einem Nennmessbereich von 500kN gegeben werden:

Es ergibt sich eine Auflösung der Kraftmessung:

$$\text{Druckkraftaufnehmer mit 500kN: } 1 \text{ LSB}^{20} = \frac{500\,000\text{N}}{2^{12}} = 122.07\text{N} \quad (1)$$

Wird der Nennmessbereich von 500kN mittels einer 12bit analog/digital Konvertierung aufgelöst, ergibt sich eine Schrittweite von 122.07N. Dies ist für eine genaue Auswertung eines Versuchs, z.B. ab welcher Belastung ein Kurzschluss eingetreten ist, nicht ausreichend. Hier wird ein Messsystem mit höherer Auflösung benötigt. Wird eine Auflösung von 16bit verwendet, verbessert sich die Schrittweite bereits um das 16-fache, auf 1 LSB=7.63N.

- Darstellung von Messdaten während der Datenerfassung

Das MINIDAU® Messsystem kann während der Datenerfassung keine Daten zur optischen Kontrolle durch das Bedienpersonal zur Verfügung stellen. Erst nach dem Beenden der Datenerfassung und dem Auslesen des flüchtigen internen Speichers können die Messdaten weiterverarbeitet werden.

- Triggerausgabe bei Erreichen von bestimmten Abbruchkriterien

Das Messsystem bietet nicht die Möglichkeit einer Triggerausgabe. Das heißt, dass beim Erreichen eines bestimmten Abbruchkriteriums, wie z.B. das Auftreten eines Abfalls der elektrischen Spannung der Batterie, ein Signal ausgegeben werden kann, welches der Steuerung der Prüfvorrichtung das Ende des Prüfvorganges signalisiert. Hier wäre eine entsprechende Kommunikation der Hardwarekomponenten des Mess- und Steuerungssystems untereinander, die optimale Lösung (Steuerung von Vorgängen über ein Softwareprogramm).

Die Prinzipversuche lieferten wichtige Erkenntnisse für die Entwicklung der Prüfvorrichtung. Es konnten einerseits Erfahrungen über Reaktionen der Lithium-Polymerzellen auf mechanische Missbrauchstests und über das mechanische Verhalten der adaptierten Werkstattpresse gesammelt werden. Andererseits konnten auch Erkenntnisse für die Entwicklung des Mess- und Steuerungssystems abgeleitet werden.

²⁰ LSB: Least Significant Bit

Die gesammelten Informationen und Erkenntnisse aus der Literaturrecherche sowie aus den Prinzipversuchen werden in einem Lastenheft aufbereitet.

3.4 Das Lastenheft für die Entwicklung der Prüfvorrichtung:

Das Lasten- und Anforderungsheft stellt die Zusammenfassung aller in den Kapiteln 2 und 3 gesammelten Erfahrungen dar. Daraus ergeben sich die Anforderungen und Vorgaben zur Entwicklung der Prüfvorrichtung. Eine Kategorisierung der Anforderungen wird nach folgender Auflistung vorgenommen:

- Mechanische Komponenten der Prüfvorrichtung
- Geführte Hubbewegung der Prüfvorrichtung
- Mess- und steuerungstechnische Komponenten der Prüfvorrichtung
- Sicherheitsvorkehrungen

Die Bewertung der Randbedingungen und gewählten Parameter erfolgt nach einer dreistufigen Bewertungsskala, welche die Dringlichkeit der Erfüllung beschreibt. Sämtliche Anforderungen und Randbedingungen werden in Tabelle 7 zu einem Lastenheft zusammengefasst.

Ableitung von Anforderungen an die zu entwickelnde Prüfumgebung und Lastenhefterstellung

Anforderungen an:	gesetzlich/ Norm	gewählt	Notwendigkeit der Erfüllung	Begründung/Kommentar
Mechanische Komponenten der Prüfvorrichtung:				
Größe und Gewicht der Prüfvorrichtung				
maximale Außenabmessungen in mm:	k.A.	2.000x2.000x2.000		Transportfähigkeit der Prüfvorrichtung
maximales Gewicht:	k.A.	1.100 kg		Transportfähigkeit und Handhabung der Prüfvorrichtung; Belastung des Bodens am Aufstellungsort (zulässige Belastung von Gitterböden und Unterbau beim Pressvorgang)
Maximale Abmessungen des Prüfraumes in mm:	k.A.	630x630x1.100		
Durchführbare Versuchskonfigurationen				
<i>Versuche laut Normen:</i>				
Crush Versuche:	siehe Tabelle 4			
Penetrationsversuche:	siehe Tabelle 4			
<i>Versuche zur Validierung von numerischen Berechnungsmodellen:</i>				Ist das Hauptziel für die Entwicklung der Prüfvorrichtung
3-Punkt Biegeversuche:				
Eindrückversuch - Impaktor:				
Eindrückversuch - Hemisphäre:				
Knickversuche:				
Antrieb der Prüfvorrichtung	k.A.	hydraulisch		Hohe Prüfkräfte, nur geringe Vorschubgeschwindigkeit, Robustheit (für rauhen Betrieb geeignet, wo mit starker Verschmutzung zu rechnen ist)
Prüfkraft	siehe Tabelle 4	400 kN		Vorgegeben durch die hydraulischen Systemkomponenten
Vorschubgeschwindigkeit				
maximal:	80 mm/s	5 mm/s		quasi-statische Belastung
minimal:	15 mm/s	0.1 mm/s		quasi-statische Belastung, geringe Dicke der Batteriezelle von 8mm
Geführte Hubbewegung der Prüfvorrichtung	k.A.	THK - Linearführungssystem		Führung durch Führungsschienen und 2-facher Anordnung von Führungswägen
Mess- und steuerungstechnische Komponenten der Prüfvorrichtung:				
Zu erfassende Daten				
Kraft	k.A.	DMS-Kraftmessdosen		Messdatenerfassung über NI 9237: Brückenmodul
Weg	k.A.	Digitales LMS		digitaler Längenmaßstab

Anforderungen an:	gesetzlich/ Norm	gewählt	Notwendigkeit der Erfüllung	Begründung/Kommentar
Spannung	k.A.	NI 9206		Analoges Messmodul für Brennstoffzellen (16 Kanäle)
Temperatur	k.A.	NI 9213		Thermoelement Eingangsmodule (16 Kanäle)
Gaskonzentration beim Venting	k.A.	-		
Video- und Fotodokumentation	k.A.	konventionelle Digitalkameras		Konventionelle Digitalkamera mit High-Speed Aufnahmefunktion
Steuerungstechnische Anforderungen	k.A.	Steuerungssystem		Reproduzierbarer Bewegungsablauf, Erfüllung von Abbruchkriterien (Weg, Kraft, elektrischer Spannungsabfall)
Auflösung des Messsystems				
Kraftmessung	-	24bit		
Längenmessung	-	1µm		Digitaler Längenmaßstab
Spannungsmessung	-	16bit		
Temperaturmessung	-	24bit		
Sicherheitsvorkehrungen für:				
Bedienpersonal	-	Schutzausrüstung, ferngesteuerte Bedienung		Schutz des Bedienpersonals vor den bestehenden Gefahrenquellen von Lithium-Ionen Batterien
Prüfvorrichtung	-	Möglichst feuergeschützte Anordnung der Komponenten, robuste Konstruktion		Schutz der Vorrichtung, des Messequipments und der Antriebskomponenten vor Verschmutzung und Flammen
Umliegende Infrastruktur und Umwelt	-	Brandschutz, Batterieentsorgung		Vermeidung der Verschmutzung und Beschädigung von Infrastruktur und Umwelt

Legende:

	nicht unbedingt erforderlich
	erforderlich
	unbedingt erforderlich

Tabelle 7: Das Lastenheft für die Entwicklung der Prüfvorrichtung

Das Lastenheft zur Entwicklung der Prüfvorrichtung laut Tabelle 7 zeigt die eindeutige Ausrichtung des Prüfstandes für quasi-statische Belastungsfälle. Durch die geringe Dicke der Lithium-Polymerbatterien von acht Millimetern wurde die maximale Vorschubgeschwindigkeit, mit 5 mm/s entsprechend niedrig gewählt. Dadurch können quasi-statische Belastungen optimal auf die Batteriezellen aufgebracht werden.

Im folgenden Unterkapitel soll auf die konzeptionellen Entscheidungen zur Erfüllung der gewählten Randbedingungen laut Lastenheft (Tabelle 7) eingegangen werden.

3.4.1 Konzeptionelle Auslegungen der mechanischen Komponenten

Größe und Gewicht der Prüfvorrichtung:

Da geladene Versuche derzeit nicht am Institut, sondern bei externen Prüfinstituten durchgeführt werden, muss der gesamte Prüfaufbau für den Transport geeignet sein. Um das Transportieren der Prüfvorrichtung, mittels PKW und Anhänger zu ermöglichen (zulässiges Gesamtgewicht von Fahrzeug und beladenem Anhänger <3.500kg), soll die Prüfvorrichtung ein Gesamtgewicht von 1.100kg nicht überschreiten. Auch die Belastung des Unterbaus, wenn die Prüfvorrichtung beispielsweise auf Gitterböden positioniert wird (zum Auffangen von austretenden Bestandteilen der Batteriezellen), muss beachtet werden, was ein weiteres Kriterium für das Gewicht der Prüfanlage ist.

Die Maximalhöhe ist mit zwei Metern beschränkt, um das Beladen und Transportieren des Prüfstandes mit dem vorhandenen Institutsanhänger zu ermöglichen. Der Pritschenhochlader mit Rahmenaufbau besitzt ein Eigengewicht von 600kg und die Abmaße 4250x2030x2000(LxBxH in mm). Auch das Bedienen und das Montieren von Prüfequipment an der Prüfvorrichtung sollte idealerweise in aufrechter Körperposition durchführbar sein.

Daraus ergeben sich folgende Parameter für die gesamte Prüfvorrichtung:

- Maximales Gewicht: 1.100kg
- Maximalhöhe (H) der Prüfvorrichtung: H=2.000mm
- Maximale Grundfläche (LxB) der Prüfvorrichtung: L=2.000mm; B=2.000mm

Zur Festlegung des notwendigen Bauraumes für die durchzuführenden Tests werden Abmessungen von aktuellen Lithium-Ionen Batteriemodulen für die Verwendung in Fahrzeugen herangezogen.

Die Abmessungen eines gängigen Batteriemoduls für ein 0-Emissionsfahrzeug im Nahverkehrsbus-Sektor betragen 543x247x99 (LxBxH in mm) (Breitfuß, 2010). Daraus kann ein benötigter Bauraum von mindestens 550x550x550 (LxBxH in mm) abgeleitet werden. Des Weiteren muss noch genügend Reserve für Mess- (z.B. Kraftmessdosens), Positionier- (z.B. Spannelemente, Auflager) und Prüfequipment (z.B.: Impaktoren) eingeplant werden, weshalb eine endgültige Bauraumbreite der Prüfvorrichtung mit 630mm festgelegt wird. Damit ist das Aufspannen und Positionieren von Einzelzellen und Batteriemodulen möglich. Auch die Höhe der Prüfanlage wird durch die maximalen Abmessungen des Batteriemoduls bestimmt. Eine weitere Bedingung für die Ausbauhöhe der zu entwickelnden Prüfvorrichtung ist die Möglichkeit, das vollständige Zusammenführen der Aufbauplatten zu ermöglichen. Aus diesen Bedingungen ergibt sich die Mindesthöhe des Prüfraumes der Vorrichtung mit 1.100mm (längste Modulabmessung x 2= 1.086mm).

Aus diesen Festlegungen ergeben sich folgende Prüfraumabmessungen:

- Erforderliche Prüfraummindesthöhe: 1.100mm
- Erforderliche Bauraumgrundfläche: 630x630mm

Durchführbare Versuchskonfigurationen:

Die Erstellung von Validierungsdaten für prognosefähige Simulationsmodelle im quasi-statischen Belastungsfall ist das Hauptziel der Entwicklung der Prüfvorrichtung. Das Durchführen von vorgeschriebenen Versuchen ist aber prinzipiell möglich, wenn die Vorschubgeschwindigkeit des Hydrauliksystems entsprechend angepasst wird (siehe Tabelle 7).

Folgende Versuchskonfigurationen sollen durchführbar sein:

- Versuchskonfiguration für die Validierung von numerischen Berechnungsmodellen
- Vorgeschriebene quasi- statische Versuchskonfigurationen aus Normen, Vorschriften und Standards
- Versuche an Einzelzellen
- Versuche an Batteriemodulen

Antrieb der Prüfvorrichtung:

Für den Antrieb der Anlage wurden folgende Varianten untersucht:

- Betätigung über Antriebsspindeln und Servomotoren
- Pneumatischer Antrieb
- Hydraulischer Antrieb

Der Antrieb über Spindeltriebe (beispielsweise Kugelumlaufspindeln), welche über Servomotoren bewegt werden, ist eine Variante, die sehr genaue Bewegungsabläufe zulässt. Dieser Antrieb wird bei Werkzeugmaschinen verwendet und ermöglicht hohe Positioniergenauigkeiten und Vorschubgeschwindigkeiten. Im Vergleich zu den anderen Varianten ist die Anschaffung mit höheren Kosten verbunden, da die Kosten für Servomotoren und Spindeln mit Kugelumlaufeinheiten höher sind als für pneumatische oder hydraulische Komponenten. Der Schutz der empfindlichen Bauteile und die brandgeschützte Anordnung der Antriebsspindeln ist schwieriger zu realisieren, als bei den beiden anderen Antriebskonzepten. Sowohl der pneumatische Antrieb, als auch der hydraulische Antrieb kann feuergeschützt, unterhalb der zu bewegenden Teile angeordnet werden (Hubbewegung über ein Kolbensystem). Allerdings sind für große Kräfte sehr hohe pneumatische Drücke aufzubringen. Auch die Kompressibilität der Luft ist als Nachteil zu nennen, wenn Standversuche an zu prüfenden Batterien durchgeführt werden sollen. Unter Standversuchen ist das Aufbringen einer konstanten Kraft auf einen Prüfkörper über einen bestimmten Zeitraum (z.B. zwei minütige Dauer der konstanten Belastung) zu verstehen. Der Antrieb über Hydraulikkomponenten kann die Nachteile der anderen Konzepte kompensieren. Hydraulische Antriebe sind robust gegenüber Verschmutzung, können sehr hohe Kräfte bei kleinem Bauraum realisieren und ermöglichen durch entsprechende Regelungen exakte Bewegungsabläufe. Die brandgeschützte Anordnung der Komponenten ist, wie bereits erwähnt, einfach durch eine verdeckte Anordnung möglich. Die Inkompressibilität des Mediums ermöglicht auch das Durchführen von Standversuchen.

Aus diesen Gründen fiel die Entscheidung bei der Wahl des Antriebskonzepts auf die hydraulische Variante.

Prüfkraft und Vorschubgeschwindigkeit:

Das Hauptaugenmerk der Festlegung der Vorschubgeschwindigkeit liegt bei den Tests für die Validierung von prognosefähigen Simulationsmodellen und hier besonders bei der Erkennung von Kurzschlüssen durch mechanische Verformungen der Batterien im Versuch.

Die maximalen Prüfkraften sowie die erreichbaren Vorschubgeschwindigkeiten ergeben sich durch die Systemkomponenten des Antriebssystems. Das hydraulische Antriebssystem besteht aus folgenden Komponenten:

- Kompakt-Hydraulikaggregat
- Doppelseitig wirkender Hydraulikzylinder
- Proportional Stromregelventil
- Proportional Druckbegrenzungsventil

Die Auslegung der Hydraulikeinheit erfolgt unter Berücksichtigung von Maximalkraft und dem gewählten Bereich der Prüfgeschwindigkeiten laut Lastenheft (Tabelle 7).

- Maximale Prüfkraft: 400kN
- Maximale Vorschubgeschwindigkeit: 5 mm/s
- Minimale Vorschubgeschwindigkeit: 0.1 mm/s

Bei verlustloser Betrachtung ergibt sich nach Formel (2) ein benötigter Volumenstrom (\dot{V}), der von der Fläche des Hydraulikkolbens (A) und der Vorschubgeschwindigkeit (v) abhängt:

$$\dot{V} \left[\frac{1}{\text{min}} \right] = 0.06 \times A \text{ [mm}^2\text{]} \times v \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad (2)$$

Der erreichbare maximale Volumenstrom wird einerseits durch das Hydraulikaggregat und andererseits durch das proportionale Stromregelventil bestimmt.

Die erreichbare Druckkraft (F) des Hydrauliksystems wird durch den begrenzten Systemdruck (p_{System}) des Hydraulikaggregats bzw. des Druckbegrenzungsventils und die Fläche des Hydraulikkolbens (A_{Kolben}) festgelegt. Formel (3) beschreibt diesen Zusammenhang:

$$F \text{ [kN]} = \frac{p_{\text{System}}[\text{Pa}] \times A_{\text{Kolben}} \text{ [m}^2\text{]}}{10^3} \quad (3)$$

Mit den Formeln 2 und 3, können die grundlegenden Anforderungen an die Hydraulikkomponenten berechnet werden. Dazu wurden Annahmen, welche in folgender Tabelle 8 aufgelistet sind, getroffen:

<u>Annahme:</u>	<u>Wert:</u>	<u>Einheit:</u>
Zylinderdurchmesser d_{zyl}	120	mm
Kolbenstangendurchmesser d_k	60	mm
Maximaler Systemdruck p_{system}	200	bar

Tabelle 8: Annahmen für die Auslegung der Hydraulikkomponenten

Die Ergebnisse der berechneten Kraftwerte und Volumenströme sind nachfolgend zusammengefasst:

Erreichbare Druckkraft: $F_D = 226,19 \text{ kN}$

Erreichbare Zugkraft: $F_Z = 169,65 \text{ kN}$

	Ausfahren mit maximaler Vorschubgeschwindigkeit:	Ausfahren mit minimaler Vorschubgeschwindigkeit:	Einfahren mit maximaler Vorschubgeschwindigkeit:	Einfahren mit minimaler Vorschubgeschwindigkeit:
Benötigter Volumenstrom [l/min]:	3,39	0,068	2,54	0,051

Tabelle 9: Benötigter Volumenstrom zum Erreichen der gewählten Vorschubgeschwindigkeiten

Die zu geringe Fläche des Hydraulikkolbens bzw. der zu geringe Systemdruck verhindern das Erreichen der geforderten Druckkraft von 400kN. Eine entsprechende Änderung der Systemkomponenten ist somit erforderlich.

Tabelle 10 zeigt die technischen Daten des gewählten Hydraulikaggregats.

<u>Eckdaten:</u>	<u>Wert:</u>	<u>Einheit:</u>
Nennleistung	3	kW
Förderstrom	7,2	l/min
Maximaldruck der Druckbegrenzung	250	bar
Abmaße (LxBxH)	458x240x511	mm

Tabelle 10: Eckdaten des Hydraulikaggregats und des Druckbegrenzungsventils

Die Geschwindigkeitsregelung erfolgt mit einem proportionalen 2-Wege-Stromregelventil. Dieses Regelventil ist mit einem Magneten ausgeführt, welcher eine Querschnittsänderung des

Ventils proportional zum Magnetbetätigungsstrom zulässt. Die möglichen Durchflussmengen sind in Tabelle 11 dargestellt:

<u>Durchflussmengen:</u>	<u>Wert:</u>	<u>Einheit:</u>
Minimale Durchflussmenge V_{\min}	0,1	l/min
Maximale Durchflussmenge V_{\max}	6	l/min

Tabelle 11: Grenzen der Durchflussmengen des verwendeten proportionalen Stromregelventils

Zwischen den in Tabelle 11 angeführten Grenzwerten kann stufenlos die Fördermenge bzw. die damit verbundene Vorschubgeschwindigkeit eingestellt werden.

Durch den zweiseitig wirkenden Hydraulikzylinder ist es neben dem Aufbringen von Druckbelastungen möglich, auch Zugbeanspruchungen durch eine kontrollierte Einfahrbewegung des Kolbens, zu ermöglichen. Die Zylinderabmessungen sind in folgender Tabelle 12 aufgelistet:

<u>Abmessung:</u>	<u>Wert:</u>	<u>Einheit:</u>
Zylinderdurchmesser d_{Zyl}	150	mm
Kolbenstangendurchmesser d_K	90	mm
Maximaler Hub	400	mm

Tabelle 12: Abmessungen des Hydraulikzylinders

Die Berechnung der Bewegungsgeschwindigkeiten und Druckkraft des Hydraulikkolbens laut Formel (2) und (3) ergeben, mit den durch die ausgewählten Systemkomponenten neu definierten Parametern folgende Werte:

<u>Parameter:</u>	<u>Wert (verlustfrei):</u>	<u>Wert (verlust-behaftet $\eta=90\%$):</u>	<u>Einheit:</u>
Maximale Vorschubgeschwindigkeit ($v_{V\max}$)	5,65	5,09	mm/s
Minimale Vorschubgeschwindigkeit ($v_{V\min}$)	0,094	0,085	mm/s
Maximale Rückschubgeschwindigkeit ($v_{R\max}$)	8,84	7,96	mm/s
Minimale Rückschubgeschwindigkeit ($v_{R\min}$)	0,147	0,132	mm/s
Maximale Druckkraft (F_D)	441,78	397,60	kN
Maximale Zugkraft (F_Z)	282,74	254,47	kN

Tabelle 13: Berechnete Vorschubgeschwindigkeiten und Prüfkräfte der entwickelten Prüfvorrichtung

Die in der Tabelle 13 angeführten Werte der zweiten Spalte werden nur bei verlustfreier Betrachtung erreicht. Die Fa. HAWE Hydraulik SE gibt für die Kombination der

Hydraulikkomponenten jedoch einen Gesamtwirkungsgrad von $\eta_{\text{ges}} \geq 90\%$ an. Damit ergeben sich die in der dritten Spalte von Tabelle 13 berechneten Werte. Für die Berechnung der verlustbehafteten Werte wurde der Gesamtwirkungsgrad von $\eta = 90\%$ als Basis herangezogen. Nachfolgende Formel (4) zeigt die Berechnung der maximalen Druckkraft ($F_{D,\text{Auslegung}}$) unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades ($\eta = 90\%$):

$$F_{D,\text{Auslegung}} = \frac{\eta_{\text{ges}}[\%]}{100[\%]} \times F_D[\text{kN}] = 0.9 \times 441,78 [\text{kN}] = 397,6 [\text{kN}] \sim 400 [\text{kN}] \quad (4)$$

Mit dem in Formel (4) berechneten Wert von 400kN, wird die konstruktive Auslegung der mechanischen Bauteile, wie Rahmenaufbau und Zylinderanbindung durchgeführt. Diese Auslegung wird in Kapitel 4.2 näher beschrieben.

Mit den in Tabelle 13 angeführten, berechneten Werten, werden die im Lastenheft geforderten Prüfgeschwindigkeiten bzw. die geforderte Prüfkraft abgedeckt.

Neben der Prüfkraft und den Vorschubgeschwindigkeiten sollen die Abmaße des Hydraulikaggregats kompakt genug ausgeführt sein, um die Montage am Rahmen der Prüfvorrichtung zu ermöglichen. Durch die geringen Abmessungen (siehe Tabelle 10) ist eine möglichst feuergeschützte Integration am Rahmen der Prüfvorrichtung möglich. Auch der Transport der Prüfvorrichtung wird durch diese Maßnahme vereinfacht, da keine Demontage des Hydrauliksystems notwendig ist.

Geführte Hubbewegung der Prüfvorrichtung

Die bereits in Kapitel 3.3.1 erwähnten unerwünschten Rotations- und Kippbewegungen bei der Hubbewegung der adaptierten Werkstattpresse werden bereits durch den hochwertigen, zweiseitig wirkenden Hydraulikzylinder wesentlich verbessert. Trotzdem soll zur Minimierung der nachteiligen Rotations- und Kippvorgänge ein geführter Bewegungsablauf der bewegten Komponenten erfolgen. Dazu muss ein Führungssystem eingesetzt werden, welches eine präzise Führung der Hubbewegung bewerkstelligen kann und gleichzeitig unempfindlich gegenüber Verschmutzungen ist. Dies wird durch ein Linearführungssystem bewerkstelligt. Das Linearführungssystem besteht aus einer Führungsschiene mit dazugehörigen Führungswagen mit Kugelführung. An dieses Führungssystem soll in weiterer Folge auch das Längenmesssystem angebunden werden, um ein mögliches Verfälschen der Wegmessung durch indirekte Messung und dadurch auftretende Verformungen bei Belastung der Prüfvorrichtung zu minimieren.

3.4.2 Konzeptionelle Auslegungen der steuerungs- und messtechnischen Komponenten

Neben den mechanischen Komponenten müssen auch die Komponenten für die steuerungs- und messtechnischen Anforderungen konzipiert werden. Dabei muss neben der Messdatenerfassung auch die Bedienung der Prüfanlage konzipiert werden.

Zu erfassende Daten während des Versuchs:

Die zu erfassenden Daten gliedern sich wie folgt nach:

- Kraft
- Weg
- Elektrische Spannung
- Temperatur

Die Auflösung der Messtechnik muss für eine optimale Aufbereitung der Messdaten für die Validierung des Simulationsmodells, wie in Kapitel 3.3.2 gezeigt, entsprechend ausgelegt werden. Wird die Auflösung der Kraftmessung nicht mit 12-bit sondern mit der gewählten Anforderung von 24-bit aufgelöst, ergibt sich nach Formel (1) eine Verbesserung der Auflösung um den Faktor 2^{12} .

Kraftaufnehmer mit einem Messbereich von 500kN: $1 \text{ LSB} = \frac{500\,000\text{N}}{2^{24}} = 0.0298\text{N}$

Dies bedeutet eine Schrittweite bei der Messung mit einem 500kN-Kraftaufnehmer von 0.0298 Newton²¹. Selbiges gilt auch für die Wegmessung und die Erfassung der elektrischen Spannung. Diese Schrittweite kann allerdings nur erreicht werden, wenn auch die verwendeten Sensoren eine entsprechende Genauigkeit aufweisen (Linearitätsabweichung, Temperatureinfluss, Exzentrizitätseinfluss).

Die Temperaturmessung wird als erforderliche messtechnisch zu erfassende Größe angeführt. Sie kann zur Kurzschlussdetektion zusätzlich zur Messung der elektrischen Spannung eingesetzt werden. Dabei wird durch Messung der Oberflächentemperatur an Einzelzellen die örtliche Position der Temperaturerhöhung bei Eintritt eines möglichen internen Kurzschlusses erfasst.

²¹ Vgl.: Schrittweite von 122,07 Newton bei einer Auflösung von 12-bit

Steuerungstechnische Auslegung:

Die definierte, gesteuerte Bewegung der Prüfvorrichtung ist für reproduzierbare Versuchskonfigurationen unerlässlich. Das softwaregesteuerte Ansprechen der Hardwarekomponenten bietet vor allem den Vorteil einer außerordentlichen Flexibilität des Steuerungssystems. Wird das Mess- und Steuerungssystem als eine Einheit (hardware- und softwaretechnisch) ausgeführt, kann ein optimales Zusammenspiel der Komponenten erreicht werden. Eine schnelle Reaktion der Steuerung der Prüfanlage auf bestimmte Wertänderungen bei der Messdatenerfassung kann als wesentlicher Vorteil einer solchen Konfiguration angesehen werden. Dies kann beim Erreichen von definierten Abbruchkriterien ausgenutzt werden. Soll die Prüfanlage beispielsweise beim Erreichen eines bestimmten Wegwertes die Vorschubbewegung sofort beenden, kann dieser Vorteil genutzt werden. Weitere Anforderungen an die steuerungstechnische Auslegung der Vorrichtung sind:

- Gleichmäßigkeit der Bewegung während des Versuchs
- Hohe Reproduzierbarkeit der Bewegung (Einstellbare Vorschubgeschwindigkeit und Prüfkraft)
- Bereitstellen einer flexiblen Entwicklungsumgebung für rasche Rekonfigurationen und Erweiterungen der Mess- und Steuerungseinheit

Hier bietet beispielsweise die National Instruments GmbH, entsprechende Systemkomponenten zur flexiblen Entwicklung von Steuerungs- und Messsystemen an.

Sicherheitsvorkehrungen für Bedienpersonal und Prüfvorrichtung:

Notwendige Sicherheitsvorkehrungen umfassen neben dem Schutz des Bedienpersonals auch die Prüfvorrichtung selbst sowie die umgebende Infrastruktur und Umwelt.

- Bedienpersonal:

Der Schutz des Bedienpersonals wird vor allem durch die Gefahrenquellen von EES benötigt. Diese wurden bereits in Kapitel 2.3 vorgestellt. Erkenntnisse aus den durchgeführten Prinzipversuchen wurden in Kapitel 3.3 beschrieben. Folgende Anforderungen können genannt werden:

- Verwenden von Schutzausrüstung während und nach durchgeführten Versuchen (säurebeständige Handschuhe, Atemschutzmasken) um das Einatmen und den Kontakt mit toxischen Bestandteilen der Batterien zu vermeiden;
- Bedienung der Prüfvorrichtung aus einem zur Prüfvorrichtung getrennten Bedienraum (Gefahr durch z.B.: Brand, Explosion, Ausgasen der Zellen, Austritt von Elektrolyt und Partikeln). Einhalten eines Sicherheitsabstandes von mindestens zehn Metern zur Prüfvorrichtung, wenn kein getrennter Bedienraum bei Versuchen vorhanden ist;
- Möglichkeit des sofortigen Testabbruchs (Not-Aus Betätigung zum Stoppen der Prüfanlage, beispielsweise im Fall einer Fehlfunktion der Vorrichtung).

○ Prüfvorrichtung:

Die Prüfvorrichtung muss durch eine entsprechende Konstruktion des Aufbaus einen Schutz der Antriebs- und Messkomponenten bieten. Zu den gewählten Anforderungen zählen:

- Schutz der Antriebskomponenten vor Brand und Verschmutzung
- Schutz des Messequipments vor Brand und Verschmutzung

○ Infrastruktur und Umwelt:

Der Schutz der umgebenden Infrastruktur und Umwelt ist nicht direkte Aufgabe der Entwicklung der Prüfvorrichtung, sondern kann als Anforderung bei der Auslegung einer sicheren Prüfumgebung für die Durchführung von Versuchen an EES gesehen werden. Dabei kann durch entsprechende Sensorik zur Erfassung des Austritts von brennbaren Gasen, Auffangwannen zur Verhinderung der Verschmutzung der Umwelt durch Austritt von flüssigen und festen Bestandteilen aus EES und eine explosionsgeschützte Ausführung der Prüfumgebung ein größtmöglicher Schutz erreicht werden.

Durch eine Literaturrecherche und die Durchführung von Prinzipversuchen an Lithium-Polymerzellen konnten Anforderungen an die zu entwickelnde Prüfvorrichtung abgeleitet und in einem Lastenheft zusammengefasst werden. Dabei mussten einerseits entsprechende Festlegungen in Hinblick auf die durchzuführenden Versuche und den mechanischen Aufbau der Vorrichtung getroffen werden. Andererseits mussten auch Randbedingungen für die Mess- und Steuerungstechnik als auch für notwendige Schutzmaßnahmen festgelegt werden. Diese festgelegten Anforderungen wurden konzeptionell ausgelegt. Durch die Festlegung auf quasi-statische Versuchskonfigurationen wurden entsprechende Vorschubgeschwindigkeiten und

Prüfkräfte definiert. Dadurch konnte der Antrieb der Prüfvorrichtung ausgelegt werden. Durch eine erste Messdatenerfassung während den Prinzipversuchen wurden auch Anforderungen an die digitale Auflösung der Messsystemkomponenten, die Speicherung der Messdaten und die Interaktion des Mess- und Steuerungssystems mit der Prüfvorrichtung ableitbar. Der Schutz des Bedienpersonals und der Prüfvorrichtung erfordert einerseits eine entsprechende Schutzausrüstung (Schutzbekleidung, Atemschutz) für das Bedienpersonal und andererseits eine möglichst geschützte Positionierung der Antriebs-, Führungs- und Messsystemkomponenten.

Das folgende Kapitel zeigt die konstruktive Entwicklung und Auslegung der mechanischen Komponenten der Prüfanlage unter Berücksichtigung der festgelegten Parameter sowie konzeptionell ausgelegten Komponenten. In weiterer Folge wird auch der fertiggestellte Prüfstand beschrieben. Auch die verwendete Hardware des Mess- und Steuerungssystems wird in Kapitel 4 beschrieben.

4 Auslegung und Konstruktion der Prüfvorrichtung

Der Planung und Realisierung der Prüfvorrichtung gingen die Überlegungen aus den Kapiteln 2 und 3 voraus. Des Weiteren wurde eine Untersuchung von am Markt erhältlichen Pressen durchgeführt, weil die Grundfunktionen von Batterieprüfständen für mechanische Untersuchungen unter quasi-statischen Belastungen und Pressen sehr ähnlich sind. Dennoch sind am Markt erhältliche Pressen nicht für die speziellen Anforderungen einer derartigen Prüfvorrichtung für das Testen von Hochvoltbatterien ausgelegt (siehe 4.1.1). Zunächst sollen die Anforderungen an den Prüfaufbau sowie die Überlegungen, welche zur Durchführung einer Eigenkonstruktion führten, zusammengefasst werden. Danach werden die wichtigsten Einzelkomponenten der Prüfvorrichtung und auch deren Auslegung beschrieben. Die konstruktive Auslegung und die statische Finite Elemente-Berechnung (FE-Berechnung) wurden in Pro-Engineer® durchgeführt.

4.1 Anforderungen an eine statische Prüfvorrichtung

Die Anforderungen an eine statische Prüfvorrichtung zum Testen von Batteriezellen, sind in folgender Auflistung zusammengefasst.

Anlagenspezifisch:

- Mechanisch stabile Ausführung, um Verformungen des Aufbaus zu minimieren
- Wegmessung an Stellen geringster Verformung des Prüfstands
- Kraftmessung möglichst direkt am Versuchsträger
- Gleichmäßige, geführte Hubbewegung
- Ausreichende Kraftreserve für erweiterte Anwendungsfälle
- Möglichst brandgeschützte Anordnung der Antriebselemente und Messsystemkomponenten
- Gute Reproduzierbarkeit der Versuche
- Aufspannmöglichkeit von Batterieeinzelzellen und Batteriemodulen
- Möglichst flexible Handhabbarkeit (verschieben, befestigen)
- Transportfähigkeit

Sicherheitsspezifisch:

- Schutzvorrichtungen zur Vermeidung von Unfällen (NOT-AUS Taster, Unterbrechung der Stromzufuhr, eventuell optische Warnung bei einer Versuchsdurchführung durch ein Blinklicht)
- Fernsteuerung der Prüfeinrichtung, um ausreichenden Abstand bei der Bedienung der Prüfvorrichtung zu Gefahrenquellen zu ermöglichen

Diese Anforderungen sind bei der Auslegung der Prüfvorrichtung für eine minimale Gefährdung des Prüfpersonals beziehungsweise zum Erreichen höchster Genauigkeit der Messungen zu berücksichtigen.

4.1.1 Gründe für die Eigenkonstruktion

Eine vorab durchgeführte Recherche von am Markt erhältlichen Pressen zeigte, dass keine am Markt befindliche Prüfvorrichtung die gestellten Anforderungen zur Gänze abdecken kann. Es werden Werkstattpressen angeboten, welche die gewünschte Druckkraft von 400kN aufbringen können. Die Anforderungen an Führungsqualität und die Möglichkeit des Erreichens geringer Vorschubgeschwindigkeiten (unter 1mm/s) bei möglichst stabiler und dennoch möglichst leichter Ausführung (für den Transport) werden jedoch bei weitem nicht erreicht. Bei einer Fremdvergabe der Auslegung und Fertigung der Prüfvorrichtung muss mit hohen Kosten gerechnet werden, da die Entwicklung in den Bereich von hydraulischen Sonderpressen fällt. Dies führte zur Erkenntnis, dass eine Eigenkonstruktion am Vielversprechendsten ist. Neben den rein mechanischen Anforderungen an die Presse, ergeben sich durch den Einsatzzweck auch Anforderungen an die Steuerung, die sich von üblichen Pressen unterscheidet. Einerseits soll die Betätigung der Vorrichtung manuell erfolgen (z.B. für Prinzipversuche), andererseits ist ein automatischer Prüfablauf für möglichst hohe Reproduzierbarkeit der Tests vorzusehen. Für diese Fälle ist eine Steuerungssoftware nötig, welche für zukünftige, beliebige Testkonfigurationen einfach erweitert werden kann. Um dies zu erreichen, muss auch eine Selbstentwicklung der Steuerung realisiert werden. Die Selbstentwicklung bringt weitere Vorteile durch die hohe Flexibilität in Hinsicht auf die Entwicklung und Anpassung des Systems mit sich. Dadurch ist die Lösung von zukünftigen Anforderungen unkompliziert möglich.

4.2 Konstruktion der mechanischen Komponenten

Die Auslegung der Prüfvorrichtung gliedert sich in zwei Baugruppen, welche in Abbildung 16 dargestellt sind.

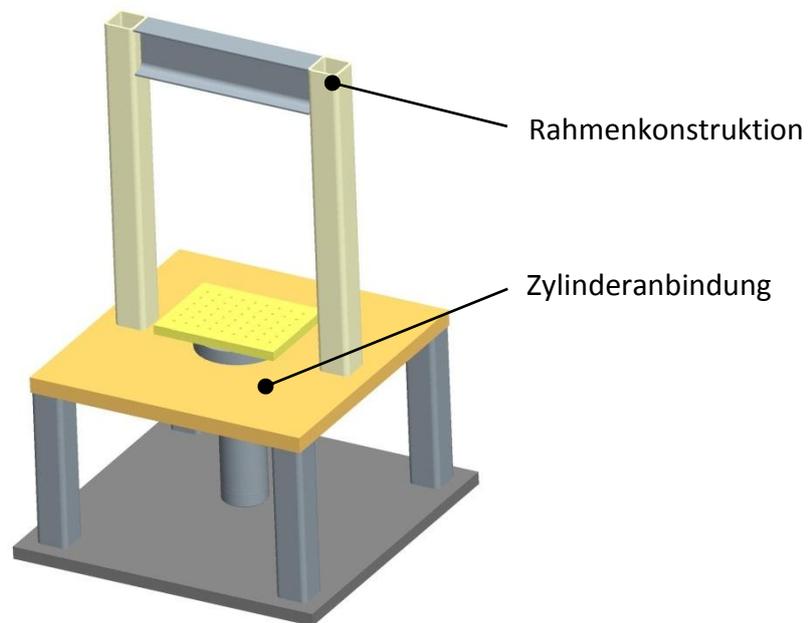


Abbildung 16: Die Komponenten der Prüfvorrichtung

Abbildung 16 zeigt eine frühe Variante bei der Auslegung der Prüfvorrichtung. Grundsätzlich ist bei den mechanischen Komponenten zwischen der Rahmenkonstruktion und der Zylinderanbindung zu unterscheiden. Der Rahmen und die Bauteile der Zylinderanbindung wurden mittels einer statischen FE-Berechnung ausgelegt. Diese Auslegung erfolgt auf die maximale Druckkraft des Hydraulikkolbens, da die Zugkraft auf Grund der reduzierten Kolbenfläche geringer ist. Alle bereits gewonnenen Erkenntnisse und festgelegten Anforderungen flossen in die Auslegung der Komponenten ein.

4.2.1 Rahmenkonstruktion:

Die Rahmenkonstruktion stellt die Basis für den Aufbau der Prüfvorrichtung dar. Die Hauptkriterien sind einerseits die Maximalabmessungen laut Lastenheft (siehe Kapitel 3.4), andererseits die Erreichung hoher Steifigkeit des Aufbaus bei gleichzeitig hoher Flexibilität (für unterschiedliche Versuchskonfigurationen) und geringem Gewicht (Handhabbarkeit). Zur Erfüllung dieser Anforderungen eignet sich eine Portalbauweise des Rahmens sehr gut. Bei der konstruktiven Gestaltung wurden unterschiedliche Konzepte untersucht. Es wurde mittels statischer FE-Berechnung iterativ die Maximalverformung des Querträgers des Rahmens

berechnet, um diejenige Variante zu ermitteln, welche die geringsten Deformationen bei der maximalen Belastungskraft und minimalem Gewicht zulässt. Die Länge des Querträgers (630mm laut Lastenheft) sowie die Länge der vertikalen Profile (1.100mm laut Lastenheft) wurde hierzu bei allen Varianten konstant gehalten, um die Vergleichbarkeit zu ermöglichen. Die Belastung für die statische FE-Analyse wurde definiert durch eine Flächenlast mit 400kN auf die flach angeordnete Prüfbatterie²², welche mittig auf der oberen Aufspannplatte positioniert wird (siehe Abbildung 18). Die feste Einspannbedingung am Montagefuß der vertikalen Profile spiegelt nicht zur Gänze die realen Randbedingungen der Beanspruchung wieder. Dies stellt aber für die Auslegung kein Problem dar, da die identen Randbedingungen bei der FE-Berechnung der einzelnen Konzepte verwendet wurden und es um einen reinen Relativvergleich der oberen Querträger geht. Abbildung 17 zeigt ein Rahmenkonzept während der iterativen Auslegung der Bauteile:

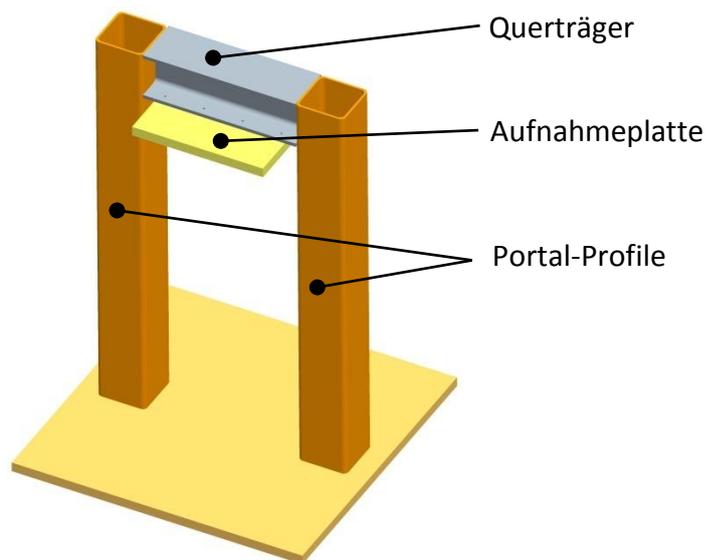


Abbildung 17: Konzept zur Auslegung der Rahmenprofile

Das Konzept laut Abbildung 17 wurde mit quadratischen Hohlprofilen (200x200mm) für die vertikalen Portal-Profile ausgeführt. Als Querträger kam ein I-Profil (Breitflansch IPB 200) zum Einsatz. Vorteile dieser Variante sind der einfache Aufbau durch Verwendung von genormten Stahlprofilen, sowie die einfache Möglichkeit der Befestigung von Prüfequipment (wie etwa Aufnahmeplatten mit Impaktoren) am Querträger. Nachteile ergeben sich aus der Deformation des Querträgers, welche durch geeignete einfache Maßnahmen weiter minimiert werden

²² Prüfbatterie: Lithium-Polymer Batterie der Prinzipversuche (siehe Kapitel 3.2)

können. Zusätzlich darf das Maximalgewicht der in Abbildung 17 dargestellten Komponenten ein Gesamtgewicht von 550kg nicht überschreiten, um das geforderte Gesamtgewicht laut Lastenheft (Gesamtgewicht der Prüfvorrichtung < 1.100 kg) nicht zu überschreiten.

Die Simulationsergebnisse aus Pro-Engineer® zeigt Abbildung 18 (maximalverformt, Skalierungsfaktor der Verformung=90):

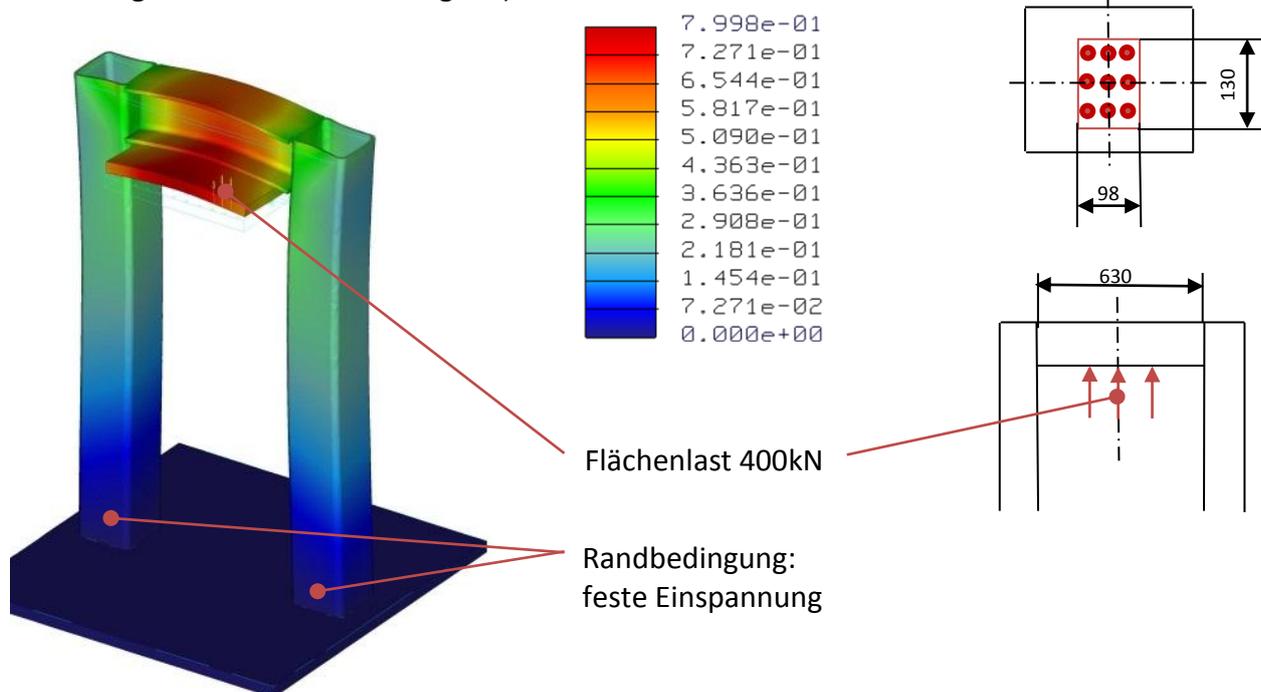


Abbildung 18: Statische FE-Analyse eines Rahmenkonzeptes in Pro-Engineer® und Lastannahme

Die statische FE-Simulation ergab eine maximale Verschiebung von 0,8mm (siehe Abbildung 18) am Querträger.

Für die letztendliche Ausführung der Konstruktion werden Breitflanschträger für sämtliche Grundelemente (Portal-Profile und Querträger) verwendet. Auf Grund des hohen Widerstandsmomentes dieser Träger eignen sie sich besonders für das Gestell der Vorrichtung. Auch das seitliche, zum Prüfraum verdeckte Anbringen des Längenmesssystems kann als weiterer Vorteil dieser Bauweise genannt werden. Der Querträger wurde, um die Durchbiegung bei der Beanspruchung zu minimieren, als geschlossenes Breitflanschprofil ausgeführt.

Abbildung 19 zeigt die mittels statischer Analyse in Pro-Engineer® berechnete Endkonstruktion des Rahmens (Skalierungsfaktor der Verformung=150).

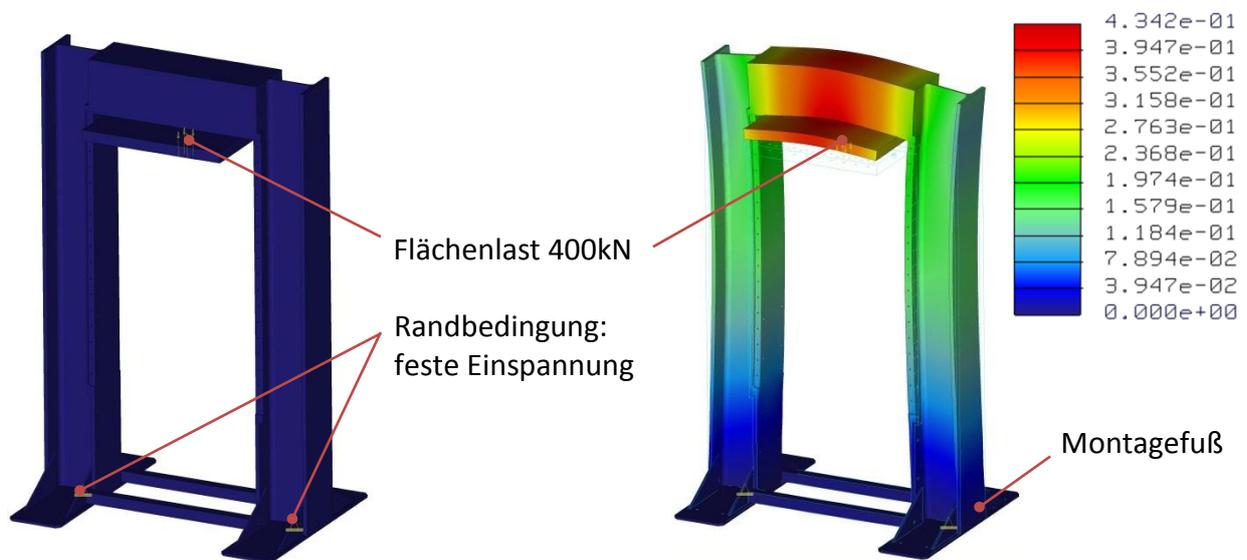


Abbildung 19: Statische FE-Analyse der Rahmenkonstruktion (links: unverformt; rechts: maximalverformt)

Das in Abbildung 19 dargestellte Resultat der Berechnung liefert eine maximale Gesamtverformung von 0,4mm bei einer Belastung von 400kN. Als Querträger kommt ein IPB 200 Breitflanschträger zum Einsatz. Zur Erhöhung der Steifigkeit des Trägers ist dieser geschlossen verschweißt. Die vertikalen Profile sind ebenfalls IPB 200 Breitflanschträger. Diese Maßnahmen ergeben eine Verbesserung der Durchbiegung des Querträgers von rund 50% nach der statischen FE-Analyse im Vergleich zum Rahmenkonzept laut Abbildung 18. Das Gesamtgewicht der Rahmenkonstruktion beträgt in Summe 410kg (inklusive der Aufnahmeplatte).

Die Abmessungen des auskonstruierten Rahmens sind in folgender Abbildung 20 dargestellt.

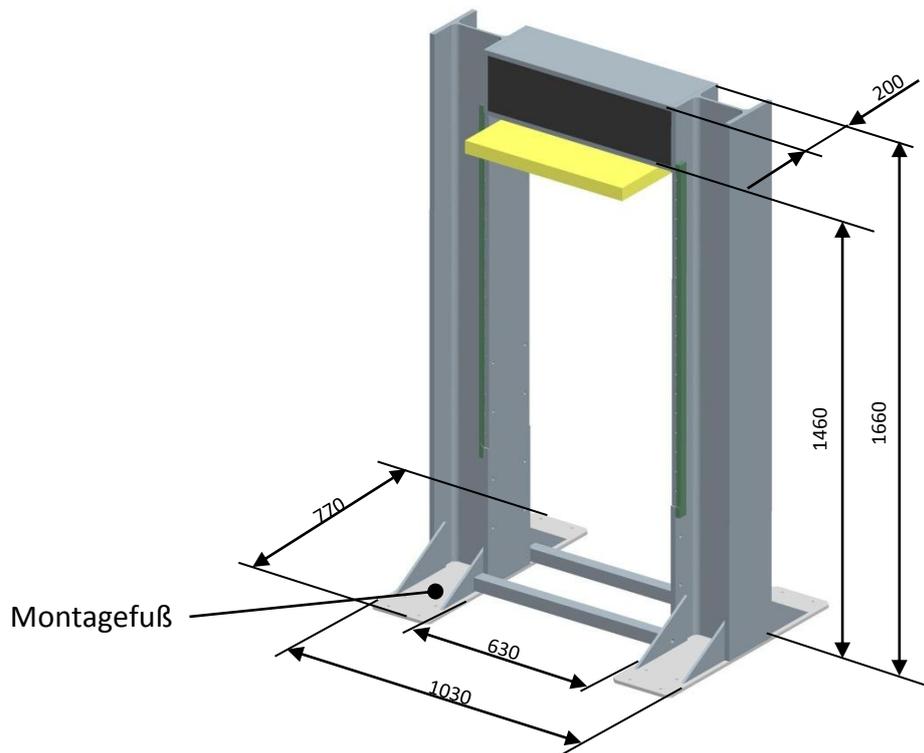


Abbildung 20: Abmessungen der Rahmenkonstruktion

Die Außenmaße nach Abbildung 20 betragen: 1660x200x1030 (LxBxH in mm) ohne Montagefuß bzw. 1670x770x1030 (LxBxH in mm) mit Montagefuß.

Von größerem Interesse sind allerdings die verfügbaren Innenabmessungen, welche den nutzbaren Prüfraum für Versuche ergeben.

Die Innenmaße nach Abbildung 20 betragen: 1460x200x630 (LxBxH in mm)

Eine Breite von 200mm bedeutet hier, dass der Breitflanschträger eine Breite von 200mm hat. Durch das Montieren der Aufnahmeplatte erhöht sich dieser Wert (die verwendete Platte hat eine Breite von 540mm).

4.2.2 Zylinderanbindung:

Nach dem Festlegen des Rahmenaufbaus sowie der Auslegung des Antriebes für die Prüfvorrichtung kann die Anbindung und Integration der Antriebskomponenten (Hydraulikzylinder) an die Rahmenkonstruktion erfolgen. Dazu muss eine Zylinderanbindung ausgelegt und konstruiert werden. Die Aufgabe der Zylinderanbindung ist die Aufnahme und Positionierung des Hydraulikzylinders in der Prüfvorrichtung. Sie besteht im Wesentlichen aus der Aufnahmeplatte, in welcher der Hydraulikzylinder über eine Zentrierbohrung genau

positioniert wird, und zwei Verstrebungen. Die lange Biegelänge der Zylinderaufnahmeplatte (630mm, Innenbreite der Rahmenkonstruktion) erfordert eine geeignete Verstrebung dieser Platte. Die effektivste Art der Verstrebung wäre die Abstützung der Platte senkrecht in Richtung Boden mit einer zusätzlichen Verankerung der Streben am Boden. Durch den maximalen Hub des Hydraulikzylinders von 400mm (siehe Tabelle 12) ist das Anordnen der Zylinderanbindung in zwei Arbeitspositionen (unterschiedliche Arbeitsposition für Einzelzellentests und Batteriemodultests) notwendig. Für die zwei Arbeitspositionen wären jeweils eigene Streben erforderlich. Um dies zu vermeiden, wird die Verstrebung seitlich am Rahmen abgestützt. Dabei wurde auf einen guten Kompromiss zwischen dem Platzbedarf der Verstrebungen und der Verformung der Aufnahmeplatte geachtet. Die obere Arbeitsposition dient primär Versuchen an Einzelzellen bzw. kleineren Bauteilen. Der maximale Arbeitsraum beträgt hier nach dem Einbau der Zylinderanbindung 500mm. In der unteren Position wird der Arbeitsbereich auf 864mm erhöht, wodurch auch Tests an Batteriemodulen möglich sind. Folgende Abbildung 21 veranschaulicht die beiden Arbeitspositionen:

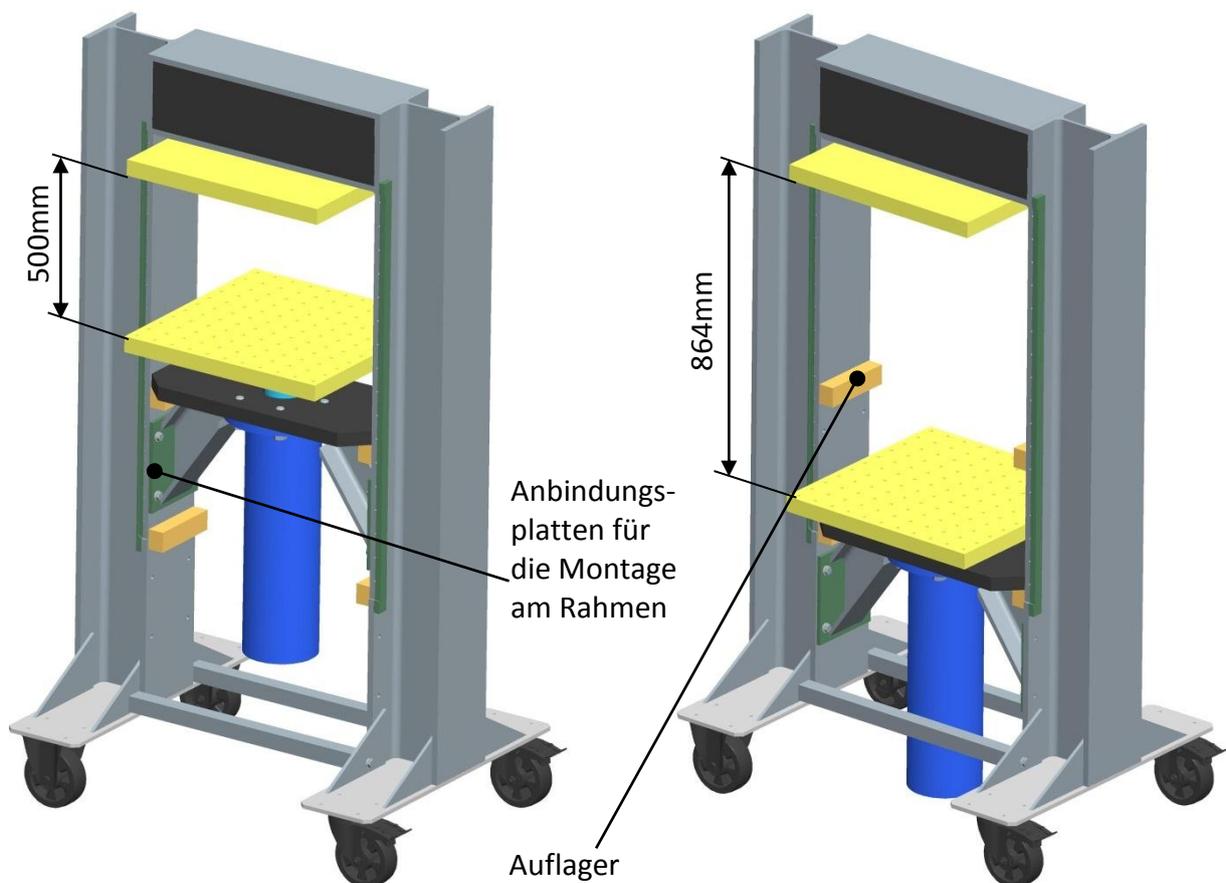


Abbildung 21: Die Arbeitspositionen der Prüfvorrichtung (links: verfügbare Arbeitshöhe=500mm; rechts: vergrößerter Arbeitsbereich=864mm)

An den Außenseiten der Verstrebungen sind Anbindungsplatten zur Verbindung der Verstrebung mit dem Rahmen angebracht. Diese Verbindung erfolgt mittels Verschraubung. Um eine Scherbelastung der Schrauben zu verhindern, wird die Aufnahmeplatte auf Auflager gesetzt. Die Auflager sind fest mit dem Rahmen verschweißt.

Wie bei der Rahmenkonstruktion erfolgte auch bei der Auslegung der Zylinderanbindung zunächst die iterative Validierung anhand statischer FE-Rechnungen in Pro Engineer®. In Abbildung 22 wird die statische FE-Analyse der Durchbiegung der optimierten Zylinderanbindung gezeigt. Auch der Kraftangriff, welcher am Anschlussflansch des Hydraulikzylinders erfolgt, die Einspannstellen sowie die festgelegte Belastung (siehe Kapitel 3.4.1) sind in der Abbildung ersichtlich. Der Skalierungsfaktor der Deformationen beträgt 150.

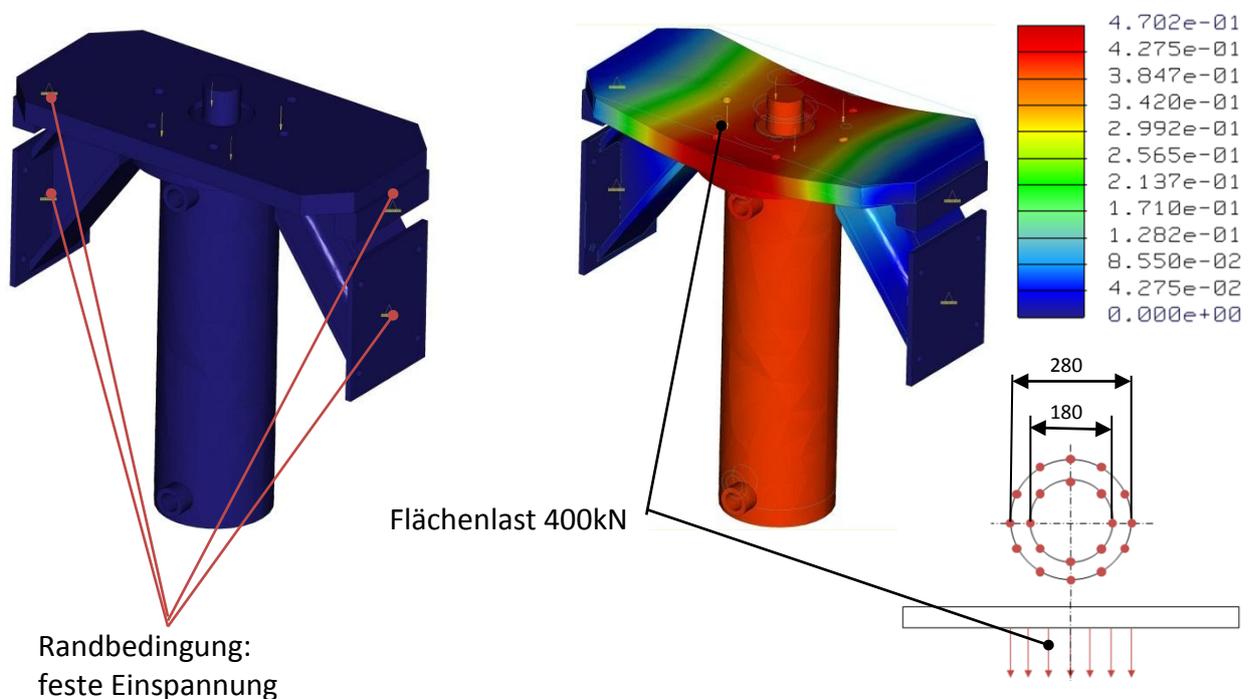


Abbildung 22: Statische FE-Simulation der Zylinderanbindung: Darstellung unverformt (links), maximalverformt (rechts) und Lastannahmen

Das Ergebnis der maximalen Durchbiegung der in Abbildung 22 dargestellten Berechnung bei maximaler Belastungskraft liegt bei 0.5mm. Nachfolgende Abbildung 23 zeigt die Zylinderanbindung und die Verstrebungen zur Minimierung der Durchbiegung der Aufnahmeplatte.

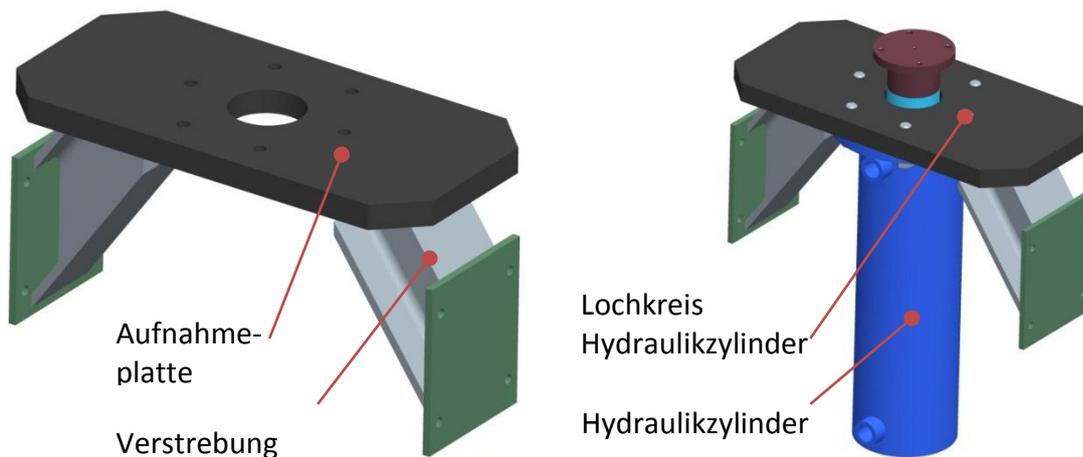


Abbildung 23: Zylinderanbindung ohne (links) und mit Hydraulikzylinder (rechts)

Die Verstrebungen sind mit der Aufnahmeplatte verschweißt. Abbildung 24 zeigt die Unterseite der Anbindung mit den Schweißstellen sowie dem Zentrieransatz für den Hydraulikzylinder.

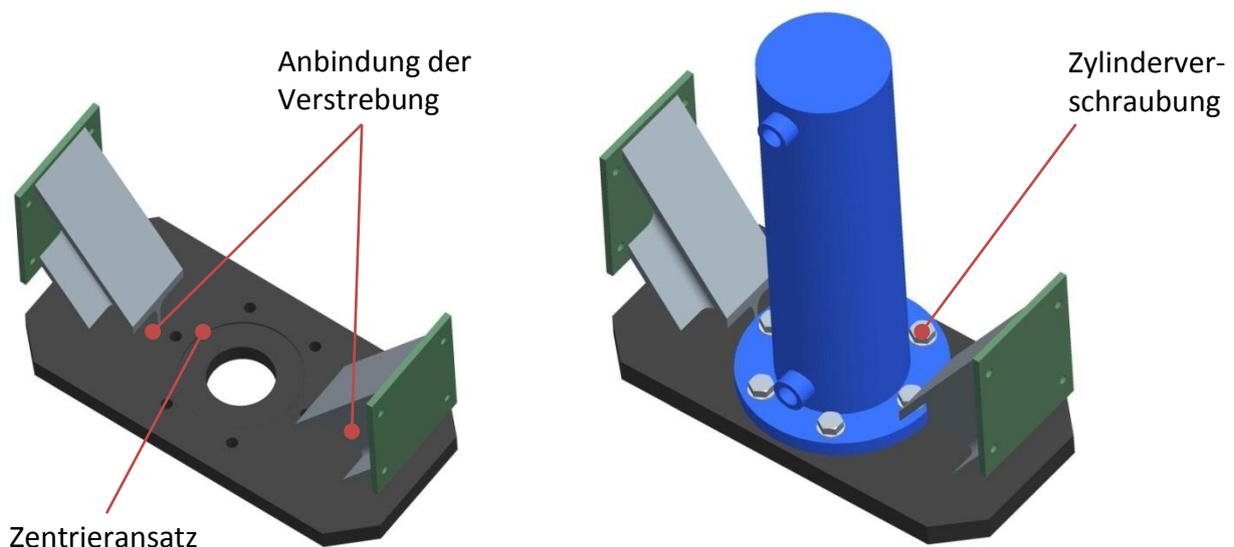


Abbildung 24: Unterseite der Zylinderanbindung ohne (links) und mit (rechts) Hydraulikzylinder

Der Abstand zwischen dem Hydraulikzylinder und den Verstrebungen wurde möglichst klein ausgeführt, um die freie Biegelänge der Aufnahmeplatte möglichst gering zu halten und so die Effektivität der Abstrebung zu maximieren. Um eine höchstmögliche Flexibilität beim Wechsel der Arbeitspositionen zu gewährleisten, wurde die Anbindung so ausgelegt, dass sie einfach versetzt werden kann. Beim Versetzen soll auch keine Demontage des Hydraulikzylinders notwendig sein. Wie bei der Rahmenkonstruktion erfolgte auch bei der Auslegung der Zylinderanbindung eine Limitierung des zulässigen Gewichts auf maximal 200kg inklusive dem Hydraulikzylinder. Die auskonstruierte Zylinderanbindung erfüllt dieses Kriterium mit einem Gewicht von 165kg.

4.2.3 Untersuchung des Gesamtdeformationsverhaltens der Prüfvorrichtung

Zur Überprüfung des resultierenden Deformationsverhaltens der entwickelten Rahmenkonstruktion und der Zylinderanbindung wurde eine weitere statische FE-Analyse in Pro Engineer® durchgeführt. Die beiden Lastannahmen aus den Kapiteln 4.2.1 und 4.2.2 wurden für diese Berechnungen angewendet. Die FE-Analyse wird für die obere und untere Arbeitsposition durchgeführt. Abbildung 25 zeigt das Ergebnis der FE-Berechnung für die obere Arbeitsposition.

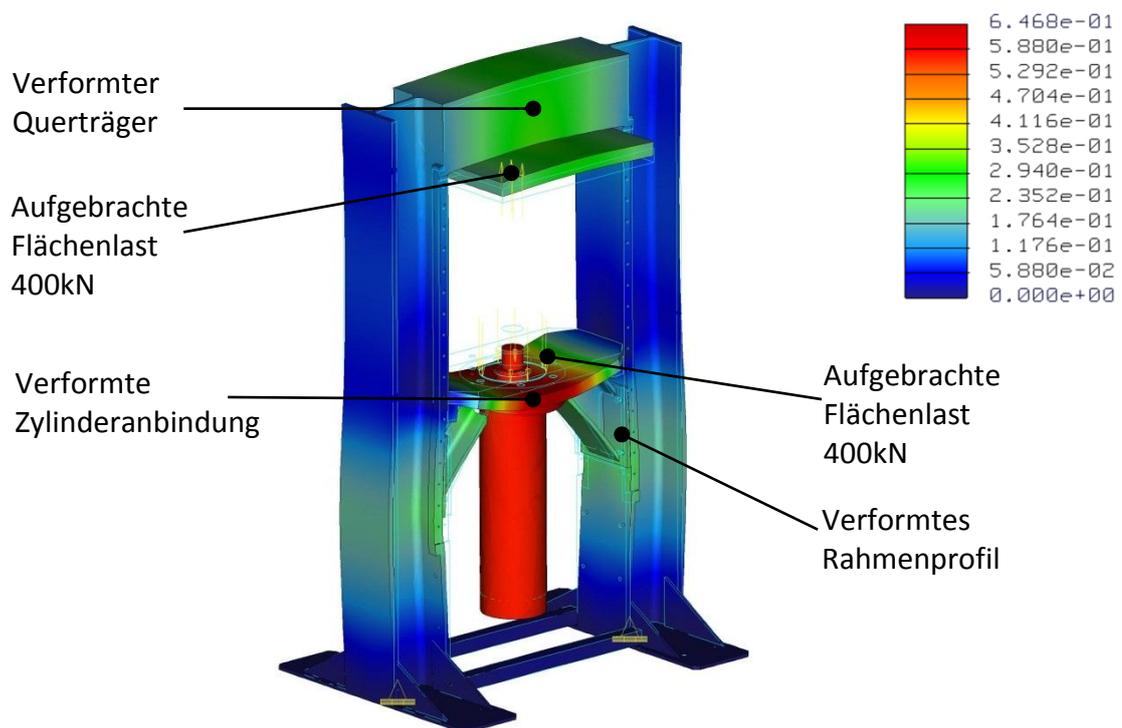


Abbildung 25: Berechnete Deformation der entwickelten Prüfvorrichtung in der oberen Arbeitsposition

Das Ergebnis der in Abbildung 25 abgebildeten FE-Simulation ergibt eine Gesamtdeformation der Prüfvorrichtung in der oberen Arbeitsposition von unter 2mm. In der unteren Arbeitsposition wurde ebenfalls ein Ergebnis der Gesamtdeformation von unter 2mm erreicht. Die Analyse der unteren Arbeitsposition ist in folgender Abbildung 26 dargestellt:

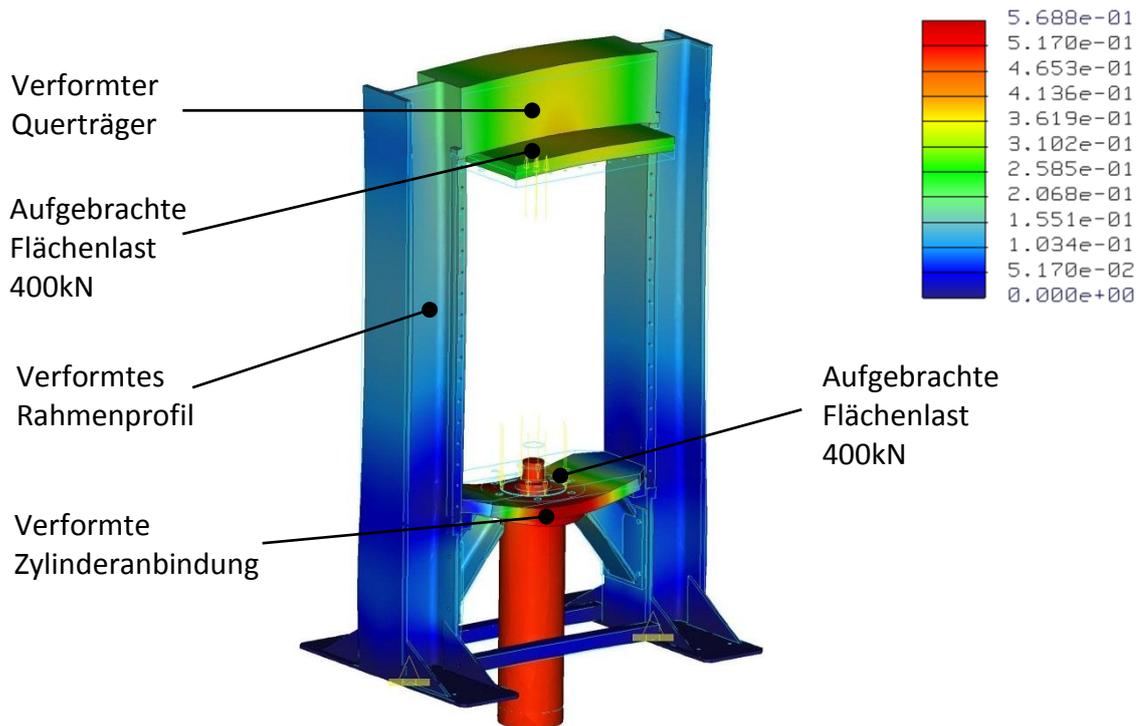


Abbildung 26: Berechnete Deformation der entwickelten Prüfvorrichtung in der unteren Arbeitsposition

Im Kapitel 4.2 wurde die konstruktive Auslegung der mechanischen Komponenten des Prüfstandes beschrieben. Dabei wurde mit Hilfe von statischen FE-Analysen in Pro Engineer®, die optimale Gestaltung der Bauteile vorgenommen. In Kapitel 4.3 wird die Gesamtkonstruktion sowie der fertiggestellte Prüfstand vorgestellt. Dabei wird speziell auf die mechanischen sowie mess- und steuerungstechnischen Komponenten eingegangen.

4.3 Komponenten der Prüfvorrichtung

Nach der Auslegung des Rahmens und der Zylinderanbindung wurde die Gesamtkonstruktion mit allen mechanischen Bauteilen fertiggestellt. Das Equipment für die Mess- und Steuerungstechnik wurde parallel angeschafft und nach der Fertigstellung des Prüfstandes mit den Systemkomponenten der Prüfvorrichtung (hydraulische Wegeventile, proportional Druckregelventil, proportional Stromregelventil, E-Motor des Hydraulikaggregats) verbunden. Folgende Unterkapitel beschreiben die mechanischen Komponenten des Prüfstandes sowie die mess- und steuerungstechnische Hardware.

4.3.1 Die mechanischen Komponenten der Prüfvorrichtung:

Der gesamte mechanische Aufbau der Prüfvorrichtung gliedert sich in folgende Komponenten:

- Rahmen mit oberer Aufspannplatte
- Zylinderaufnahme mit unterer Aufspannplatte
- Aufbau Kraftmessung
- Hydraulikeinheit
- Führungssystem mit Längenmessung
- Batterieprüfequipment

Abbildung 27 zeigt eine Gegenüberstellung der Gesamtkonstruktion und die fertiggestellte Prüfvorrichtung.

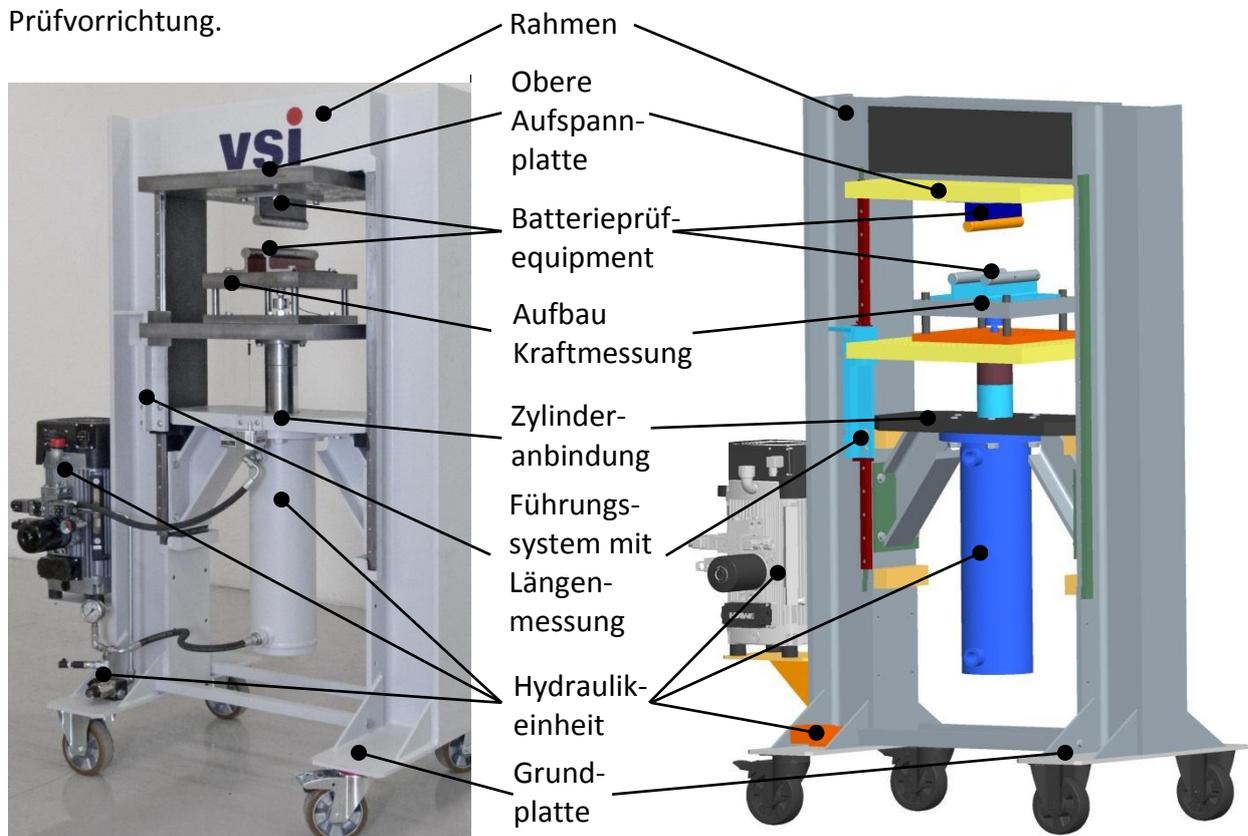


Abbildung 27: Komponenten der Prüfvorrichtung

Auf den folgenden Seiten wird auf die einzelnen, der in Abbildung 27 dargestellten Komponenten eingegangen.

Rahmen mit oberer Aufspannplatte

Der grundsätzliche Aufbau des Rahmens wurde bereits in Kapitel 4.2.1 beschrieben. In Abbildung 27 sind noch die beiden Grundplatten an den horizontalen Stahlprofilen zur

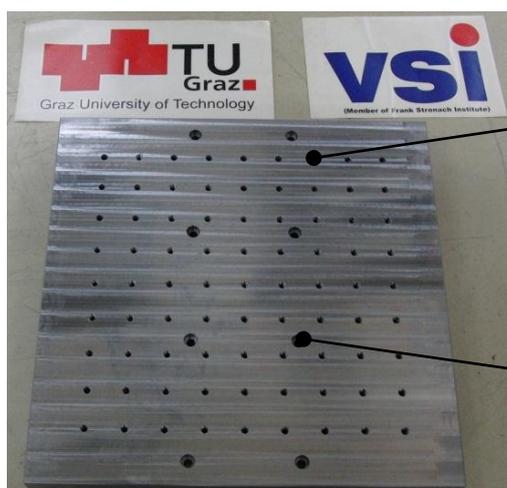
Montage von Schwerlastrollen zu erkennen. Mit diesen Schwerlastrollen kann die Prüfvorrichtung sehr flexibel bewegt werden. Abbildung 28 zeigt den Rahmenaufbau bei der CNC-Fräsbearbeitung. Im Zuge dieser Bearbeitung wurden Passungsflächen für das Linearführungssystem und für das Längenmesssystem gefräst.



Bearbeitete Fläche zur Montage der Führungsschiene des Linearführungssystems

Abbildung 28: CNC-Bearbeitung des Rahmens

Die obere Aufspannplatte ist fest mit dem Querträger des Rahmens verschraubt und dient der Aufnahme des Batterieprüfequipments, wie beispielsweise Impaktoren. Sie ist mit einem M10-Gewindelochraster (50x50mm) ausgeführt, um eine flexible Anordnung der zu montierenden Bauteile zu ermöglichen. Folgende Abbildung 29 zeigt die obere Aufspannplatte nach der Fräsbearbeitung:



Obere Aufspannplatte mit M10-Gewindelochraster (50x50mm)

Senkbohrungen zur Montage am Querträger

Abbildung 29: Obere Aufspannplatte

Die Grundmaße der in Abbildung 29 dargestellten Platte betragen 540x540x40 (LxBxH in mm).

Zylinderaufnahme mit unterer Aufspannplatte:

Die Konstruktion und der Aufbau der Zylinderaufnahme ist in Kapitel 4.2.2 dargestellt worden. Die untere Aufspannplatte, welche in Abbildung 30 dargestellt ist, hat dieselben Abmessungen wie die vorhin beschriebene obere Aufspannplatte. Auch der Lochraster ist ident ausgeführt.



Abbildung 30: Zylinderanbindung mit unterer Aufspannplatte und Führungswinkeln

Die Anbindung an die Hydraulikkolbenstange erfolgt über einen Verbindungsflansch. Dieser Verbindungsflansch ist einerseits mit der Kolbenstange über ein Anschlussgewinde (M58x1.5) verschraubt und kann andererseits mit der Aufnahmeplatte (4xM10) verschraubt werden. Auch aus Sicht der möglichst geschützten Anordnung der Messtechnik hat diese Gestaltung der Anbindung der Aufnahmeplatte einen enormen Vorteil. Es kann die Positionierung eines Kraftaufnehmers zwischen dem Verbindungsflansch und der Aufspannplatte erfolgen. In der Abbildung 31 ist diese Anordnung dargestellt.

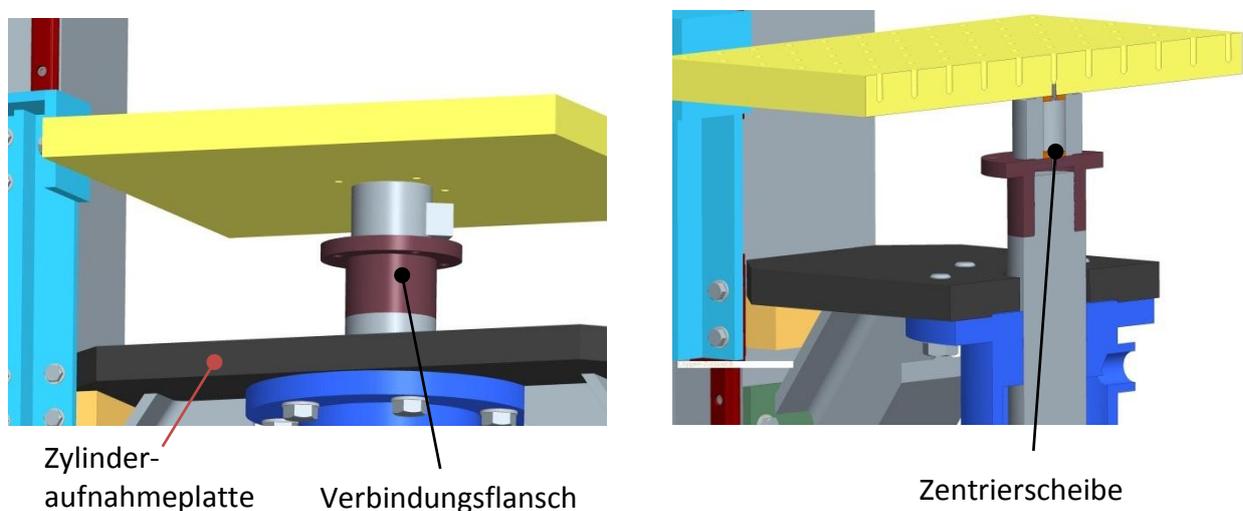


Abbildung 31: Geschützte Anordnung eines Kraftsensors (rechts: Schnittdarstellung)

Durch diese Anordnung ist der Sensor optimal vor Verschmutzung und Feuer geschützt. Die exakte Positionierung des Kraftsensors ist durch Zentrierscheiben (siehe Abbildung 31 rechts) möglich.

Aufbau Kraftmessung

Um bei der Verwendung von Einachs-Kraftaufnehmern die Krafteinleitung in den Sensor optimal zu gestalten, wurde der folgende Aufbau konstruiert. Durch den Aufbau wird der Eintrag von Querkräften auf die Messaufnehmer vermieden, welcher, abhängig von den verwendeten Kraftsensoren (Querkraftkompensation), zur Beschädigung der Aufnehmer führen kann. Der Aufbau wurde mittels zwei Platten mit M10-Lochraster (50x50mm) und vier linear Kugellagereinheiten realisiert. Die obere Lochplatte, welche in Abbildung 32 gezeigt wird, dient einerseits zur flexiblen Montage von Batterietestequipment. Andererseits wird, wie bei der Anordnung von Kraftsensoren unterhalb der unteren Aufnahmeplatte (siehe Abbildung 31), der Schutz von Kraftaufnehmern vor direktem Kontakt mit Flammen und austretenden Bestandteilen gewährleistet.

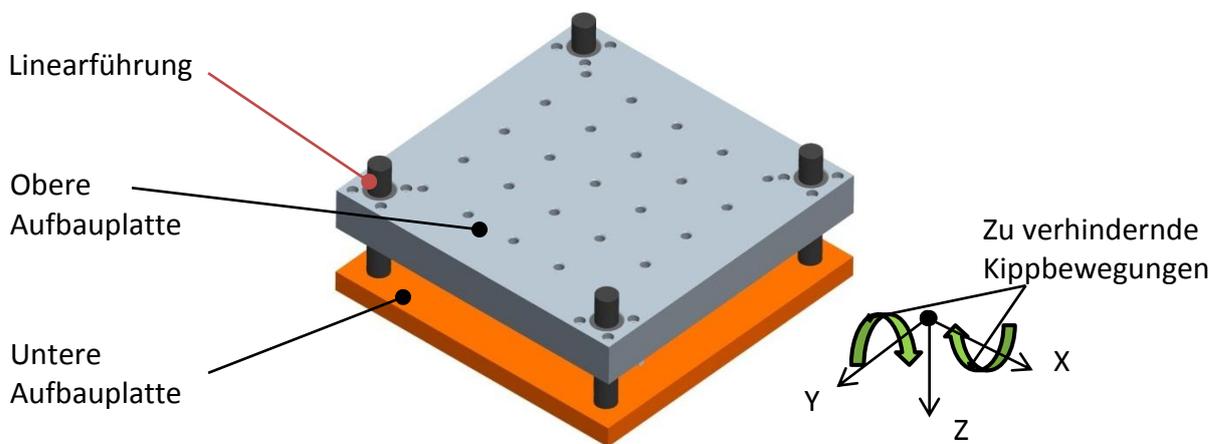


Abbildung 32: Fertiggestellte Konstruktion der Aufbau-Kraftmessung in Pro-Engineer®

Die untere Aufbauplatte dient zur Befestigung des gesamten Aufbaus der Kraftmessung, auf der unteren Aufspannplatte (siehe Abbildung 30) sowie der Platzierung der Kraftaufnehmer. Der in Abbildung 32 dargestellte Aufbau für die Kraftmessung wurde bereits bei den Prinzipversuchen verwendet (siehe Abbildung 15). Dabei wurde festgestellt, dass Rotationen der oberen Aufnahmeplatte um die X- bzw. Y-Achse des Aufbaus (siehe Abbildung 32) trotz der verwendeten Kugellagereinheiten möglich sind. Dies ist auf das vorhandene Spiel in den Linearführungen zurückzuführen. Diese sind zu vermeiden, um den Krafteintrag auf die

Kraftmessdosen möglichst in Normalrichtung auf die Kraftmessdosenauflagefläche (Z-Achse in Abbildung 32) zu ermöglichen. Das kann, wie in Abbildung 33 zu sehen, durch die parallele Verwendung von drei Kraftmessaufnehmern erfolgen. Im Optimalfall sind die Sensoren so angeordnet, dass der Schwerpunkt des gebildeten Dreiecks genau im Punkt des Kraftangriffs liegt.

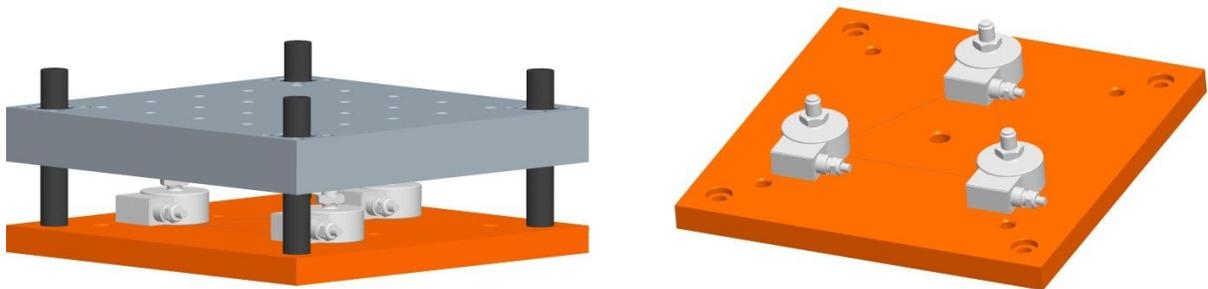


Abbildung 33: Dreieckanordnung der Kraftmessung (links Gesamtaufbau, rechts ohne obere Aufbauplatte)

Werden Sensoren zur dreidimensionalen Krafterfassung (Dreikomponenten-Kraftsensoren) verwendet, kann der Aufbau der Kraftmessung vereinfacht werden. Es sind dann keine Elemente zur Vermeidung von Querbelastungen der Kraftmessung notwendig. Trotzdem ist der Aufbau für die Kraftmessung auch bei der Verwendung von Mehrkomponenten-Kraftaufnehmern zum Schutz vor Flammen und Verschmutzung zu empfehlen.

Der Aufbau wird je nach Versuchskonfiguration einfach mit der unteren Aufnahmeplatte verschraubt. Abbildung 34 zeigt den fertigen Aufbau in der Versuchskonfiguration „Dreipunktbiegung“.

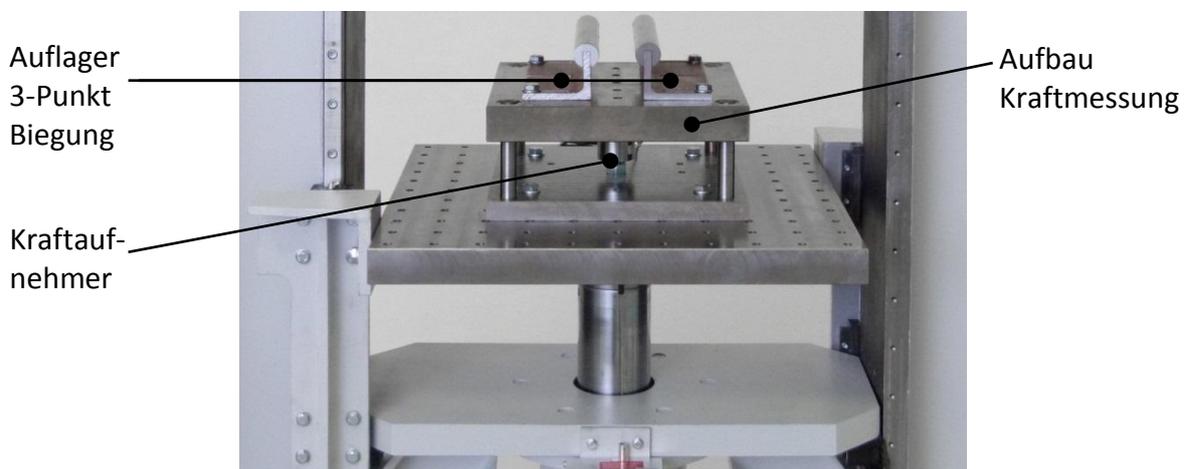


Abbildung 34: Am Prüfstand montierter Kraftmessaufbau

Abbildung 34 zeigt den montierten Aufbau für die Kraftmessung mit einer zentral angeordneten Kraftmessdose, welche einen Nennmessbereich von 50kN hat. Es können beliebige Ausführungen von Kraftmessaufnehmern (Einachs- oder Mehrkomponenten-Aufnehmer, unterschiedlicher Nennmessbereich und Baugröße) bis zu einer Höhe des Sensors von 60mm verwendet werden.

Führungssystem:

Bei der Durchführung der Prinzipversuche (siehe Kapitel 3.3) zeigte sich, dass die Führungsqualität des Hydraulikzylinders wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse der Versuche hat. Um eine möglichst gleichmäßige lineare Bewegung des Prüfaufbaus zu ermöglichen, wurde deshalb eine seitliche Führung der unteren Aufspannplatte vorgesehen. Zur Maximierung der mechanischen Steifigkeit des Führungssystems wurden auf beiden Lagerseiten jeweils zwei Führungswägen angeordnet und mittels einem versteiften Führungswinkel verbunden. Des Weiteren können zwei zusätzliche Führungsschienen auf den beiden gegenüberliegenden Seiten der befestigten Führungsschienen angeordnet werden. Abbildung 35 zeigt das Führungssystem am fertigen Aufbau.

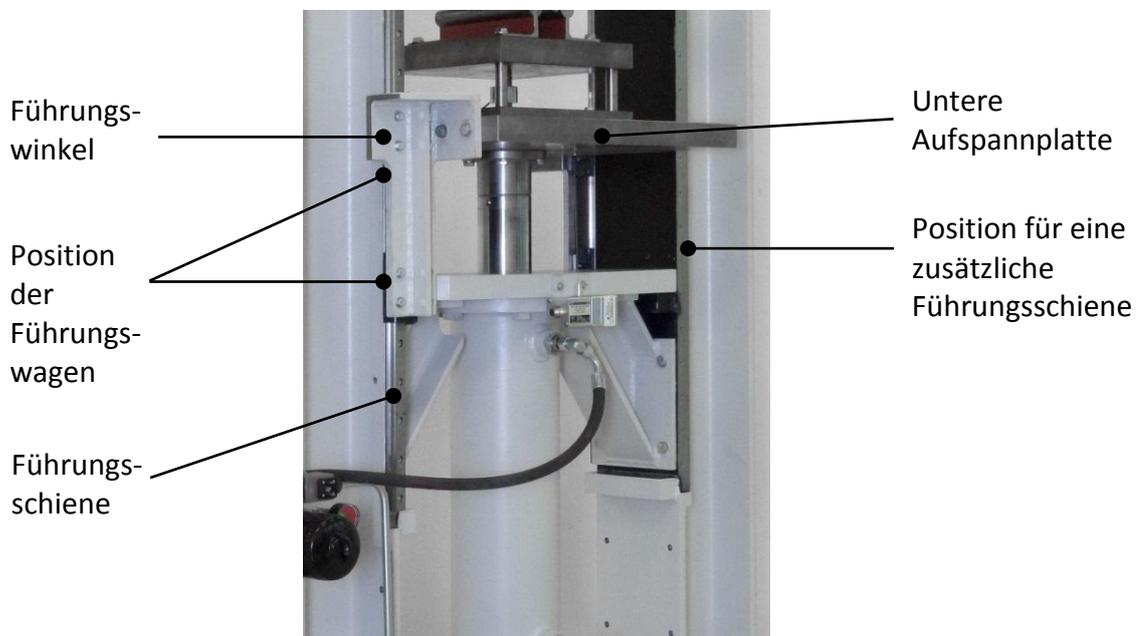


Abbildung 35: Komponenten des Führungssystems

Der in Abbildung 35 dargestellte Führungswinkel verbindet die untere Aufspannplatte mit den beiden Führungswägen der Linearführungseinheit. Neben der genauen Führung der Bewegung

des Hydraulikkolbens ist die Linearführungseinheit auch die optimale Position für die Integration des Längenmesssystems. Dies wird noch in Kapitel 4.3.2 verdeutlicht.

Hydraulikeinheit:

Die Auslegung der Hydraulikeinheit wurde im Kapitel 3.4.1 bereits behandelt. Auch die Anbindung des Hydraulikzylinders an die Zylinderaufnahme wurde in Kapitel 4.2.2 beschrieben. Es soll an dieser Stelle jedoch noch gezeigt werden, wie diese Komponenten am Prüfstand angeordnet sind und die Verbindung von Aggregat und Hydraulikzylinder ausgeführt ist.

Das Aggregat wurde aus brandschutztechnischen Gründen seitlich am Rahmen montiert. Durch den Breitflanschträger und die tiefe Anbringung am Rahmen ist auszuschließen, dass Flammen einfach auf das Aggregat übergreifen können. Zur Erweiterung des Schutzes kann das Aggregat beispielsweise durch einen zusätzlichen Blechkasten geschützt werden. Sollten jedoch bei zukünftigen Versuchen Bedenken hinsichtlich der Brandgefährdung des Hydrauliksystems auftreten, kann das Aggregat einfach vom Rahmen demontiert und mit einem entsprechenden Abstand zur Prüfvorrichtung positioniert werden. Auch das Stromregelventil ist am Fuß der Prüfvorrichtung montiert, um eine möglichst große Distanz zu den Prüfkörpern und eventuellen Brandquellen zu erreichen. Die Verbindung des Hydraulikaggregats mit dem Hydraulikzylinder erfolgt mittels einer Rohrleitung zum Stromregelventil und von dort mittels eines Hydraulikschlauchs zum Zulauf des Hydraulikzylinders. Der Rücklaufhydraulikschlauch ist direkt mit dem Aggregat verbunden. Durch die Verwendung der Hydraulikschläuche ist der Wechsel der Arbeitspositionen ohne Neuverrohrung der Hydraulik möglich.

Abbildung 36 zeigt die verwendeten Komponenten der Hydraulikeinheit.

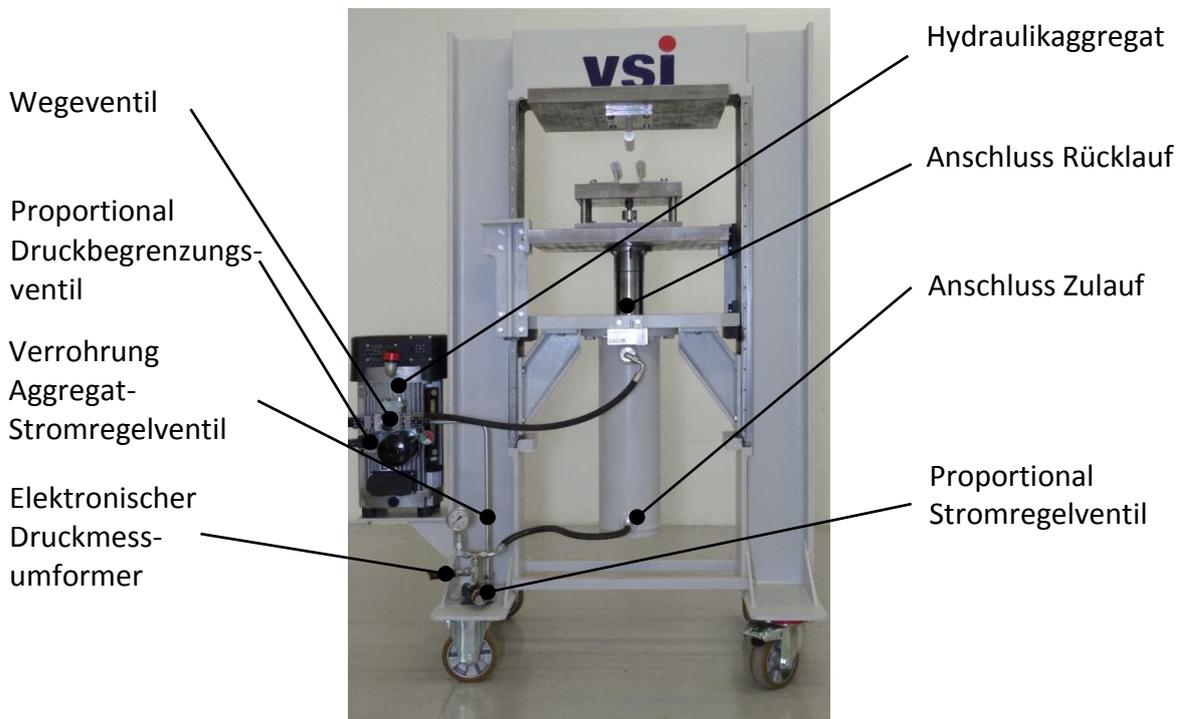


Abbildung 36: Die Hydraulikkomponenten des Prüfstandes

Über die Proportionalventile ist die Einstellung der Druckkraft und Vorschubgeschwindigkeit des Hydraulikkolbens beim Ausfahren möglich. Zur genauen Steuerung der Rückhubgeschwindigkeit der Kolbenstange müsste ein eigenes Stromregelventil für den Rücklauf eingebaut werden, was im Zuge der Bearbeitung der Diplomarbeit jedoch nicht erfolgte. Für die Steuerung des Prüfaufbaus sind diese Komponenten neben dem Längenmesssystem und der Kraftmessung die essentiellen Bauteile, was in Kapitel 5 und 6 näher beschrieben wird. Mit ihnen können genaue und automatisierte Bewegungsabläufe der Anlage realisiert werden.

Batterieprüfequipment:

Für die Durchführung von Versuchen an EES wurden entsprechende Aufnahmen für die Fixierung der Testbatterien und Impaktoren angefertigt. Abbildung 37 zeigt Spannelemente, welche das seitliche Fixieren der Batterien für die Versuchskonfigurationen Knickung, Eindrückung und Penetration bewerkstelligen können.

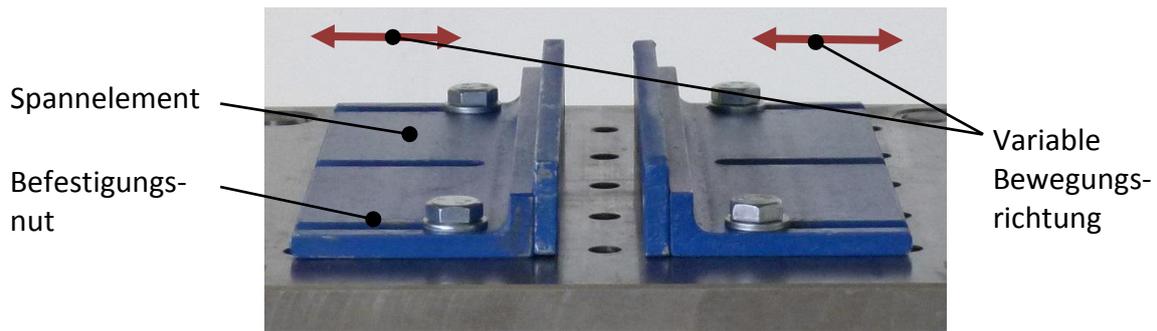


Abbildung 37: Spannelemente für Knick-, Eindrück- und Impaktorversuche

Durch die geschlitzte Ausführung der Befestigungsstellen ist ein flexibles positionieren der Prüfzellen möglich.

Für Dreipunktbiegeversuche wurden zylindrische Auflager ($\varnothing 30\text{mm}$), die ebenfalls gefräste Befestigungsstellen zur variablen Montage besitzen, gefertigt. Diese sind in Abbildung 38 dargestellt.

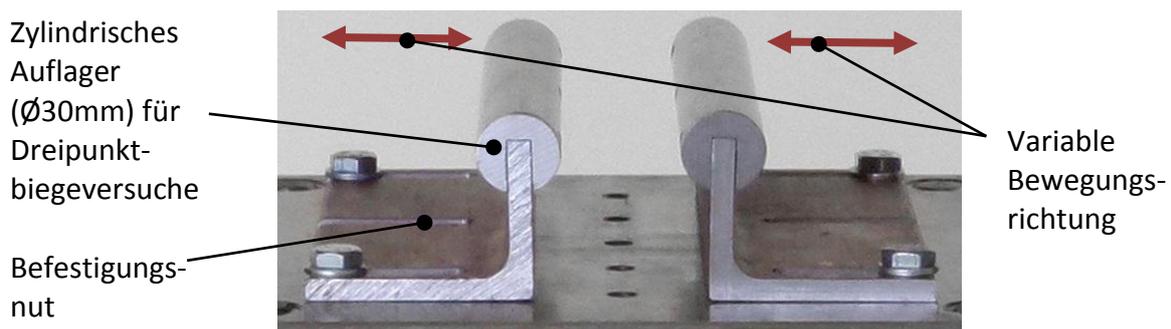


Abbildung 38: Zylindrische Auflager ($\varnothing 30\text{mm}$) für die Dreipunktbiegeversuche

Der in Abbildung 39 abgebildete zylindrische Impaktor ($\varnothing 30\text{mm}$) kann mittels einer Montageplatte auf den Aufspannplatten fixiert werden. Dieser wird sowohl für Eindrückversuche als auch für Dreipunktbiegeversuche verwendet.

Abbildung 39 zeigt den zylindrischen Impaktor im montierten Zustand auf der oberen Aufspannplatte.

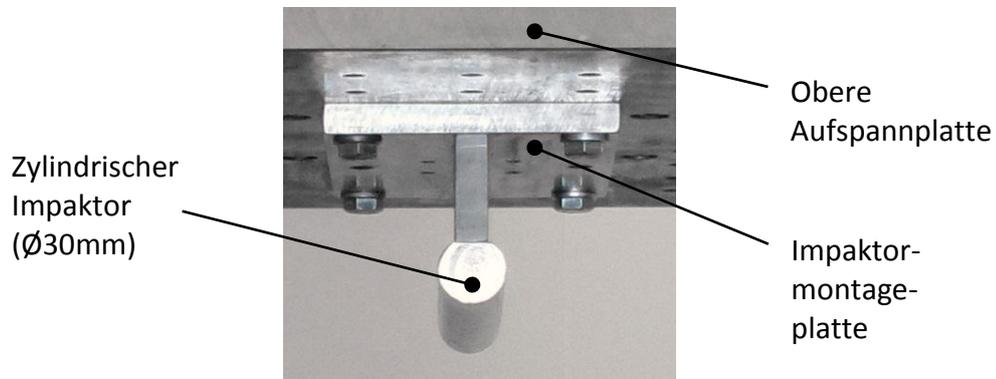


Abbildung 39: Montierter zylindrischer Impaktor für Eindrück- und Dreipunktbiegeversuche

Zusätzlich wird für Eindrückversuche, welche erzwungene Kurzschlüsse der Batterien auslösen sollen, ein Impaktor mit hemisphärischer Form (Ø30mm) verwendet. Der in Abbildung 40 dargestellte Impaktor kann ebenfalls mittels der Impaktormontageplatte (siehe Abbildung 39) auf den Aufspannplatten befestigt und positioniert werden.

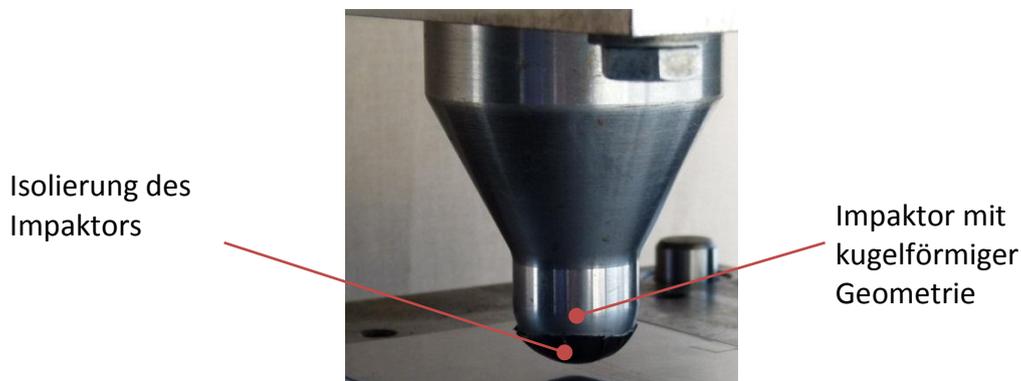


Abbildung 40: Impaktor mit hemisphärischer Form (Ø30mm) für Eindrückversuche

Abbildung 40 zeigt die Isolierung des hemisphärischen Impaktors. Diese wird dazu verwendet, mechanisch erzwungene, interne Kurzschlüsse der Batteriezellen auszulösen. Wird die Isolierschicht entfernt, können Kurzschlüsse durch Intrusion eines metallischen Fremdkörpers ausgelöst werden.

4.3.2 Die mess- und steuerungstechnischen Komponenten der Prüfvorrichtung:

Neben den mechanischen Bauteilen sind auch die mess- und steuerungstechnischen Komponenten der Prüfvorrichtung für das Funktionieren der Maschine notwendig. Diese Komponenten sind:

- Messsystemkomponenten
 - Kraftmessaufnehmer
 - Längenmesssystem
 - Spannungsmessung
- Datenerfassungs- und Steuerungssystem
- Aus- und Eingangsmodulare

Im Folgenden wird das Messequipment, welches zur Durchführung von mechanischen Untersuchungen an lithiumbasierenden Batterien verwendet wird, beschrieben.

Messsystemkomponenten:

Für die gewünschte Ermittlung von genauen Kraft-Weg Kurven sowie der weg- und belastungsabhängigen Erfassung der elektrischen Spannung der Batteriezellen oder –module, (Erkennung von Kurzschlüssen) ist ein Messsystem notwendig.

Kraftmessung:

Die Messung der Kraft erfolgt durch Einachs-Kraftaufnehmer mit unterschiedlichem Nennmessbereich und Typ. Abbildung 41 zeigt einen montierten Einachs-Kraftaufnehmer mit einem Nennmessbereich von 50kN.

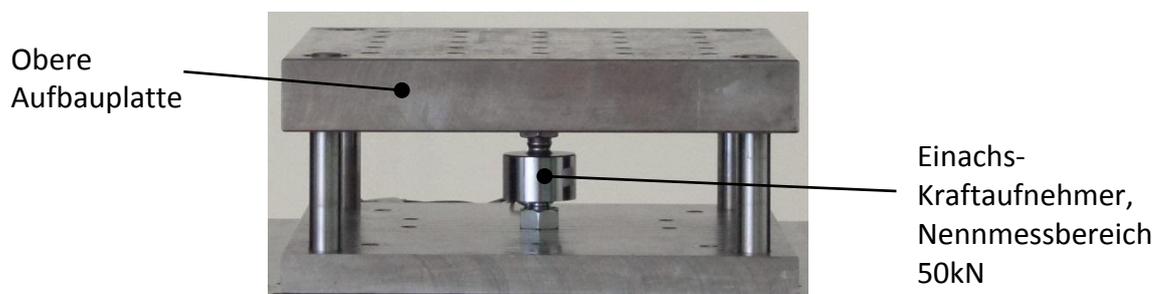


Abbildung 41: Aufbau-Kraftmessung mit montiertem Kraftaufnehmer

Die Nenndaten der verwendeten Kraftaufnehmer sind in folgender Tabelle zusammengefasst:

HBM-Kraftaufnehmer	Daten:	Einheit:
Versorgungsspannung:	5	V
Typ U2B:		-
Nennmessbereich	5	kN
Nennmessbereich:	50	kN
Typ C6A:		-
Nennmessbereich:	500	kN

Tabelle 14: Auflistung der am Institut verfügbaren Kraftaufnehmer

Das Verwenden der in Tabelle 14 aufgelisteten HBM-Kraftaufnehmer ist nicht unbedingt notwendig. Es können sämtliche Sensoren, die auf dem Dehnungsmessstreifenprinzip (DMS-Prinzip) beruhen, verwendet werden.

Alle am Institut verfügbaren Kraftsensoren funktionieren nach dem DMS-Prinzip. Dabei bewirkt die aufgebrachte Kraft eine sehr kleine Längenänderung, was zu einer Widerstandsänderung der verbauten Dehnungsmessstreifen (DMS) führt. Die Beziehung zwischen Längen- und Widerstandsänderung wird durch die Formel (5) beschrieben:

$$\frac{\Delta R}{R} = k \times \frac{\Delta l}{l} = k \times \varepsilon \quad (5)$$

Die Widerstandsänderung ist laut Formel (5) gleich dem k-Faktor multipliziert mit der Längendehnung (ε). Der k-Faktor beschreibt den Zusammenhang zwischen dem spezifischen Widerstand (ρ) des DMS, der Längendehnung (ε) und der Querkontraktionszahl (μ). Die Gleichung (6) zeigt diesen Zusammenhang:

$$k = \frac{\Delta \rho}{\rho \times \varepsilon} + 1 + 2\mu \quad (6)$$

Das Ausgangssignal der Kraftmessaufnehmer ist eine Spannung im Millivoltbereich, welche proportional der gemessenen Kraft ist. Diese Spannung wird von der Messtechnik erfasst, verstärkt und verarbeitet.

Längenmessung:

Die Daten des verwendeten Digitalmaßstabes sind in folgender Tabelle angeführt:

Merkmals:	Daten:	Einheit:
Hersteller:	SINO L. DIGITAL LTD.	-
Abmaße (LxBxH):	682x18x43	mm
Effektive Messlänge:	570	mm
Auflösung:	1	μm
Maximale Geschwindigkeit:	60	m/min
Arbeitsspannung:	5 ($\pm 5\%$)	V
Ausgangssignal:	TTL	

Tabelle 15: Technische Daten des verwendeten Längenmesssystems

Um die Längenmessung möglichst direkt am Prüfobjekt bei gleichzeitig brandgeschützter Position durchzuführen zu können, wird das Längenmesssystem seitlich am Rahmen positioniert und mit dem Führungswinkel verbunden. Dadurch wird das Mitmessen der Verformung der Zylinderaufnahmeplatte unterbunden. Abbildung 42 zeigt eine CAD-Ansicht des montierten Längenmesssystems mit der Anbindung an den Führungswinkel und an den Rahmen.

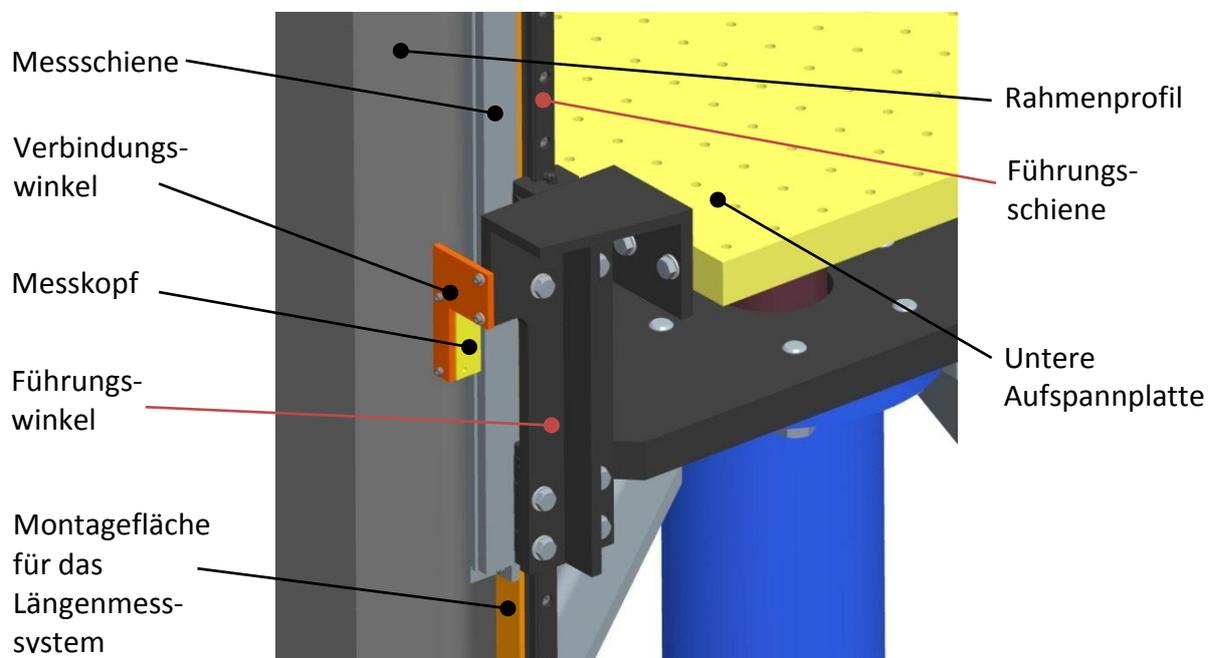


Abbildung 42: Digitales Längenmesssystem

Das in Abbildung 42 dargestellte Längenmesssystem ist über einen Verbindungswinkel mit dem Führungswinkel verbunden. Die Montage der Messschiene des Digitalmaßstabes erfolgt auf der

dafür vorgesehenen, gefrästen Montagefläche durch zweifache Verschraubung (M6 Zylinderschrauben).

Spannungsmessung:

Zur Erfassung der Spannung der EES wird kein eigener Sensor benötigt. Die Einzelzellen können direkt mit dem Messsystem (Messmodul NI 9206) verbunden werden. Das Messmodul ist in Tabelle 16 aufgelistet.

Hardware des Mess- und Steuerungssystems:

Um das Auftreten von Kurzschlüssen bei mechanischer Belastung von EES möglichst genau zu erfassen, ist ein System notwendig, das die Anforderungen einer schnellen sowie gleichzeitigen Datenerfassung und Zuordnung ermöglicht und alle geforderten Punkte des Lastenheftes (siehe Tabelle 7) erfüllt. Als Hardware für die Realisierung der Prüfstandsteuerung und Messdatenerfassung kommt ein echtzeitfähiges CompactRIO²³-System von National Instruments zum Einsatz. Folgende Tabelle 16 listet die verwendeten Komponenten des Mess- und Steuerungssystems auf:

Komponenten:	Bezeichnung, Information:	Daten:	Einheit:
Echtzeit-Controller:	NI 9014		
	Taktfrequenz:	400	MHz
	Arbeitsspeicher:	128	MB-DRAM
	Nichtflüchtiger Speicher:	2	GB
Chassis:	NI 9114		
	Steckplätze:	8	
FPGA:	Xilinx Virtex-5 LX50		
Eingangsmodule:			
Digitalmodul:	NI 9401	TTL-fähig (5V/TTL)	
	Anzahl der Kanäle:	8	
	Taktfrequenz:	100	ns
Kraftmessmodul	NI 9237	Brückenmodul	
	Anzahl der Kanäle:	4	
	Auflösung:	24 bit	
	Abtastrate	50	kS/s
Analog Eingangsmodul	NI 9206	Spannungseingang	
	Anzahl der Kanäle:	16	
	Auflösung:	16 bit	

²³ CompactRIO: Compact Reconfigurable Input/Output

	Abtastrate:	250	kS/s
Ausgangsmodule:			
Analogausgangsmodul	NI 9263	Spannungsausgang ($\pm 10V$)	
	Anzahl der Kanäle	4	
	Abtastrate	100	kS/s
	Auflösung	16 bit	
Relais-Digitalmodul	NI9481	30VDC(2A), 60VDC(1A), 250VAC (2A)	
	Anzahl der Kanäle	4	

Tabelle 16: Verwendete Komponenten des Mess- und Steuerungssystems (National Instruments Cooperation, 2012)

Die in Tabelle 16 aufgelisteten Komponenten sind in der Abbildung 43 dargestellt. Die Module werden durch Einstecken in das Aluminium-Chassis in das Mess- und Steuerungssystem eingebunden. Das Mess- und Steuerungssystem kann, je nach Verfügbarkeit von Steckplätzen im Aluminium-Chassis, mit zusätzlichen Modulen (z.B. Module für die Temperaturerfassung) erweitert werden.

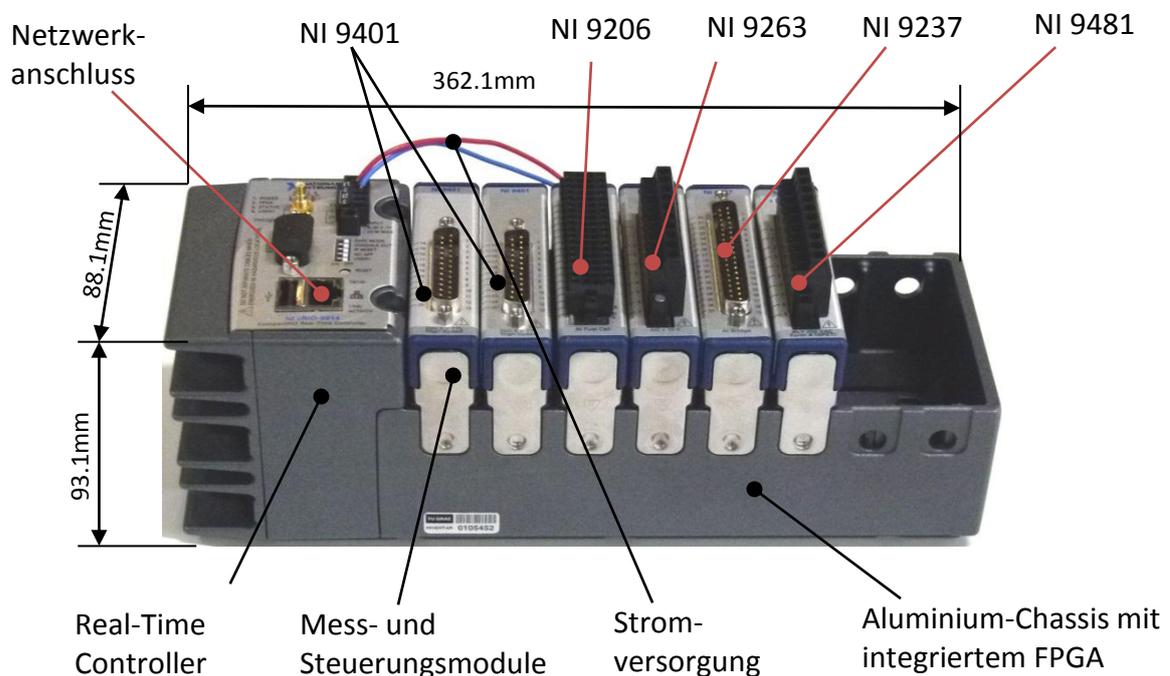


Abbildung 43: Die Hardware-Komponenten des CompactRIO – Steuerungs- und Messsystems

Die Echtzeitfähigkeit des Systems ermöglicht eine exakte, zeitdeterministische Erfassung der Messsignale. Von Echtzeitfähigkeit wird gesprochen, wenn man dem System die gewünschte Datenerfassungsrate, beispielsweise 100 Millisekunden, vorgeben kann und diese

Erfassungsrate exakt eingehalten wird. Das genaue Einhalten der Werte wird durch die Vergabe von Prioritäten im Programmablauf des Systems garantiert. Dies ist aus der Sicht der Messdatenerfassung als auch aus sicherheitstechnischen Gründen von enormem Vorteil. Die Datenerfassung sowie -ausgabe erfolgt bei diesem System über Ein- und Ausgangsmodule (siehe Tabelle 16). Zur Aufnahme der Mess- und Steuerungsmodule des Systems dient ein Chassis mit acht Modulsteckplätzen und integriertem FPGA²⁴. Das CompactRIO-System wird über eine Netzwerkverbindung mit einem Windows®-Rechner verbunden. Durch diese Netzwerkeinbindung ist das flexible Zugreifen auf das Steuerungs- und Messsystem möglich.

Die Hardware des neu entwickelten Prüfstandes wurde in den vorhergegangenen Kapiteln ausführlich beschrieben. Im Folgenden Kapitel 5 wird die erste Inbetriebnahme des Prüfstandes dargestellt.

²⁴ FPGA: Field Programmable Gate Array

5 Die Inbetriebnahme der Prüfvorrichtung

Das folgende Kapitel beschreibt die Inbetriebnahme der fertig ausgeführten Prüfvorrichtung. Die Positionierung der Hydraulikkomponenten wurde in Kapitel 4.3.1 beschrieben und abgebildet. In diesem Kapitel soll die Ansteuerung der elektrisch betätigten Ventile und das dazu benötigte elektrische Equipment dargestellt werden. Danach wird ein erster Inbetriebnahmeversuch mit kalibrierten Sensoren an einer tiefentladenen Lithium-Ionen Batterie beschrieben und die ausgewerteten Messdaten in einer Versuchskurve dargestellt.

5.1 Die Betätigung der Hydraulikkomponenten für die Inbetriebnahme der Prüfvorrichtung:

Die hydraulischen Bauteile zur Betätigung und Steuerung der Prüfvorrichtung lassen sich einteilen in:

- Stromproportionales Stromregelventil
- Stromproportionales Druckregelventil
- Wegeventil

Diese Bauteile sind in Abbildung 36 dargestellt. Die Ansteuerung des proportional Strom- und Druckregelventils erfolgt über Verstärkerkarten, welche durch eine Versorgungsspannung von 24V gespeist werden. Diese Speisung erfolgt durch ein SITOP-Versorgungsnetzteil der Fa. Siemens AG. Die Speisung des Wegeventils erfolgt ebenfalls durch das Versorgungsnetzteil. Die wichtigsten elektrischen Daten der elektronischen Verstärkerkarten, der stromproportionalen Ventile, sowie des Wegeventils sind in folgender Tabelle angeführt:

Merkmal:	Daten:	Einheit:
Elektronische Verstärkerkarte	EV1M2-12/24	-
Hersteller:	HAWE Hydraulik SE	
Gewählte Versorgungsspannung:	24	VDC
Festgelegter Ausgangsstrom	0-1	A
Gewählte Sollwertspannung	0-10	VDC
Stromregelventil:	SE 2-3/6-G 24	
Hersteller	HAWE Hydraulik SE	
Nennspannung	24	VDC
Druckregelventil	P 4-42/250-G 24	
Hersteller	HAWE Hydraulik SE	
Nennspannung	24	VDC

Wegeventil	NBVP 16G/R-M/0-2-G24	
Hersteller	HAWE Hydraulik SE	
Nennspannung	24	VDC

Tabelle 17: Auszug elektrischer Daten der Verstärkerkarte und der Proportionalventile

Die in Tabelle 17 angeführte Sollwertspannung ermöglicht durch eine entsprechende Aufbereitung in den elektronischen Verstärkerkarten die Steuerung der Proportionalventile. Für die Inbetriebnahme der Prüfvorrichtung wurde die Sollwertspannung durch Labornetzteile vorgegeben. Damit konnten für die ersten Funktionstests die Geschwindigkeit der Hubbewegung sowie der Druck des Hydrauliksystems (Druckkraft) eingestellt werden. Folgende Tabelle zeigt einige Einstellwerte für das proportional Strom- und Druckregelventil zum Erreichen bestimmter Vorschubgeschwindigkeiten und Druckkräfte:

Einzustellender Spannungswert proportional Stromregelventil:	Einzustellender Spannungswert proportional Druckregelventil:	Resultierende Vorschubgeschwindigkeit:	Resultierende Druckkraft:
7,5 V	10 V	1 mm/s	420 kN
0 V	10 V	6,4 mm/s	420 kN
0 V	0 V	3,4 mm/s	27 kN
8,5	10V	0,02 mm/s	420 kN

Tabelle 18: Beispielhafte Einstellwerte für das proportional Strom- und Druckregelventil

Die Betätigung des Wegeventils, sowie des Hydraulikaggregats erfolgte, für die erste Inbetriebnahme der Prüfvorrichtung, durch konventionelle elektrische Schalter.

5.2 Die Inbetriebnahme der Prüfvorrichtung

Im Anschluss an die Fertigstellung der elektrischen Versorgung und der Betätigung der hydraulischen Bauteile konnte ein erster Inbetriebnahmeversuch an einer Lithium-Ionen Batterie durchgeführt werden. Dazu wurde ein Knicktest an einer ungeladenen Testbatterie durchgeführt. Folgende Abbildung zeigt den Versuchsaufbau vor der Durchführung des Versuchs:

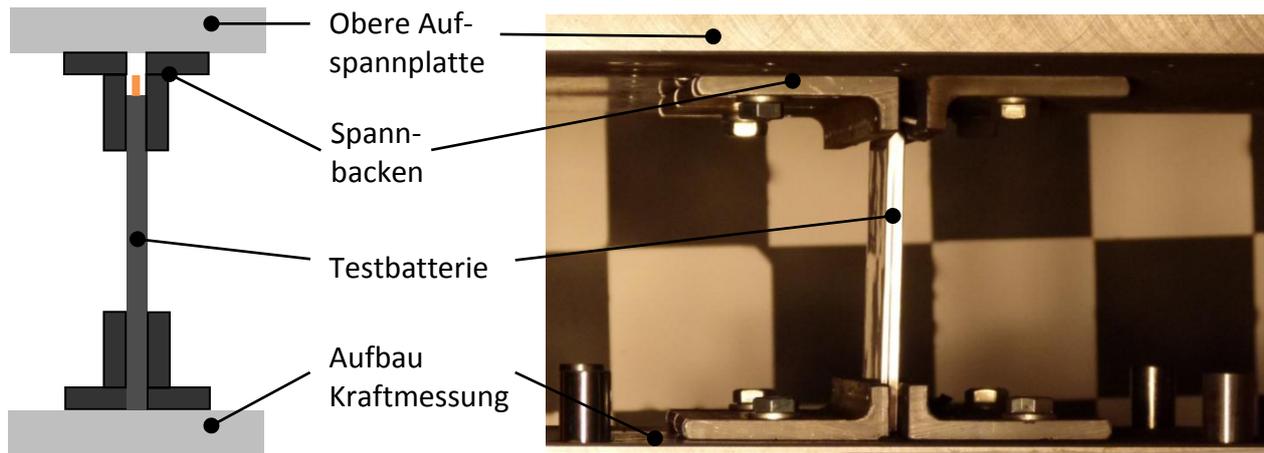


Abbildung 44: Knicktest – Inbetriebnahmeversuch

Die Testbatterie wurde mit den Polen nach oben in die Einspannbacken eingelegt. Beim Versuch wurden, wie bei den durchgeführten Prinzipversuchen (siehe Kapitel 3.3.2), die aufgebrachte Kraft und der Verfahrweg mit einem Kayser Threde MINIDAU® Messsystem erfasst. Für die Messung der Kraft kam ein kalibrierter Einachs-Kraftaufnehmer mit einem Messbereich von fünf Kilonewton (siehe Tabelle 14) zum Einsatz. Die Messung des Verfahrweges erfolgte über ein kalibriertes Seilpotentiometer mit einer maximalen Messlänge von 500mm. Das digitale Längenmesssystem konnte für diesen Versuch noch nicht eingesetzt werden. Die Vorschubgeschwindigkeit wurde mit 1 mm/s festgelegt. Folgende Abbildung 45 zeigt die Kraft-Weg-Kurve des durchgeführten Knicktests:

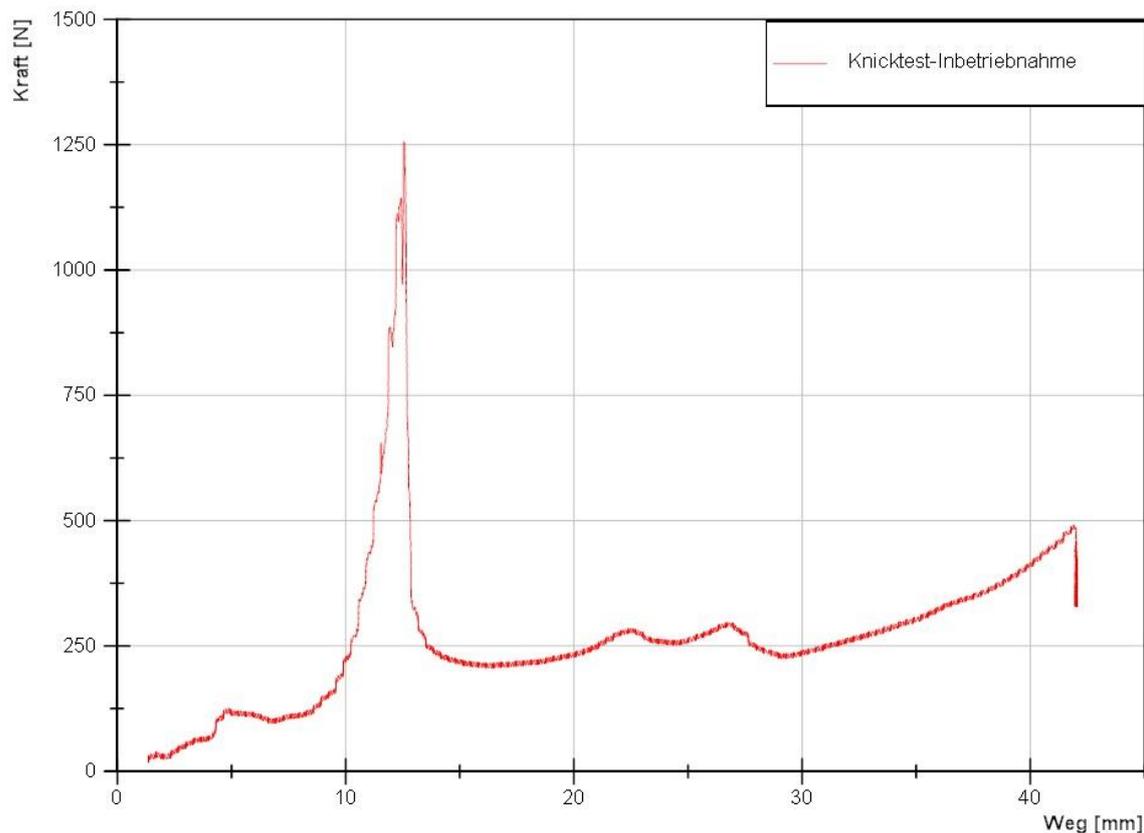


Abbildung 45: Kraft-Weg Verlauf – Knicktest Inbetriebnahmeversuch

Durch die Triggerung des Messsystems beginnt die Messkurve erst ab einem zurückgelegten Weg von einem Millimeter. Bei einer Kraft von ca. 1250 Newton erfolgte das Ausknicken der Versuchszelle, worauf ein schneller Abfall der Kraft erfolgte. Der Kraftanstieg ab einem zurückgelegten Weg von etwa 29 Millimetern ist auf das Zusammendrücken der Testbatterie zwischen den Spannbacken zurückzuführen. Für den durchgeführten Versuch wurde als Abbruchkriterium ein Fahrweg des Hydraulikkolbens von 40mm festgelegt. Dieses Abbruchkriterium konnte, wie Abbildung 45 zeigt, beim Inbetriebnahmeversuch nicht genau eingehalten werden, da das Beenden der Vorschubbewegung manuell durch das Loslassen des Betätigungsschalters für das Wegeventil erfolgte. Für die Generierung von objektiven reproduzierbaren Messdaten ist die genaue Wegsteuerung aber Grundvoraussetzung. Beim Erreichen eines bestimmten Abbruchkriteriums, z.B. eines bestimmten Fahrweges, soll die Prüfvorrichtung die Hubbewegung automatisch stoppen. Die Messdaten wurden für die Diagrammdarstellung in Abbildung 45 geglättet. Die Glättung erfolgte sowohl für die Wegdaten als auch für die Kraftdaten durch eine gleitende Mittelwertbildung mit 30 Nachbarwerten. Dies kann dazu führen, dass bestimmte Details in der Versuchskurve durch das Glättungsverfahren

nicht mehr dargestellt werden. Der durchgeführte Knicktest wird als Referenzversuch für den Vergleich des neu entwickelten Mess- und Steuerungssystems verwendet.

Im Zuge der Inbetriebnahme der Prüfvorrichtung wurden auch die maximal erreichbare Druckkraft sowie die maximal und minimal erzielbare Vorschubgeschwindigkeit überprüft. Diese Daten sind in Tabelle 19 dargestellt.

Überprüfte Komponente:	Wert:	Einheit:
Maximale Druckkraft	420	kN
Minimale Druckkraft	28	kN
Maximale Vorschubgeschwindigkeit:	6,4	mm/s
Minimale Vorschubgeschwindigkeit:	0,01	mm/s
Maximale Rückhubgeschwindigkeit:	11,5	mm/s
Minimale Rückhubgeschwindigkeit:	5,5	mm/s

Tabelle 19: Maximal und minimal erreichbare Druckkräfte und Vorschubgeschwindigkeiten

Wie in Tabelle 18 und Tabelle 19 ersichtlich werden die laut Kapitel 3.4.1 berechneten Werte etwas übertroffen. Eine Überprüfung der Zugkraft wurde nicht durchgeführt. Anhand der gemessenen maximalen Druckkraft der Anlage, wurde die Untersuchung des Gesamtdeformationsverhaltens der Prüfvorrichtung (analog zu Kapitel 4.2.3) erneut durchgeführt. Trotz der Erhöhung der maximalen Druckkraft beträgt die Gesamtdeformation der Prüfvorrichtung nach der erneuten statischen FE-Analyse weniger als zwei Millimeter.

6 Die Entwicklung der Mess- und Steuerungssoftware

Dieses Kapitel beschreibt die gesamte Durchführung der Entwicklung der Mess- und Steuerungssoftware. Sie ist für die Funktionsfähigkeit der Prüfvorrichtung das wesentliche Kernstück, da sowohl die Datenerfassung als auch die Steuerung des Hydrauliksystems über einen definierten Programmablauf erfolgt. Die Beschreibung der Entwicklung wird mit Messdaten belegt, welche die gewünschte Funktion der Prüfvorrichtung zeigen.

Zu Beginn des Kapitels wird auf den Arbeitsablauf bei der Entwicklung der Mess- und Steuerungssoftware eingegangen und die grundlegenden Anforderungen an die Mess- und Steuerungssoftware beschrieben. Für die Bezeichnung Mess- und Steuerungssoftware wird folgend die Abkürzung „MSS“ verwendet. Der in Abbildung 46 dargestellte Ablauf bei der Entwicklung der MSS gliedert sich in 4 Bereiche:

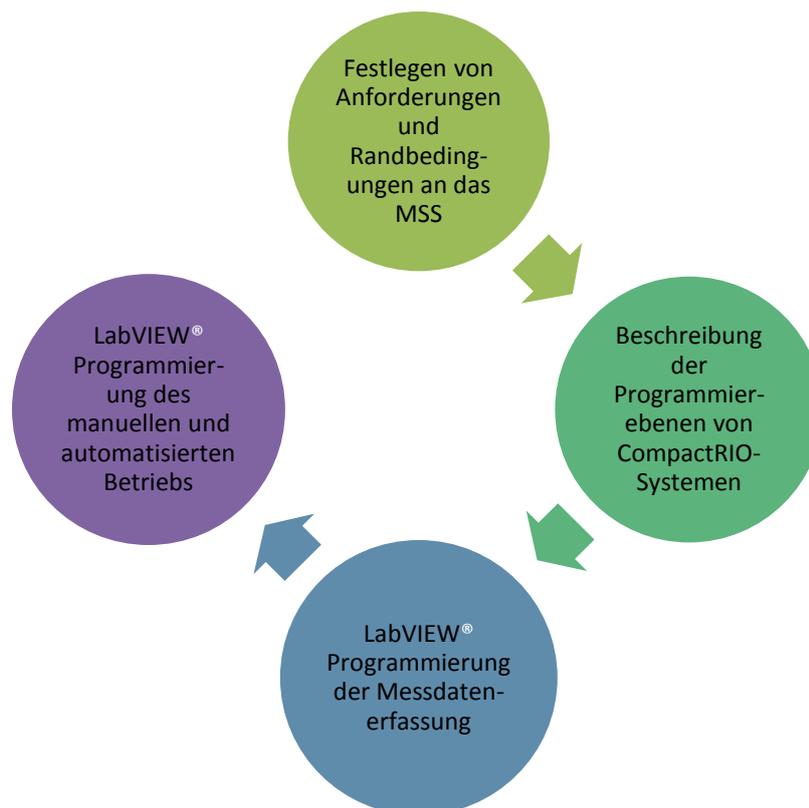


Abbildung 46: Der Arbeitsablauf bei der Entwicklung der Mess- und Steuerungssoftware

Nach dem Festlegen der Anforderungen und Randbedingungen an das MSS werden die Arbeitsschritte bei der Entwicklung des Systems beschrieben. Dabei werden sowohl die Grundlagen der Programmierung des CompactRIO-Systems als auch die Entwicklung der Datenerfassung gezeigt. Anschließend wird auf die softwaretechnische Umsetzung eines

manuellen und eines automatisierten Betriebs der Prüfvorrichtung eingegangen. Versuchsergebnisse, welche das Verhalten des MSS zeigen, werden, um die Erfüllung der Anforderungen und Randbedingungen zu belegen, ergänzend zu den Erklärungen dargestellt.

6.1 Anforderungen und Randbedingungen an die Mess- und Steuerungssoftware

Die Anforderungen an das Mess- und Steuerungssystem, umfassen die Bedienung der Prüfanlage, die genaue Messdatenerfassung sowie ein durchgängiges Sicherheitssystem. Der grundlegende Ablauf eines mechanischen Tests an einem EES kann nach folgendem Ablaufdiagramm dargestellt werden (Doughty, et al., 2006)²⁵:

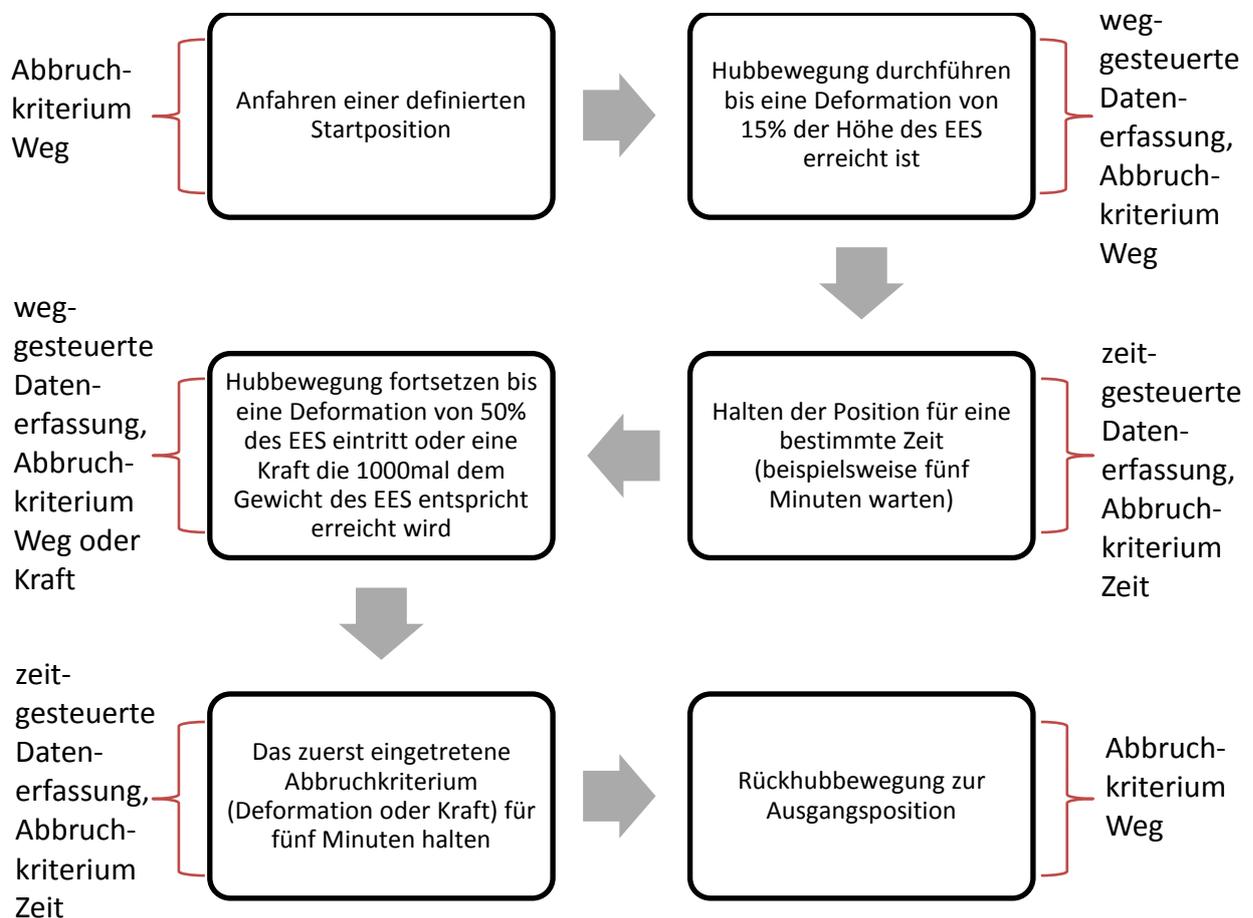


Abbildung 47: Versuchsablauf für quasi-statische mechanische Tests an elektrischen Energiespeichern

²⁵ Versuchsablauf laut dem FreedomCAR Electrical Energy Storage System Abuse Test Manual for Electric and Hybrid Electric Vehicle Applications (Ausgabe August 2006)– Crush Test; S.18

Die Abbildung 47 zeigt den gewählten Versuchsablauf für die Entwicklung der MSS. Das Hauptziel bei der Entwicklung der gesamten Prüfumgebung ist, wie bereits erwähnt, die Unterstützung der Validierung eines prognosefähigen mechanischen Simulationsmodells. Um diese Unterstützung optimal zu ermöglichen, sollen nach der Messung alle Daten direkt weg aufgelöst vorliegen (weggesteuerte Datenerfassung). Dies wird durch den digitalen Längenmaßstab in Kombination mit dem CompactRIO-System verwirklicht und in Kapitel 6.3 näher beschrieben. Das Halten einer Position während des durchgeführten Versuchs erfordert eine Umstellung der Messdatenerfassung vom weggesteuerten auf einen zeitgesteuerten Modus (zeitgesteuerte Datenerfassung). So sind Versuche an EES möglich, die das Aufbringen einer konstanten Kraft über einen bestimmten Zeitraum realisieren (Standversuche). Dies kann zur Detektion von schleichenden Kurzschlüssen verwendet werden. Neben der Messdatenerfassung ist auch die Erfüllung der gewünschten Abbruchkriterien (Weg, Kraft und Zeit) steuerungstechnisch zu realisieren. Für eine hohe Reproduzierbarkeit der durchzuführenden Versuche ist eine definierte, reproduzierbare Startposition vor dem Versuchsstart notwendig. Ebenso soll nach der Versuchsdurchführung eine Rückhubbewegung der Prüfvorrichtung in die Ausgangsposition erfolgen.

In folgender Tabelle sind die Anforderungen und Randbedingungen, welche bei der Entwicklung der MSS implementiert werden müssen, zusammengefasst.

Anforderung, Randbedingung:	Bemerkung:
Steuerungssystem:	Modularer Aufbau, einfache Bedienung
Abbruchkriterien:	
<i>Maximalkraft</i>	Eingabe der maximalen Druckkraft, Messung über Kraftaufnehmer, Interaktion Messdatenerfassung und Steuer-Logik
<i>Maximalweg</i>	Eingabe des maximalen Verfahrensweges, Messung über das Längenmesssystem, Interaktion Messdatenerfassung und Steuer-Logik
<i>Wartezeit</i>	Eingabe einer Wartezeit, Messung über erfassten Zeitstempel am CompactRIO-System, Interaktion Messdatenerfassung und Steuer-Logik
Manueller Betrieb:	Inbetriebnahme, Prinzipversuche, Einstellarbeiten
Automatischer Betrieb:	Hohe Reproduzierbarkeit, Standversuche, Anfahren einer Start- und Referenzposition
Messsystem:	Modulare Programmstruktur, einfach erweiterbar
Messdatenerfassung:	Exakte Zuordenbarkeit der Messdaten bei der Erfassung, ausnutzen der Echtzeitfähigkeit und des FPGA zur Datenerfassung
<i>Weggesteuert</i>	Verwenden der Auflösung des digitalen Längenmaßstabes zur Triggerung der Datenerfassung aller Messkanäle
<i>Zeitgesteuert</i>	Nutzen der Echtzeitfähigkeit des Systems zur zeitdeterministischen Datenerfassung
Sicherheitssystem:	Ermöglichen des Abbruchs der Hubbewegung durch eine software- und hardwareseitige Betätigung eines Not-Aus Schalters

Tabelle 20: Anforderungen und Randbedingungen an die Mess- und Steuerungssoftware

Um die Vorgaben laut Tabelle 20 zu erfüllen, muss das Steuerungs- und Messsystem aufeinander abgestimmt werden, um die Messdatenerfassung bestmöglich durchführen zu können. Daneben muss ein durchgängiges Sicherheitssystem den Schutz des Bedienpersonals vor Arbeitsunfällen gewährleisten. Folgende Abbildung zeigt den prinzipiellen Aufbau der MSS, welche für die Erfüllung der Anforderungen des gewählten Versuchsablaufs geeignet ist.

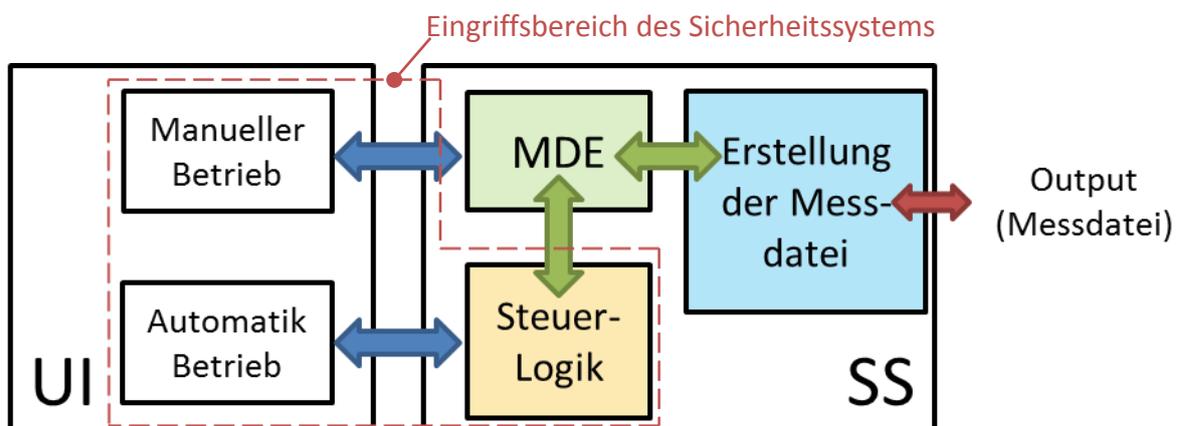


Abbildung 48: Prinzipaufbau der Mess- und Steuerungssoftware

Abbildung 48 zeigt, dass während der Entwicklung der MSS auf einen modularen Aufbau der Software geachtet wird. Damit lassen sich die einzelnen Programmteile unabhängig

voneinander Testen und Erweitern. Die Betriebszustände manueller und automatischer Betrieb sollen mit dem Steuerungssystem (SS) kommunizieren und in der Steuer-Logik entsprechende Funktionen für die Hubbewegung der Prüfvorrichtung ansprechen. Die Messdatenerfassung (MDE) soll als eigenes Modul in der Software arbeiten. Erst durch das Aktivieren der MDE erfolgt die Erstellung und das Schreiben einer Messdatei. Die Kommunikation der Steuer-Logik mit der MDE muss die Überwachung und das Eingreifen durch das Bedienpersonal während des Versuchs, sowie das automatische Erkennen der gewünschten Abbruchkriterien ermöglichen. Die Vorteile einer derartigen Programmstruktur ergeben sich besonders bei der Programmierung der MSS. Sowohl die Testbarkeit, die Unabhängigkeit der Softwaremodule als auch die daraus resultierende Flexibilität bei der Erweiterung der MSS werden durch den modularen Aufbau optimal ermöglicht. Soll beispielsweise eine zusätzliche Funktion in der Steuerlogik implementiert werden, so wird das Modul „Steuer-Logik“ entsprechend angepasst. Während der Entwicklung kann diese zusätzliche Steuerungseigenschaft unabhängig von den anderen Modulen getestet werden.

Das folgende Unterkapitel beschreibt die Grundlagen zu den Programmiererebenen und Kommunikationspfaden des verwendeten CompactRIO-Systems.

6.2 Grundlegende Erklärungen zu den Programmier- und Kommunikationsebenen des CompactRIO-Systems

In Kapitel 4.3.2 wurden die technischen Daten des CompactRIO-Systems der National Instruments GmbH vorgestellt (siehe Tabelle 16). Das Programmieren des Systems unterteilt sich systembedingt in drei Ebenen:

- Host PC
- Real Time Controller
- FPGA

Abbildung 49 zeigt die Programmier- und Kommunikationsebenen des CompactRIO-Systems genauer.

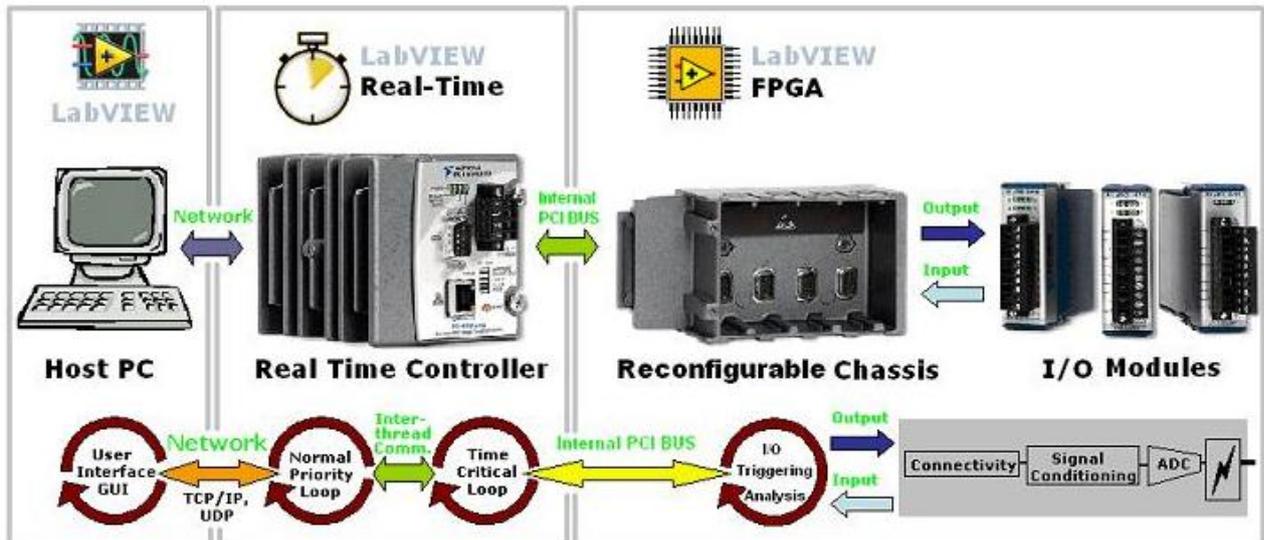


Abbildung 49: Die Programmier- und Kommunikationsebenen des CompactRIO-Systems
(National Instruments Cooperation, 2011)

Die Kommunikation zwischen dem Host PC (User-Interface) und dem Mess- und Steuerungssystem erfolgt mittels einer Netzwerkverbindung (TCP/IP²⁶ und UDP²⁷) über den Austausch von Netzwerkvariablen. Die Programmierung des Echtzeit-Systems und der Funktionen des FPGA's erfolgt am Host PC in der Entwicklungsumgebung von LabVIEW®. Nach der Programmierung und Verteilung des Programmes auf die jeweiligen Systemebenen wird am Host PC nur die Benutzerschnittstelle, welche die Kommunikation zwischen dem Echtzeit-Controller und dem Host PC sicherstellt, ausgeführt. Die eigentliche Software läuft direkt am CompactRIO-System. Durch das Festlegen von zeitkritischen (time critical loops) und nicht zeitkritischen (normal priority loops) Schleifen am CompactRIO-System, welche durch die Zuordnung von Schleifenprioritäten bestimmt werden, wird eine genaue zeitdeterministische Datenerfassung erreicht. Die Verbindung des Echtzeit-Systems mit dem rekonfigurierbaren Chassis erfolgt über einen internen PCI²⁸ Bus.

²⁶ TCP/IP: Transmission Control Protocol/ Internet Protocol; Auf IP-Adressen basierende Kommunikation in einem Netzwerk

²⁷ UDP: User Datagram Protocol

²⁸ PCI: Peripheral Component Interconnect

Die dritte System-Ebene ist der FPGA, welcher individuell mit den Ein- und Ausgangsmodulen verbunden werden kann. Mit dieser „programmierbaren“ Hardware können Daten sehr schnell und mit hoher Genauigkeit (deterministische Datenerfassung auf bis zu 25 Nanosekunden) erfasst werden. Eine beispielhafte Anordnung von logischen Verknüpfungen am FPGA ist in folgender Abbildung dargestellt:

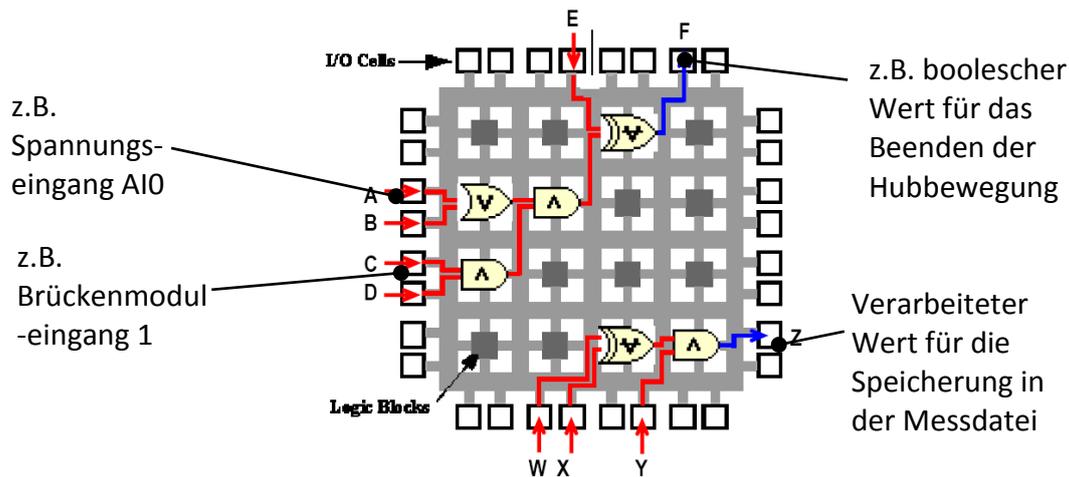


Abbildung 50: Logische Verknüpfungen von Ein- und Ausgängen am FPGA-Chipsatz
(Pasquarette, 2010)

Das fertiggestellte Programm mit den festgelegten Funktionen für den FPGA wird durch eine Kompilierung auf den FPGA Chipsatz übertragen. Am Chipsatz werden die gewünschten Funktionen durch Kombination von Logik-Blöcken (siehe Abbildung 50) ausgeführt. Das Resultat ist wie eine elektronische Schaltung zu verstehen, welche für durchzuführende Aufgaben (z.B. Berechnungen, Vergleiche von Messsignalen der Module) nur den Hardware-Takt von 25 Nanosekunden benötigt. Diese Eigenschaft wird bei der Datenerfassung und der Steuerung der Prüfvorrichtung ausgenutzt.

Die Programmier- und Kommunikationsebenen können am Prinzipschaubild der MSS (siehe Abbildung 48) wie folgt dargestellt werden:

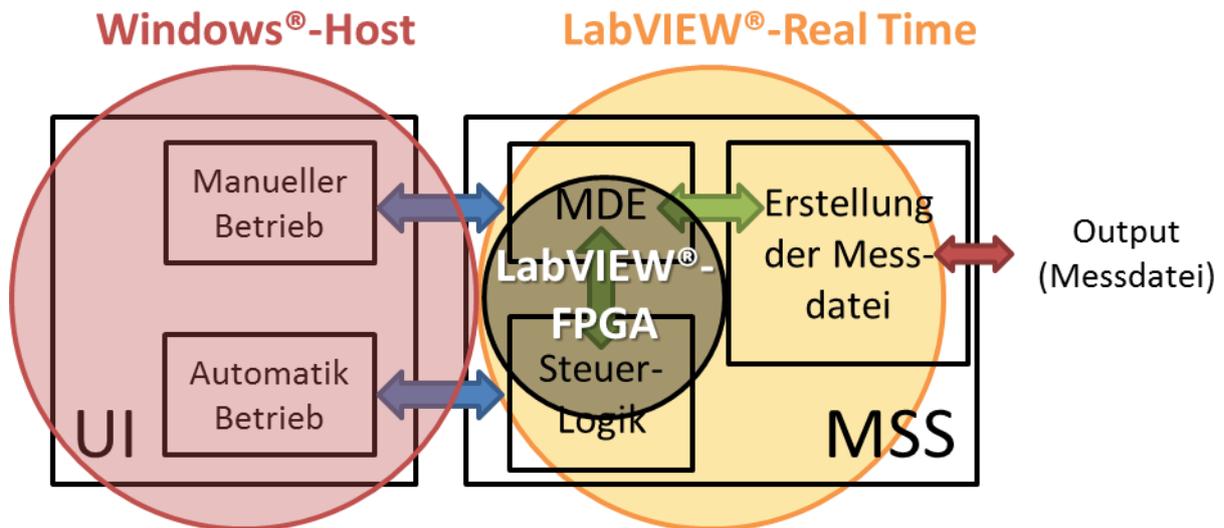


Abbildung 51: Darstellung der Programmirebenen am Prinzipaufbau der Mess- und Steuerungssoftware

Bei der Entwicklung der MSS dient der auf Windows® basierende Host rein als Visualisierungs- und Bedienoberfläche für das Prüf- und Bedienpersonal. Die benötigte Rechen- und Speicherleistung zur Verarbeitung und Analyse der Messdaten übernehmen das Real-Time System und der FPGA. Das Real-Time System bildet somit das Kommunikationszentrum zwischen dem Windows® Host PC und dem FPGA.

Folgendes Unterkapitel beschreibt die Programmierung der Messdatenerfassung (MDE) genauer.

6.3 LabVIEW® Programmierung der Messdatenerfassung

Für die Erfassung der Messdaten werden die Echtzeitfähigkeit sowie die Schnelligkeit der Datenerfassung des FPGA's ausgenutzt. Das eigentliche Kernstück der Messdatenerfassung ist die automatische Unterscheidung zwischen einem weg- und zeitgesteuerten Mechanismus. Folgende Abbildung zeigt die Funktionen der MDE genauer:

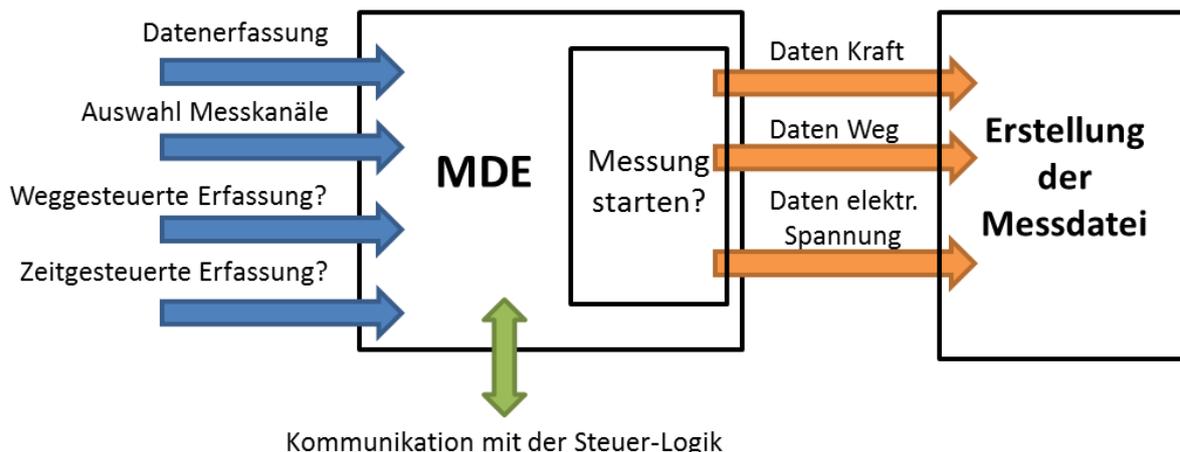


Abbildung 52: Die Funktionen der Messdatenerfassung (MDE)

Die grundsätzliche Funktion der MDE besteht darin, dass sämtliche Kanäle der Ein- und Ausgangsmodule ständig abgetastet werden. Darum werden zu Beginn des Programmablaufs am CompactRIO-System die Parameter der Analog-Messmodule (NI 9237, NI 9206) festgelegt. Diese sind in folgender Tabelle 21 angeführt:

Parameter:	Wert, Bemerkung:	Einheit:
Brückenmodul (NI 9237):	Kraftmessung	
Versorgungsspannung der DMS:	5	V
Erfassungsrate (programmatisch einstellbar, von 1.613 bis 50.000 S/s):	50.000	S/s
Spannungsmodul (NI 9206):	Spannungsmessung	
Messbereich (programmatisch einstellbar: ±200mV, ±1V, ±5V, ±10V)	±5	V
Erfassungsrate (nicht einstellbar)	250	kS/s

Tabelle 21: Vorgabeparameter der Analog-Eingangsmodule

Die Parameter werden vor dem Beginn der Datenerfassung vorgegeben, um die bestmögliche Konfiguration der Sensoren und Module für die Datenerfassung sicherzustellen.

Die Auswahl der Messkanäle erfolgt durch den Bediener der Prüfanlage am Windows® Host PC. Die weg- oder zeitgesteuerte Erfassung wird, wie bereits erwähnt, durch die MDE über die Kommunikation mit der Steuer-Logik realisiert. Dabei erfolgt eine automatische Erkennung, ob eine zeit- oder weggesteuerte Datenerfassung durchgeführt wird.

Der Beginn der Messung erfolgt über die Aktivierung eines booleschen Bedienelements (Messung starten). Wird dieses Bedienelement aktiviert, beginnt sofort die Datenerfassung. Die Erstellung der Messdatei, in welcher die vom Bediener ausgewählten Kanäle gespeichert

werden, erfolgt gleichzeitig. Die grundsätzlichen Funktionen der MDE nach dem Beginn der Datenerfassung sind in folgendem Ablaufdiagramm dargestellt.

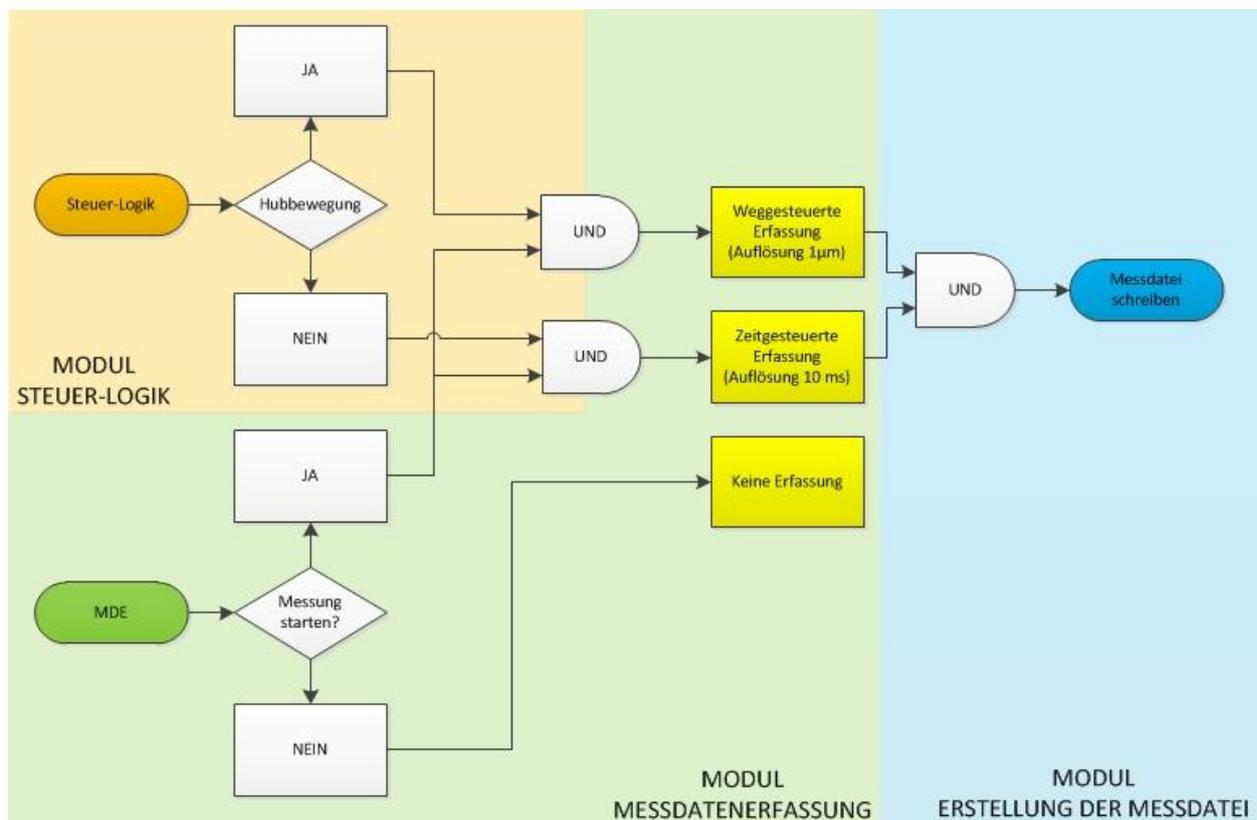


Abbildung 53: Ablaufdiagramm der zeit- und weggesteuerten Datenerfassung

Ist das boolesche Element (Messung starten) aktiviert und wird eine Hubbewegung der Kolbenstange durchgeführt, so erfolgt die weggesteuerte Datenerfassung sämtlicher Messkanäle. Hier kommt die Funktion des digitalen Längenmesssystems zum Einsatz. Der digitale Linearmaßstab liefert zu jedem tausendstel Millimeter ein digitales Signal, welches über das Digital-Modul (NI 9401) erfasst wird. Der FPGA erkennt die Wertänderung des digitalen Einganges und liefert ein Triggersignal zur Datenerfassung. Somit wird eine sehr genaue Zuordnung der Kraft- und Spannungswerte direkt zum erfassten Wegwert erreicht, was für eine Detektion von auftretenden Kurzschlüssen und für die Validierung eines prognosefähigen Simulationsmodells sehr gut geeignet ist. Durch die hohe Auflösung des Längenmesssystems können selbst dünne Batteriezellen mit Einzelkomponenten (Anodenfolien, Kathodenfolien, Separator), welche eine Dicke im hundertstel Millimeterbereich und darunter aufweisen, im weggesteuerten Datenerfassungsmodus getestet werden. Genaue Daten über die Dicke der Einzelkomponenten sind der Diplomarbeit von (Lichtenegger, 2012) zu entnehmen.

Die Detektion des Beginns der Hubbewegung erfolgt direkt am FPGA, wenn das Wegeventil betätigt wird. Dadurch wird garantiert, dass bereits bei der ersten Änderung des digitalen Signals des Längenmesssystems die Datenerfassung im weggesteuerten Modus erfolgt.

Wird das Wegeventil nicht betätigt und der Messzyklus ist aktiv, erfolgt der automatische Übergang der Datenerfassung in den zeitgesteuerten Modus. Hier wird durch die Festlegung der Durchlaufdauer der Datenerfassungsschleife die Erfassungsrate festgelegt. Dies erfolgt alle zehn Millisekunden (Erfassungsfrequenz: 100Hz). Die Zeit wird aber auch bei der weggesteuerten Messung aufgezeichnet, damit eine Zuordenbarkeit zwischen zeit- und weggesteuerter Datenerfassung möglich ist.

Zur Darstellung der vorhin beschriebenen Eigenschaften der MDE werden in Tabelle 22 aufgezeichnete zeit- und weggesteuerte Messdaten bei einem durchgeführten Versuch gezeigt.

Ausgewählt...			
Name	Weg	Zeit	Kraft
Nummer	6	5	3
Länge	1991	1991	1991
Einheit	[mm]	[ms]	[N]
Kanalinhalt			
214	-0.002	2120.219	-38.1484375
215	-0.002	2130.219	408.171875
216	-0.002	2140.219	-34.33203125
217	-0.002	2150.219	373.83984375
218	-0.002	2160.219	392.9140625
219	-0.002	2170.219	717.1640625
220	-0.002	2180.219	305.17578125
221	-0.002	2190.219	370.02734375
222	-0.003	2242.968	358.58203125
223	-0.002	2244.504	396.7265625
224	-0.001	2244.76	335.6953125
225	0	2245.016	492.09765625
226	0.001	2245.272	320.43359375
227	0.002	2245.528	-19.07421875
228	0.003	2246.168	316.62109375
229	0.004	2246.298	404.359375
230	0.005	2246.552	389.09765625
231	0.006	2246.808	549.31640625
232	0.007	2247.32	320.43359375
233	0.008	2247.45	446.3203125
234	0.009	2248.344	385.28515625
235	0.01	2248.474	354.765625
236	0.011	2248.602	278.47265625

Tabelle 22: Auszug von zeit- und weggesteuert erfassten Messdaten

Tabelle 22 zeigt die erfassten Messdaten der Längenmessung (Spalte 1), der Zeitaufzeichnung (Spalte 2) und der Kraftmessung (Spalte 3). Eine Spannungsmessung wurde bei diesem Versuch nicht durchgeführt. Es können jedoch sämtliche Messkanäle auf diese Weise dargestellt werden. In Tabelle 22 ist der Übergang zwischen zeit- und weggesteuerter Erfassung zwischen Kanalinhalt 221 und 222 gut zu erkennen. Betrachtet man die vorhergehenden Kanalinhalte, so ist die zeitdeterministische Erfassung mit der Erfassungsrate von zehn Millisekunden zu

erkennen (Kanalinhalt 214 bis 221). Hier ist der Messzyklus aktiviert, eine Hubbewegung wird jedoch noch nicht ausgeführt. Zwischen Kanalinhalt 221 und 222 erfolgt die Betätigung des Wegeventils, worauf automatisch auf die weggesteuerte Erfassung der Messkanäle umgeschaltet wird. Ab diesem Zeitpunkt liefert die MDE nicht mehr alle zehn Millisekunden Werte, sondern bei jedem tausendstel Millimeter Wegänderung.

Wird die Betätigung des Wegeventils während der Messung deaktiviert, so erfolgt automatisch wieder die Umstellung auf die zeitgesteuerte Erfassung.

6.3.1 Die Messdatenübertragung vom FPGA nach LabVIEW® Real-Time und die Erstellung der Messdatei

Das Speichern der Messdaten erfolgt direkt am CompactRIO-System am internen, nichtflüchtigen Speicher mit einer Kapazität von zwei Gigabyte. Dabei muss zunächst die Übertragung der Messdaten vom FPGA nach LabVIEW® Real-Time erfolgen. Dies geschieht durch eine direkte gepufferte Datenübertragung (DMA-FIFO²⁹). Dazu wurden für die Erfassung der Messdaten drei FIFO's definiert. Ein FIFO (FIFO – Weg_Zeit) erfasst die Daten der Längenmessung (NI 9401) und der Zeitmessung. Der zweite FIFO (FIFO – Kraft) dient der Erfassung der Messdaten des Brückenmoduls (NI9237) und der dritte FIFO erfasst die Messwerte des Spannungseingangsmoduls (NI9206).

²⁹ DMA-FIFO: Direct Memory Access - First In-First Out

Abbildung 54 stellt die Funktionen und den Ablauf der Datenübertragung dar:

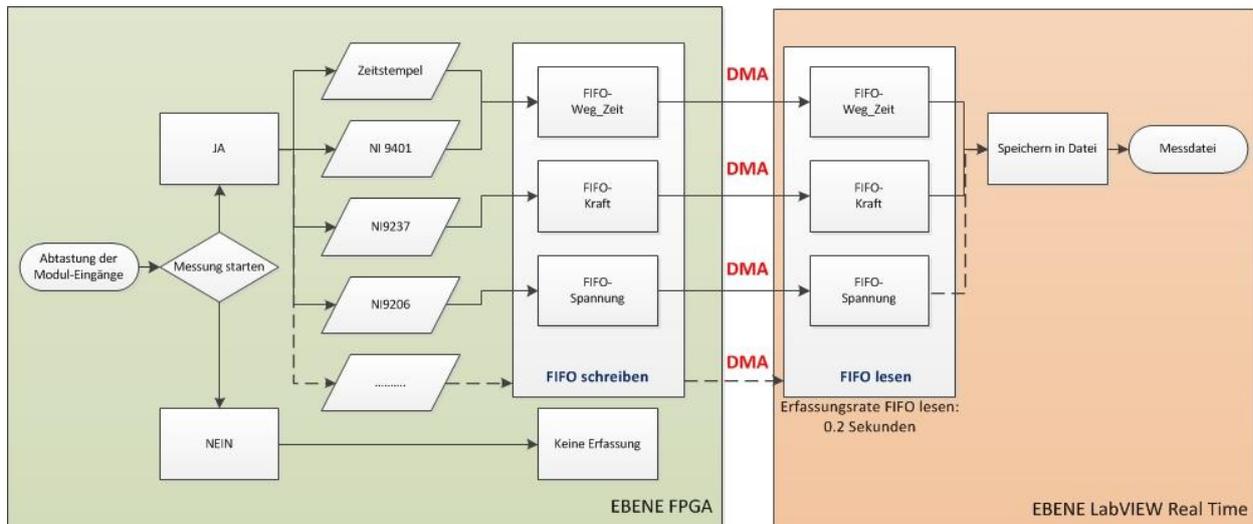


Abbildung 54: Messdatenübertragung zwischen den Systemebenen FPGA und LabVIEW® Real Time

Der Beginn des Beschreibens der FIFO`s wird durch das Betätigen des booleschen Elementes, (Messung starten) gleichzeitig mit der Messdatenerfassung ausgelöst. Nach dem Aktivieren des Messzyklus werden sämtliche Kanäle der Messmodule auf den jeweils definierten FIFO geschrieben. Die unterbrochen dargestellten Linien und leeren Datensymbole in Abbildung 54, deuten auf die Möglichkeit der flexiblen Erweiterung des Messsystems hin. Wird beispielsweise das Messsystem durch ein zusätzliches Messmodul (z.B. Modul für die Temperaturmessung) erweitert, kann dies durch einfache Adaption des bestehenden Messdatenerfassungssystems erfolgen. Die Daten werden an das Echtzeit-System übertragen, ausgelesen und für die Speicherung in einer Messdatei aufbereitet. Nach dem Beenden des Messzyklus wird die Messdatei am internen Speicher des Echtzeit-Systems abgelegt.

Die vorhin beschriebene weggesteuerte Erfassung muss allerdings durch die begrenzte Systemleistung des CompactRIO-Systems beschränkt werden. Im folgenden Unterkapitel wird diese kritische Anforderung näher beschrieben.

6.3.2 Die notwendige Begrenzung der weggesteuerten Datenerfassung

Dynamische Vorgänge während der weggesteuerten Datenerfassung können auf Grund der großen zu verarbeitenden Datenmenge zur Instabilität des CompactRIO-Systems führen. Beispielsweise kann es durch sprödes Materialverhalten zu schnellen Änderungen des Weges

innerhalb kürzester Zeit kommen. Wird dabei die weggesteuerte Datenerfassung nicht begrenzt, so kann es durch Überschreiten der maximalen Größe der DMA-FIFO's von 16.000 Werten zu einem instabilen Verhalten des Echtzeit-Systems kommen. Unter einem instabilen Verhalten wird die Überlastung der Systemressourcen des CompactRIO-Systems verstanden, welche zu einem Absturz des Systems führen kann. Für eine sichere Versuchsdurchführung, muss das System bei jedem Betriebszustand der Prüfanlage eine Datenverarbeitung ermöglichen, ohne die verfügbaren Ressourcen dabei zu überschreiten. Die Abbildung 55 zeigt ein Kraft-Wegdiagramm eines Testkörpers mit plötzlichem Materialversagen unter quasi-statischer Belastung.

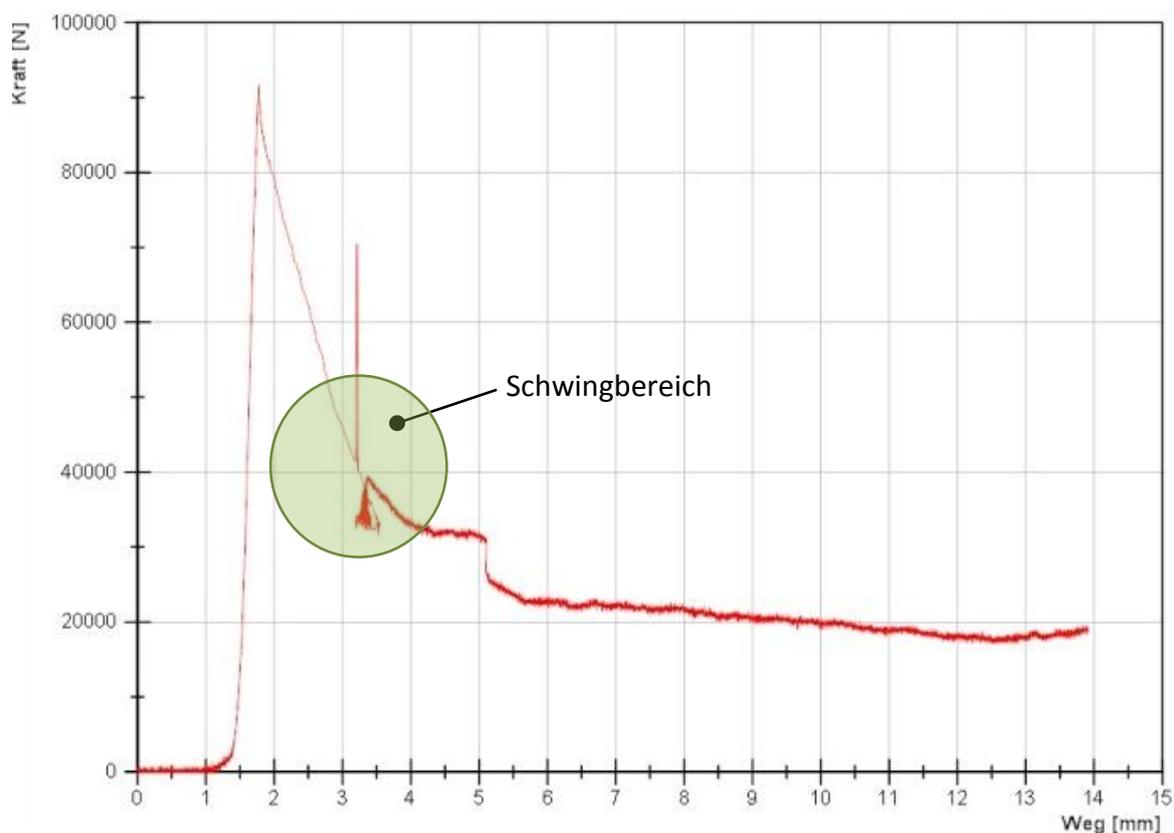


Abbildung 55: Kraft-Weg-Diagramm eines Testkörpers mit plötzlichem Materialversagen

Für die Entwicklung des Datenerfassungssystems ist der Bereich nach dem Versagen der Materialprobe von großem Interesse, da hier die hohen dynamischen Vorgänge auftreten (siehe farbige Kennzeichnung in Abbildung 55). Nach dem Anstieg der Druckkraft auf ein Niveau von etwa 92 Kilonewton kommt es zu einem plötzlichen Versagen der Probe, worauf eine Wegänderung von mehreren Millimetern innerhalb weniger Millisekunden auftritt (siehe Abbildung 56). Dabei kommt es durch den Rückgang der elastischen Verformung der

Prüfvorrichtung und durch die Dämpfungseigenschaften des Hydrauliköls zu einer Schwingbewegung der unteren Aufbauplatte, welche über die Längenmessung erfasst wird. Bei der Durchführung dieses Versuchs kam es durch die anfallende, große Datenmenge zu einem „Absturz“ des CompactRIO-Systems. Dieser Systemabsturz ist in Abbildung 55 durch das plötzliche Ende der Kurve nach einem Weg von etwa 13.9mm zu erkennen, obwohl als Abbruchkriterium ein Deformationsweg von 50 Millimetern festgelegt wurde.

Folgende Abbildung verdeutlicht, den dynamischen Vorgang des Versuchs an einem Testkörper mit plötzlichem Materialversagen.

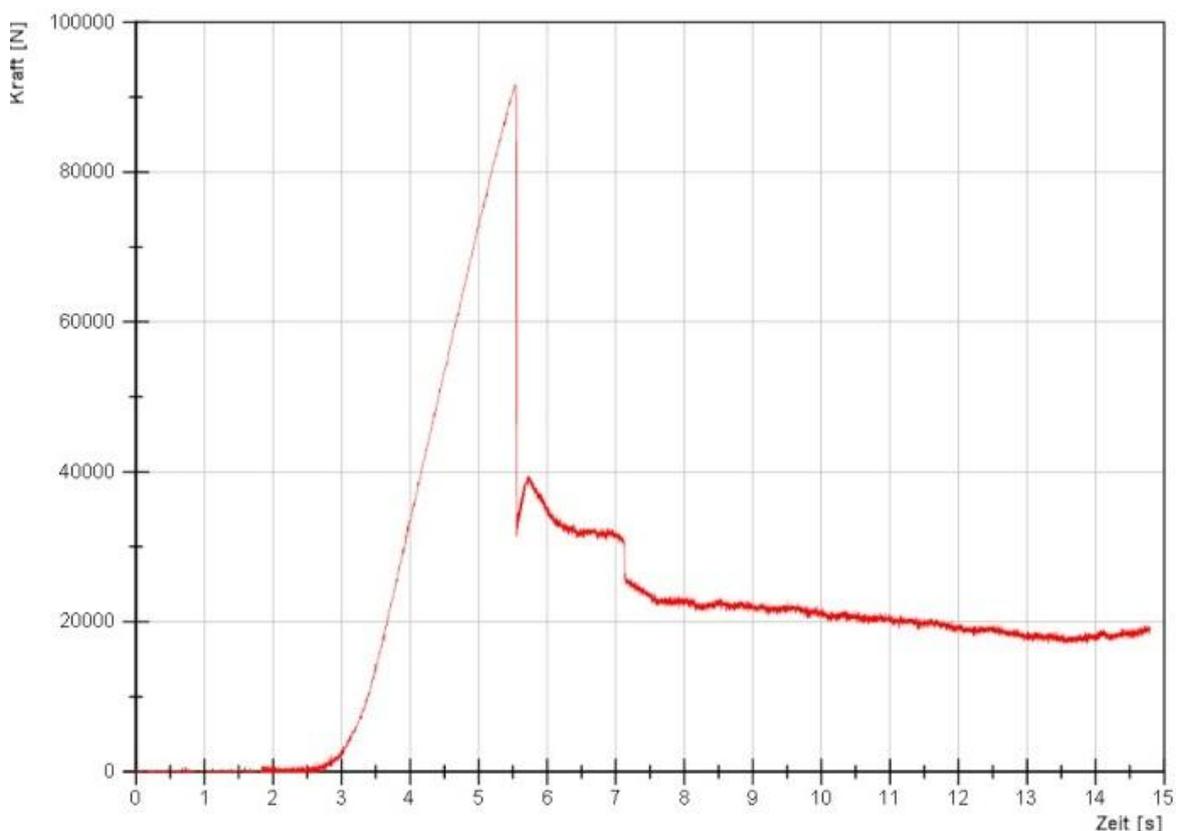


Abbildung 56: Kraft-Zeit-Diagramm eines Testkörpers mit plötzlichem Materialversagen

Abbildung 56 zeigt den Kraftsprung 5,5 Sekunden nach dem Versuchsstart, welcher das Versagen des Versuchskörpers kennzeichnet. Dieser Kraftsprung passiert innerhalb kürzester Zeit, wobei etwa ein Weg von fünf Millimeter zurückgelegt wird. Hier muss sichergestellt werden, dass die erfassten Daten auch auf Ebene von LabVIEW® Real-Time verarbeitet werden können. Wie vorhin erwähnt, sind dabei die DMA-FIFO's die elementaren Komponenten. Vor allem der DMA-FIFO für die Erfassung der Spannungswerte ist durch die 16 Messkanäle die

ausschlaggebende Komponente. Dieser wird für die folgenden Berechnungen der maximal vom System bearbeitbaren Werte als Referenz herangezogen.

Für die Berechnung werden folgende Daten verwendet:

Parameter:	Formelzeichen:	Wert:	Einheit:
Erfassungszeit FIFO lesen	t_E	200	ms
Maximale Geschwindigkeit der Prüfvorrichtung (siehe Tabelle 19)	v_{max}	11,5	mm/s
Auflösung des digitalen Längenmesssystems	i	1	μm
Maximalanzahl der Werte, die pro FIFO je Erfassungszeitschritt verarbeitet werden	n_{FIFO}	16000	
Maximalanzahl der zu erfassenden Kanäle	n_K	16	

Tabelle 23: Parameter für die Berechnung der zulässigen Anzahl von Werten für die DMA-FIFO-Datenübertragung

In der Erfassungsebene am LabVIEW® Real-Time System ist die Erfassungsschleife mit 200 Millisekunden getaktet (t_E). Die maximale Erfassungsfrequenz (f_{RTmax}) ergibt sich durch die Maximalanzahl der verarbeitbaren Werte des FIFO-Spannung (n_{FIFO}) und die Erfassungsrate der getakteten Erfassungsschleife auf der Ebene von LabVIEW® Real-Time (t_E).

Die Anzahl der Werte, die pro Millisekunde am CompactRIO-System verarbeitet werden können, ergibt sich mit Formel (7) zu:

$$f_{RTmax} = \frac{n_{FIFO}}{t_E} = \frac{16000}{200} = 80 \left[\frac{\text{Werte}}{\text{ms}} \right] \quad (7)$$

Bei einer Maximalgeschwindigkeit (v_{max}) der Bewegung der Kolbenstange von 11,5mm/s ergibt sich eine Erfassungsfrequenz (f_{vmax}) bei einer Auflösung der Längenmessung von 1 μm nach Formel (8):

$$f_{vmax} = v_{max} \times i \times n_K = 11,5 \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right] \times 1000 \left[\frac{\text{Werte}}{\text{mm}} \right] \times 16 = 184000 \left[\frac{\text{Werte}}{\text{s}} \right]$$

$$f_{vmax} = 184 \left[\frac{\text{Werte}}{\text{ms}} \right] \quad (8)$$

Die berechneten Werte aus Formel (7) und Formel (8) zeigen anschaulich, dass bei einer Bewegung der Prüfvorrichtung mit der maximalen Geschwindigkeit von 11,5mm/s zu viele Daten für die Verarbeitung am CompactRIO-System produziert werden. Dieser Datenüberschuss kann unter LabVIEW® Real-Time ohne Begrenzung der Datenerfassung nicht

mehr verarbeitet werden. Der beschriebene Zustand muss unter allen Umständen verhindert werden, da eine daraus resultierende Instabilität des Systems die Steuerung der Prüfvorrichtung beeinflussen kann. Die maximal zulässige Geschwindigkeit ($v_{max,Zul}$), bei welcher eine Auflösung von $1\mu m$ noch erreicht werden kann, wird mit Formel (9) berechnet:

$$v_{max,Zul} = \frac{f_{RTmax}}{i \times n_K} = \frac{80000 \left[\frac{Werte}{s} \right]}{1000 \left[\frac{Werte}{mm} \right] \times 16} = 5 \left[\frac{mm}{s} \right] \quad (9)$$

Der berechnete Wert von $5mm/s$ würde eine Beschränkung der erreichbaren Vorschubgeschwindigkeiten der Prüfanlage bedeuten (siehe Tabelle 13). Um diese Beschränkung zu vermeiden, wird ab dem Erreichen von f_{RTmax} , automatisch auf eine zeitgesteuerte Erfassung der Messdaten umgeschaltet. Dies geschieht durch Festlegen einer zeitlichen Erfassungsrate in der weggesteuerten Erfassungsschleife auf Ebene des FPGA. Die Berechnung der zulässigen Erfassungsrate zeigt Formel (10):

$$t_{E_FPGAmx} = \frac{1}{\frac{f_{RTmax}}{n_K}} = \frac{n_K}{f_{RTmax}} = \frac{16}{80 \left[\frac{Werte}{ms} \right]} = 0.2 [ms] \quad (10)$$

Mit der laut Formel (10) berechneten Erfassungsrate wird die Begrenzung der Messdatenerfassung im weggesteuerten Zyklus durchgeführt. Das heißt, es werden programmatisch maximal 80 Werte pro Millisekunde an den FIFO übergeben. Tritt ein Materialverhalten, wie beispielsweise laut Abbildung 55 auf, so wird die Datenerfassung ab dem Erreichen von 80 Werten pro Millisekunde limitiert. Dies garantiert einen stabilen Betrieb der Prüfvorrichtung auch bei sehr dynamischen Vorgängen während einer Versuchsdurchführung. Die zusätzlich anfallenden Daten werden nicht erfasst. Für den Verwendungszweck der Prüfvorrichtung stellt diese Beschränkung aber keine Einschränkung dar (siehe Tabelle 7).

Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass die vorhin beschriebenen Eigenschaften der Messdatenerfassung einen aktuellen Stand der Entwicklung der Prüfstandssteuerung widerspiegeln. Eine Weiterentwicklung der Messdatenerfassung in Hinblick auf die Reduzierung von nicht benötigten Messkanälen und die Senkung der Erfassungsrate auf Ebene des LabVIEW® Real-Time Systems ist vorstellbar. Mögliche zukünftige Entwicklungen des MSS werden in Kapitel 6.7 noch genauer beschrieben.

Folgendes Unterkapitel beschreibt die Aufbereitung der erfassten Messdaten in einer Messdatei.

6.3.3 Die Erstellung der Messdatei am Echtzeit-System

Nach der Datenübertragung vom FPGA auf das LabVIEW® Real-Time System wird die Aufbereitung der Messdaten zur Speicherung in eine Messdatei vorgenommen. Dazu werden die Daten entsprechend dem Wunsch des Bedieners der Prüfanlage nach Messkanälen sortiert und als Messdatei im TDMS³⁰-Format abgespeichert. Das TDMS-Format ermöglicht das effiziente Dokumentieren der Messdaten. Die Dokumentation erfolgt bereits vor der Erstellung der Messdatei durch das entsprechende Festlegen und Einbinden von Meta-Daten. Damit können sowohl der Versuch, als auch die einzelnen Messkanäle mit Zusatzinformationen hinterlegt werden. Dadurch ist es möglich, dass die Bezeichnung der verwendeten Sensoren, oder die technische Einheit der erfassten Messdaten den Messkanälen direkt zugeordnet werden.

Folgende Meta-Daten können vor der Messung vom Bediener der Prüfvorrichtung festgelegt werden:

- Name der Messdatei
- Name des Bedieners der Prüfanlage
- Auswahl der zu verwendenden Messkanäle

Folgende Meta-Daten sind programmatisch hinterlegt und können vom Bediener der Prüfanlage nicht mehr verändert werden.

- Kanalname
- Einheit
- Sensorbezeichnung (wenn ein Sensor verwendet wird)

Diese Daten müssen durch eine Änderung der im Steuerungs- und Messprogramm hinterlegten Initialisierungs-Datei verändert werden. Die Initialisierungs-Datei kann nach Bedarf beliebig erweitert werden.

³⁰ TDMS: Technical Data Management Streaming

Das TDMS-Format kann, um den Zugriff auf die Messdaten durch andere Programme zu ermöglichen, in allgemeine Datenformate, wie beispielsweise ins ASCII-Format, leicht konvertiert werden. Diese Konvertierung kann beispielsweise in NI DIAdem³¹ erfolgen.

Die Abbildung 57 stellt die Einbindung von Zusatzinformationen bei der Erstellung der Messdatei dar:

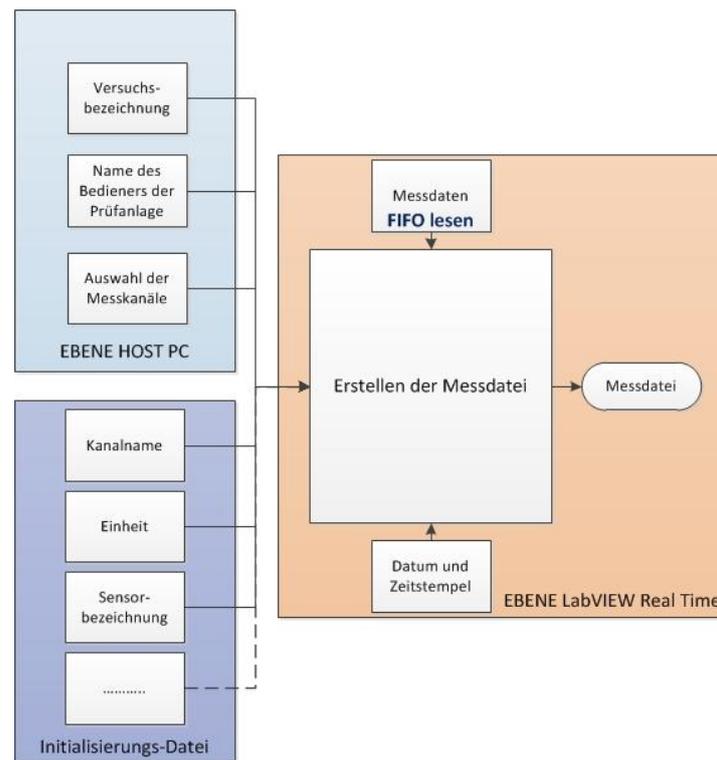


Abbildung 57: Einbinden von Zusatzinformationen bei der Erstellung der Messdatei

Die Abbildung zeigt, dass neben den Messdaten auch zusätzliche Informationen, welche die Auswertung der Versuchsdaten verbessern, beim Erstellen der Messdatei eingebunden werden können. Um das Überschreiben von Messdaten zu verhindern, werden jeder Messdatei ein Datum und ein Zeitstempel angehängt, der eine eindeutige Zuordnung der Messdateien bei gleicher Versuchsbezeichnung sicherstellt.

³¹ NI DIAdem®: Datenverwaltungs- und Datenverarbeitungssoftware von National Instruments

6.4 Die Ansteuerung der Hydraulikkomponenten und die LabVIEW® Programmierung der Betriebszustände der Prüfvorrichtung

Das CompactRIO-System führt neben der Messdatenerfassung auch sämtliche steuerungstechnischen Befehle zur Erfüllung der Anforderungen und Randbedingungen laut Kapitel 6.1 aus. Dabei kann der Prüfanlagenbediener zwischen einem manuellen und automatischen Betrieb der Prüfanlage wählen. Der automatische Betrieb der Prüfanlage wurde im Zuge der Bearbeitung dieser Diplomarbeit soweit ausgeführt, dass die Prüfanlage eine Referenzposition sowie eine Startposition selbstständig anfährt. Dies wird in Kapitel 6.4.3 beschrieben. Die Programmierung der Haltefunktion während einer Hubbewegung und das zeitgesteuerte Abbruchkriterium wurden nicht implementiert. Das nächste Unterkapitel zeigt die Anbindung der Hydraulikkomponenten an das CompactRIO-System zur Steuerung der Prüfvorrichtung. Folgend wird für die Prüfvorrichtung mit dem entwickelten Mess- und Steuerungssystem der Name PRESTO 420 (**PRE**ss for Battery **Sys**TEms and **O**thers **420**kN) verwendet.

6.4.1 Die Anbindung der Hydrauliksystemkomponenten an das CompactRIO-System

Im Gegensatz zur Inbetriebnahme der Prüfvorrichtung (siehe Kapitel 5.1) wird die Betätigung der Hydraulikkomponenten sowie die Sollwertvorgabe der stromproportionalen Ventile über die Analogausgangsmodule (siehe Tabelle 16) des CompactRIO-Systems durchgeführt. Die Spannungsversorgung für das Wegeventil sowie für die Verstärkerkarten des Stromregel- und Druckbegrenzungsventils erfolgt weiterhin über das SITOP-Versorgungsnetzteil.

Die Ausgänge des Relais-Digitalmoduls (NI 9481) ermöglichen die Betätigung des Hydraulikaggregats und des Wegeventils. Dadurch kann einerseits ein automatisiertes Ein- bzw. Ausschalten des Hydraulikaggregats und andererseits eine gesteuerte Hubbewegung des Hydraulikkolbens erfolgen.

Mit dem Spannungs-Ausgangsmodul (NI 9263) ist das genaue Ansteuern des proportionalen Stromregel- und Druckbegrenzungsventils möglich. Bei einer Auflösung des Moduls von 16bit und einem Spannungsbereich von null bis zehn Volt ergibt sich die kleinste Schrittweite (Berechnung nach Formel 1) mit 0,153mV. Damit kann sowohl der Druck, als auch die Geschwindigkeit der Prüfanlage entsprechend dieser Genauigkeit gesteuert werden.

Durch einen elektronischen Druckmessumformer, welcher im Hydrauliksystem vor dem Stromregelventil installiert ist (siehe Abbildung 36), können Informationen über den aktuellen Hydraulik-Systemdruck abgefragt werden.

Folgende Tabelle zeigt die technischen Daten des elektronischen Druckmessumformers:

Merkmal:	Daten:	Einheit:
Elektronischer Druckmessumformer	DT2V-2	
Hersteller:	HAWE Hydraulik SE	
Messbereich	0-250	bar
Überlastdruck	500	bar
Berstdruck	1200	bar
Gewählte Versorgungsspannung	24	V
Ausgangssignal	0-10	V
Genauigkeit (vom Messendwert)	±1	%

Tabelle 24: Technische Daten des Druckmessumformers

Der Druckmessumformer arbeitet nach dem Prinzip von Dehnungsmessstreifen und liefert durch eine interne Elektronik ein dem Druck proportionales Spannungssignal zwischen null und zehn Volt. Das Signal kann zur Bestimmung und Überprüfung der Druckkraft und zur Detektion der Referenzposition verwendet werden. Dies wird in Kapitel 6.4.3 näher beschrieben.

Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass im Zuge der Bearbeitung dieser Arbeit keine automatische Regelung der Druckkraft sowie der Vorschubgeschwindigkeit durchgeführt wurde. Sämtliche Geschwindigkeits- oder Druckkraftvorgaben werden durch den Bediener der Prüfanlage bzw. durch das CompactRIO-System (im Automatikbetrieb) gesteuert.

6.4.2 Die LabVIEW® Programmierung des manuellen Betriebs

Der manuelle Betrieb der Prüfanlage ermöglicht das Betreiben sämtlicher Funktionen der Prüfvorrichtung durch den Bediener. Dieser kann durch das Festlegen der Parameter des Spannungs-Ausgangsmoduls (NI 9263) die Druckkraft und die Vorschubgeschwindigkeit der Hubbewegung stufenlos steuern. Dabei wird ein Ausgangskanal (AnalogOut 0; 0-10V) für das proportionale Stromregelventil und ein Ausgangskanal (AnalogOut 1; 0-10V) für das proportionale Druckregelventil verwendet. Über boolesche Elemente erfolgt die Betätigung des Hydraulikaggregats (Relais-Modul NI 9481) sowie des Wegeventils zur Steuerung der Hubbewegung des Hydraulikkolbens.

Sämtliche Befehle des Prüfanlagenbedieners werden am Windows® Host PC eingegeben. Die Übermittlung der Daten nach LabVIEW® Real Time erfolgt, wie bereits in Kapitel 6.2 erwähnt, über Netzwerkvariablen (NWV). Die Übertragung der Netzwerkvariablen ist bidirektional ausgeführt. Das heißt, dass einerseits Befehle und Kriterien vom Host PC an das CompactRIO-System übertragen werden. Andererseits werden Informationen für den Bediener der Prüfvorrichtung, wie beispielsweise der zurückgelegte Weg oder Spannungs- und Kraftdaten, an den Host PC übergeben. Folgende Abbildung veranschaulicht die Kommunikation zwischen dem Host PC und dem CompactRIO-System:

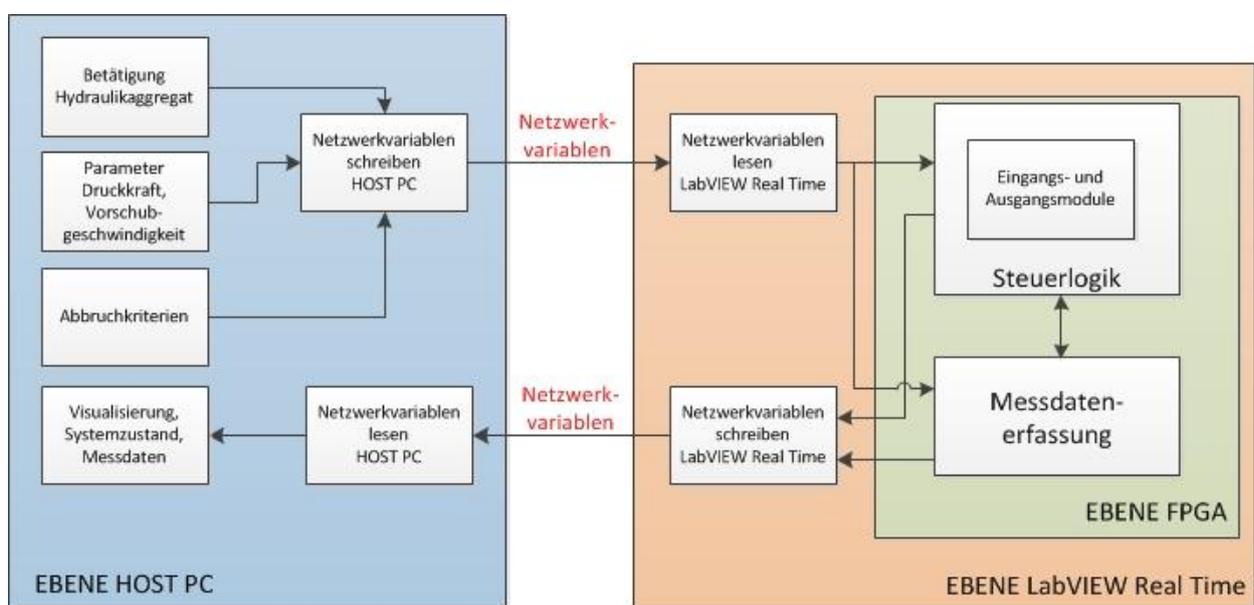


Abbildung 58: Die Datenübertragung über Netzwerkvariablen

Mit den vom LabVIEW® Real Time System übertragenen Daten erfolgt die Visualisierung von Messdaten, die Berechnung der Vorschubgeschwindigkeit sowie die Übertragung von Informationen über den Systemzustand der Prüfvorrichtung (beispielsweise: Ausfahren des Hydraulikkolbens).

Die Erfassung der Messdaten erfolgt durch das in Kapitel 6.3 beschriebene Messdatenerfassungssystem. Die Triggerung der Datenerfassung wird vom Bediener durch Aktivierung eines booleschen Elementes (Messung starten) ausgelöst. Vor dem Messstart kann ein Offset-Abgleich der Kraftmessung durchgeführt und die Wegmessung abgenullt werden. Dadurch ist ein definierter Versuchsstart gewährleistet. Nach dem Versuch wird die Messung durch deaktivieren des booleschen Elementes vom Bediener wieder beendet.

6.4.3 Die LabVIEW® Programmierung des automatischen Betriebs

Der erste Schritt in Hinblick auf den automatisierten Betrieb der Prüfvorrichtung nach Kapitel 6.1 wird durch das Anfahren einer Referenzposition und einer Startposition durchgeführt. Als Referenzposition wird der untere Totpunkt des Hydraulikzylinders definiert. Beim Erreichen der Referenzposition fällt der Druck in der Zulaufleitung des Hydrauliksystems ab. Dieser Druckabfall wird durch den elektronischen Druckmessumformer (siehe Abbildung 36) detektiert. Der Bediener der Prüfvorrichtung kann durch Betätigen eines booleschen Elements das Anfahren der festgelegten Referenzposition aktivieren. Aus sicherheitstechnischen Gründen muss das Anfahren nochmals bestätigt werden. So wird ein ungewolltes Drücken des Schalters ausgeschlossen. Das Erreichen der Referenzposition wird durch eine Visualisierung (leuchtende LED-Anzeige) am Host PC dargestellt. Erst wenn die Referenzposition erreicht ist, kann eine vom Bediener wählbare Startposition automatisch angefahren werden. Das Festlegen der gewünschten Startposition erfolgt durch eine Werteingabe auf der Bedienoberfläche des Host PCs durch den Anlagenbediener. Durch Drücken eines weiteren Betätigungselementes (Startposition anfahren) wird das automatisierte Anfahren der Position gestartet. Folgende Abbildung zeigt den programmatischen Aufbau des automatisierten Betriebs der Prüfvorrichtung.

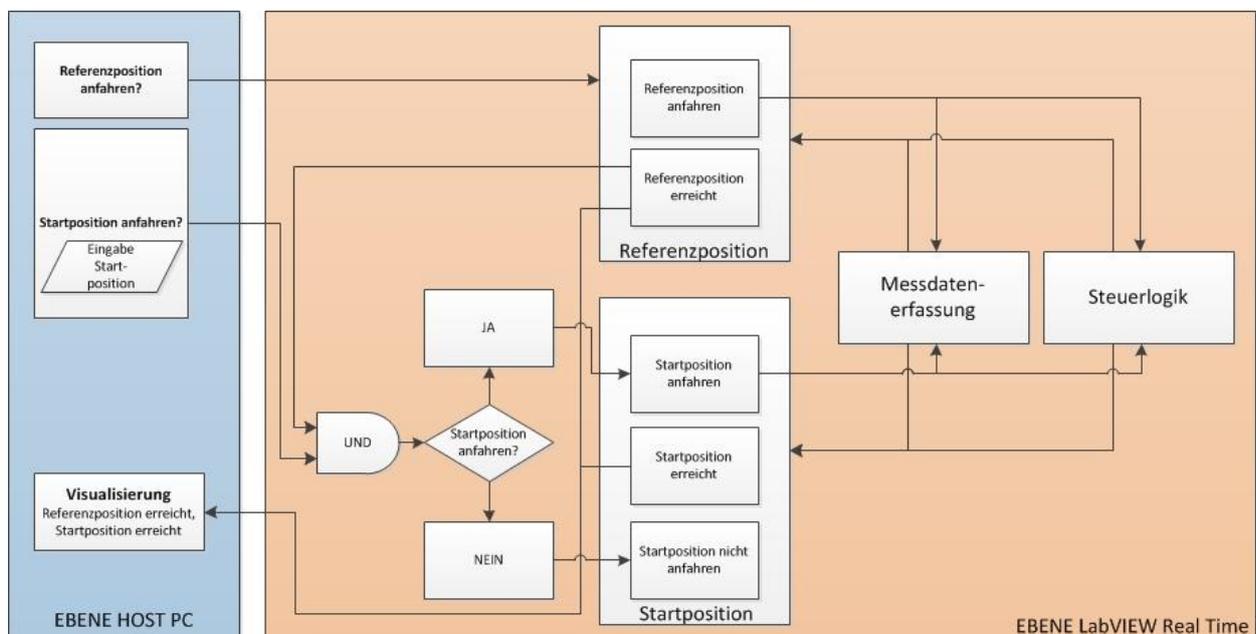


Abbildung 59: Der Programmablauf des Automatikbetriebs

Zur Überprüfung des Erreichens der Referenz- bzw. die Startposition wird, wie beim entwickelten Messdatenerfassungssystem, die Interaktion zwischen den Systemkomponenten genutzt. Wird beispielsweise das Anfahren der Referenzposition gestartet, erfolgt eine automatisierte Betätigung der Hydraulikkomponenten (Hydraulikaggregat, Strom- und Druckregelventil, Wegeventil). Gleichzeitig wird über die Messdatenerfassung das Spannungssignal des elektronischen Druckmessumformers erfasst. Bei einem definierten Abfall des Spannungssignals ist die Referenzposition erreicht. Danach wird die Betätigung der Hydraulikkomponenten beendet und ein Nullabgleich des Wegmesssystems durchgeführt. Damit ist das System für das Anfahren einer Startposition bereit und visualisiert dem Bediener über eine LED-Anzeige den aktuellen Status (Referenzposition erreicht).

Gibt der Bediener eine Startposition vor und aktiviert den Betätigungsschalter, erfolgt das automatisierte Anfahren der gewünschten Position. Dabei wird, analog zur Anfahrt der Referenzposition, das Hydraulikaggregat, das Wegeventil und das proportional Strom- und Druckregelventil automatisch betätigt. Durch eine Überprüfung des Wegmesssignals wird die aktuelle Position der unteren Aufnahmeplatte während der Vorschubbewegung abgefragt. Bei einer Differenz von unter 20mm zur angegebenen Startposition wird die Vorschubgeschwindigkeit auf 1mm/s reduziert, um die Genauigkeit des Erreichens der Endposition zu erhöhen.

Durch diese Automatisierung erhöht sich die Reproduzierbarkeit der Versuche, da vor dem Versuchsstart ein konstanter Abstand zum Prüfobjekt eingehalten wird. Außerdem kann diese Konfiguration als Grundlage für eine Erweiterung hinsichtlich der kompletten Automatisierung von Versuchsabläufen an EES (siehe Abbildung 47), verwendet werden.

6.4.4 Die programmatische Umsetzung der gewählten Abbruchkriterien

Durch die Vorgabe von genau definierten Abbruchkriterien (siehe Kapitel 6.1) wird eine hohe Reproduzierbarkeit der Versuche ermöglicht. Vor der Versuchsdurchführung kann der Bediener der Prüfvorrichtung die gewünschten Abbruchkriterien festlegen. Folgende Kriterien wurden umgesetzt:

- Abbruchkriterium Kraft
- Abbruchkriterium Weg

Beim Erreichen des gewünschten Kraft- oder Wegwertes stoppt die Prüfvorrichtung automatisch. Die folgenden Abbildungen zeigen Kraft-Weg Kurven von durchgeführten Versuchen, bei welchen auch die Funktionsüberprüfung beider Abbruchkriterien erfolgte.

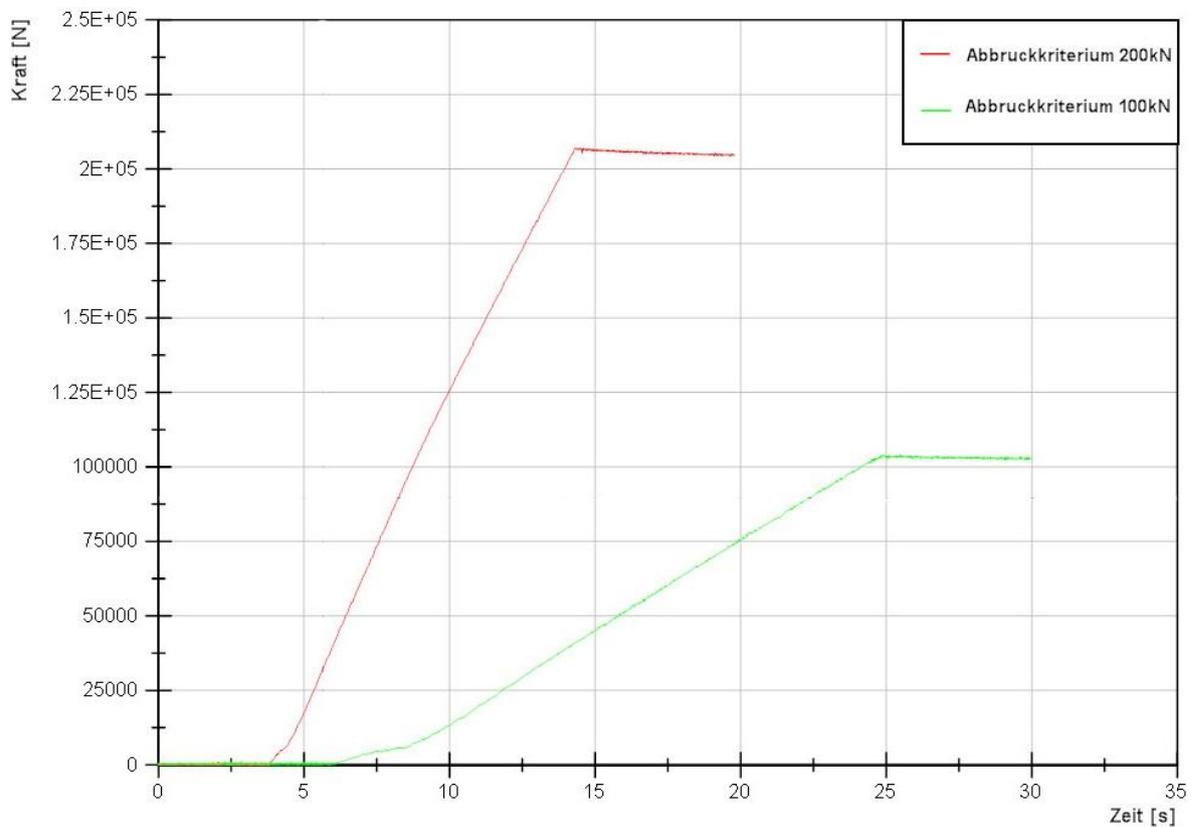


Abbildung 60: Funktionsüberprüfung: Abbruchkriterium Kraft

Die in Abbildung 60 dargestellten Kurven zeigen, dass bei Erreichen des vorgegebenen Kraftwertes die Prüfvorrichtung die Vorschubbewegung automatisch stoppt und somit kein Anstieg des Kraftniveaus mehr erfolgt. Die Überprüfung des kraftabhängigen Abbruchkriteriums wurde an massiven Aluminiumblöcken durchgeführt. Der Aluminiumblock lässt quasi keine Verformungen während der Versuchsdurchführung zu, weshalb bis zum Erreichen des definierten Abbruchkriteriums nahezu kein Weg zurückgelegt wird. Dies stellt den schlimmsten Fall zur Erfüllung des Abbruchkriteriums bei der Versuchsdurchführung dar, weil bis zum Erreichen des Kraftabbruchniveaus nur wenige Versuchsdaten zur Verfügung stehen. Für den Vergleich des aktuellen Kraftwertes und des definierten Abbruchkriteriums der Kraftmessung werden diese Versuchsdaten verwendet. Bei den in Abbildung 60 dargestellten Kurven wurde vom Beginn des Kraftanstieges bis zum Erreichen des Abbruchkriteriums lediglich ein Weg von etwa 0,15 Millimetern zurückgelegt. Folgende Abbildung stellt diesen

geringen zurückgelegten Weg bei der Überprüfung der Funktion des Abbruchkriteriums von 100kN anschaulich dar.

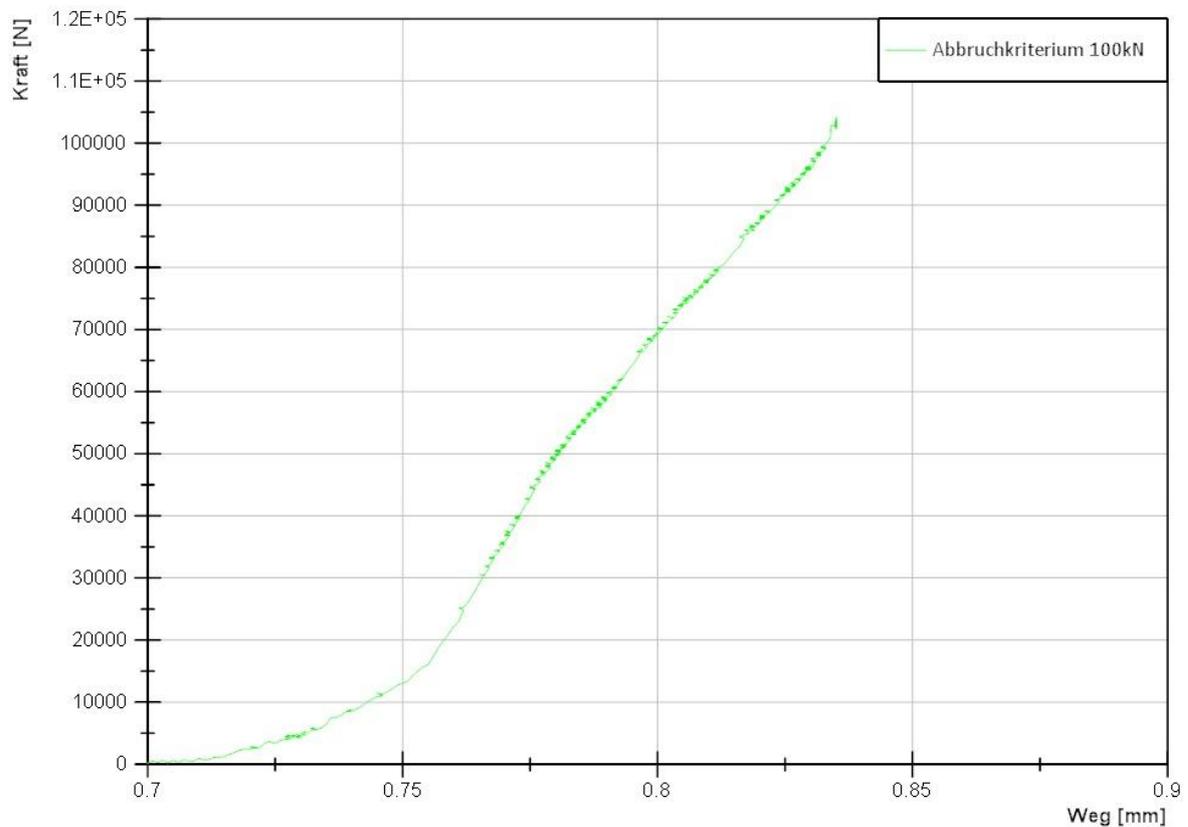


Abbildung 61: Kraft-Weg Kurve bei der Überprüfung des Kraft-Abbruchkriteriums 100kN

In Abbildung 61 ist der Beginn des Kraftanstiegs ab einem zurückgelegten Weg von 0,7 Millimetern gut zu erkennen. Bis zum Stillstand der Prüfvorrichtung bei Erreichen des Abbruchkriteriums wurde, wie bereits erwähnt, ein Weg von 0,15 Millimetern zurückgelegt. Bei einer Auflösung des digitalen Längenmesssystems von $1\mu\text{m}$ ergeben sich somit 150 Werte, welche für einen Soll- und Ist-Wert Vergleich des aktuellen Kraftwertes mit dem Wert des gewählten Abbruchkriteriums von 100 Kilonewton zur Verfügung stehen. Trotzdem tritt nur eine geringe Überschreitung des jeweiligen definierten Kraft-Abbruchkriteriums auf. Dies zeigt die hohe Schnelligkeit der Datenverarbeitung des Mess- und Steuerungssystems durch die Verwendung des FPGA. Dadurch wird eine genaue Einhaltung des Kraft-Abbruchkriteriums auch bei einem Drückversuch an einem quasi nicht deformierbaren Aluminiumblock ermöglicht.

Folgende Abbildung 62 zeigt Versuchskurven bei der Überprüfung des wegabhängigen Abbruchkriteriums.

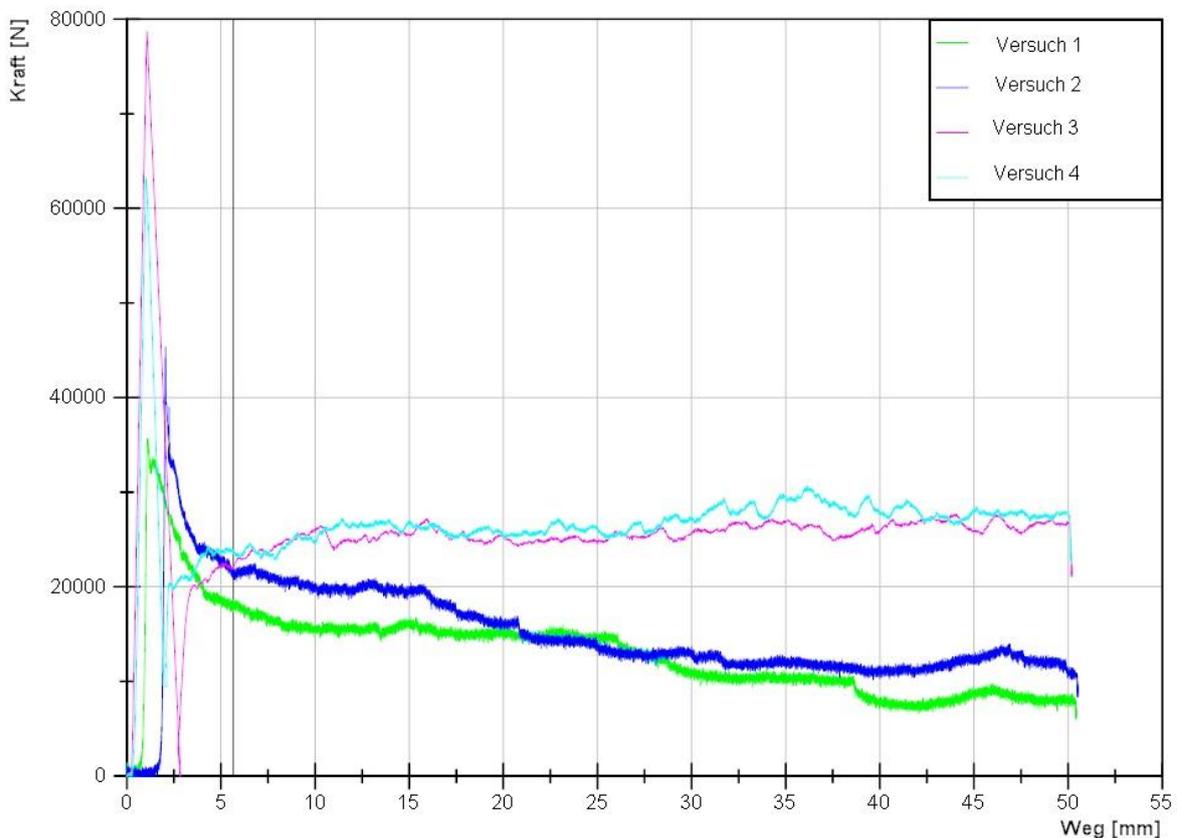


Abbildung 62: Funktionsüberprüfung: Abbruchkriterium Weg

Abbildung 62 zeigt vier durchgeführte Versuche an unterschiedlichen Versuchskörpern, mit einem Wegabbruchkriterium von 50mm. Das Diagramm zeigt die gute Reproduzierbarkeit beim Erreichen der Abbruchbedingung. Alle, in Abbildung 62 dargestellten Versuche wurden mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 1 mm/s durchgeführt. Bei dieser Geschwindigkeit ergab sich eine Streuung der Endposition der Prüfanlage von unter 0,5mm. Bei der maximalen Geschwindigkeit der Prüfanlage ergibt sich eine Abweichung vom gewünschten Abbruchkriterium von rund fünf Millimetern. Dies stellt jedoch für die Versuchsdurchführung keine Einschränkung dar, da der Versuch bis zum Erreichen des Abbruchkriteriums mit einer möglichst konstanten Vorschubgeschwindigkeit durchgeführt werden soll.

6.4.5 Die programmatische Umsetzung des Sicherheitskonzepts

Um einen ausreichenden Arbeitsschutz für das Versuchspersonal während des Betriebs der PRESTO 420 zu erreichen, wurden sowohl softwaretechnisch als auch hardwareseitig Vorkehrungen getroffen. Für den manuellen Betrieb der Prüfvorrichtung wurde ein in der

Steuerungssoftware implementierter Not-Aus Schalter definiert. Durch diesen Not-Aus Schalter kann, im Falle einer nicht gewünschten Reaktion der Prüfvorrichtung oder der Notwendigkeit des sofortigen Betriebsstopps der Anlage, die Ausführung der MSS sofort beendet werden. Dabei wird das Echtzeit-System gestoppt, das Aggregat ausgeschaltet und alle Ausgangsparameter der Mess- und Steuerungsmodule sofort deaktiviert. Dieser Not-Aus Schalter steht dem Bedienpersonal auch im automatischen Betrieb zur Verfügung. Neben der Betätigung des Not-Aus Schalters wurde die Bedienung der Prüfvorrichtung selbst möglichst sicher für den Bediener der Prüfvorrichtung ausgeführt. Die Betätigung der Hubbewegung im manuellen Betrieb erfolgt, wie bereits erwähnt, durch boolesche Elemente. Das betätigte Bedienelement muss während der Hubbewegung im manuellen Betrieb ständig durch den Bediener gedrückt werden. Wird das Element vom Anlagenbediener losgelassen, wird die Hubbewegung sofort gestoppt. Somit kann die Gefahr einer Quetschverletzung für den Anlagenbediener minimiert werden.

Da auch ein Ausfall des Windows® Host PCs nicht ausgeschlossen werden kann, ist auch ein hardwareseitiger Not-Aus Schalter zur Unterbrechung der Stromzufuhr der Prüfvorrichtung, vorgesehen worden. Dadurch kann die Prüfvorrichtung auch hardwareseitig sofort gestoppt werden.

6.5 Vergleich der Datenerfassung des entwickelten Messdatenerfassungssystems und der Kayser Threde MINIDAU®

Nach der Entwicklung der Mess- und Steuerungssoftware wurde, um einen Vergleich zum durchgeführten Inbetriebnahmeversuch (siehe Kapitel 5.2) zu ermöglichen, ein weiterer Knicktest an einer Lithium-Polymerbatterie durchgeführt. Die Versuchsanordnung sowie die Randbedingungen wurden ident zum Inbetriebnahmeversuch festgelegt, um einen optimalen Vergleich der Messdatenerfassung zu ermöglichen. Für die Kraftmessung wurde derselbe kalibrierte Einachs-Kraftaufnehmer mit einem Messbereich von fünf Kilonewton (siehe Tabelle 14) verwendet. Anstelle des beim Inbetriebnahmeversuch verwendeten Seilpotentiometers und des Kayser Threde MINIDAU® Messsystems kam das entwickelte Mess- und Steuerungssystem inklusive dem digitalen Längenmesssystem zum Einsatz.

Das folgende Kraft-Weg Diagramm zeigt die Gegenüberstellung der erfassten Messdaten beider Systeme.

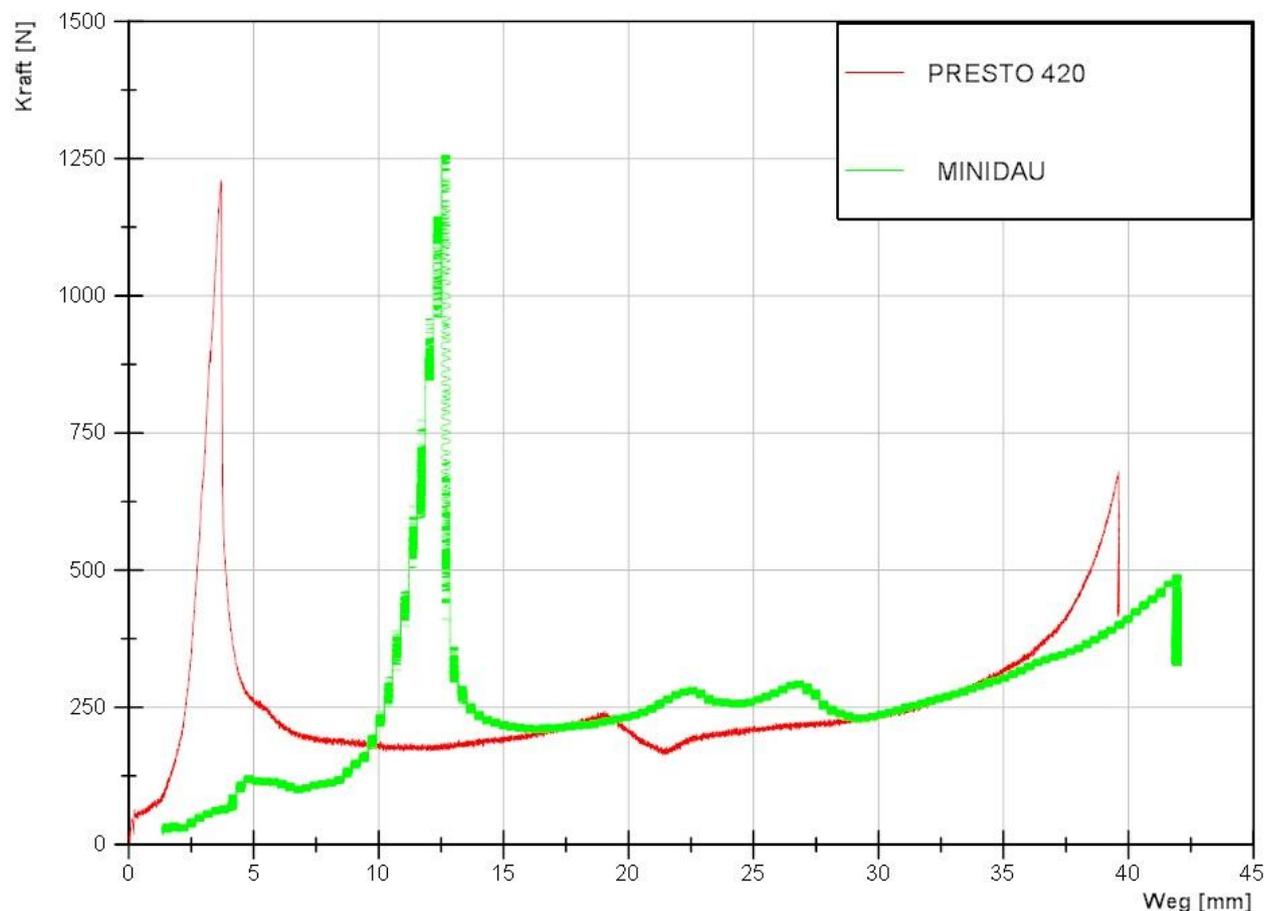


Abbildung 63: Vergleich der Messsysteme: PRESTO420 und Kayser Threde MINIDAU®

Beide in Abbildung 63 dargestellten Versuchskurven sind nicht geglättet dargestellt. Gut erkennbar ist einerseits, dass die Triggerung des entwickelten Messdatenerfassungssystems sämtliche Daten erfasst und nicht auf ein externes Triggersignal (beispielsweise wegabhängig) warten muss. Andererseits ist ein weiterer Vorteil des Mess- und Steuerungssystems der PRESTO420 die Kombination zwischen weg- und zeitaufgelöster Datenerfassung. Beim MINIDAU® System ist durch die geringere Auflösung des Messsystems und die zeitgesteuerte Erfassung der Weg- und Kraftdaten ein deutliches Rauschen der Messdaten erkennbar. Ein weiterer Vorteil der entwickelten PRESTO 420 ist die Möglichkeit der Interaktion zwischen Messdatenerfassung und Steuerlogik des CompactRIO-Systems. Dadurch können definierte Abbruchkriterien realisiert werden. In Abbildung 63 wurde ein Deformationsweg von 39 Millimeter als Abbruchkriterium festgelegt. Beim MINIDAU® System kann nur ein extern ausgelöstes Signal (beispielsweise ein Endschalter oder das manuelle Loslassen des

Betätigungsschalters) die Prüfvorrichtung stoppen. Dies ist in Hinblick auf die Flexibilität der Versuchsdurchführung aber nicht optimal, da bei jeder Änderung des Abbruchkriteriums der Endschalter neu positioniert werden müsste. Weiters kann mit dem entwickelten Mess- und Steuerungssystem auch ein druckkraftabhängiges Abbruchkriterium durch das Signal der Kraftmessaufnahme oder des elektronischen Druckmessumformers realisiert werden. Dies ist beim MINIDAU® System nicht möglich, da keine Triggerausgabe abhängig von den erfassten Messdaten möglich ist. Folgende Tabelle 25 zeigt eine Gegenüberstellung der beiden Messsysteme in Hinblick auf die erreichbare Auflösung bei der Datenerfassung von Kraft- Weg- und Spannungsdaten:

Vergleichsdaten:	Kayser Threde MINIDAU®	PRESTO 420
Kraftmessung:	12 bit	24 bit
Wegmessung	12 bit	0.001 mm
Spannungsmessung	12 bit	16 bit

Tabelle 25: Vergleich der erreichbaren Auflösungen der Messsysteme Kayser Threde MINIDAU® und PRESTO 420

Die Tabelle 25 verdeutlicht die höhere Auflösbarkeit der zu erfassenden Messdaten durch die entwickelte PRESTO 420.

6.6 Auszug durchgeführter Versuche mit der entwickelten Prüfumgebung PRESTO 420:

Nach der Fertigstellung der PRESTO 420 wurden zur Überprüfung der einwandfreien Funktionsfähigkeit der Prüfumgebung weitere Versuche durchgeführt. Dabei wurde das Werkstoffverhalten von Leichtbetonprobekörpern und kohle- und glasfaserverstärkten Stauchrohren unter quasi-statischer Belastung überprüft. Obwohl dabei keine EES getestet wurden, konnte vor allem die Funktion der Begrenzung der weggesteuerten Datenerfassung überprüft werden, da beide Werkstoffe ein sprödes Materialverhalten mit plötzlichem Versagen aufweisen. Die in diesem Kapitel dargestellten Versuchskurven wurden mit unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeiten von 0.5 bis 1.5 mm/s durchgeführt. Bei allen Versuchen wurde die Kraftmessung mit kalibrierten Einachs-Kraftaufnehmern durchgeführt. Die folgende Abbildung zeigt Kraft-Weg Kurven von durchgeführten Versuchen an Leichtbetonproben.

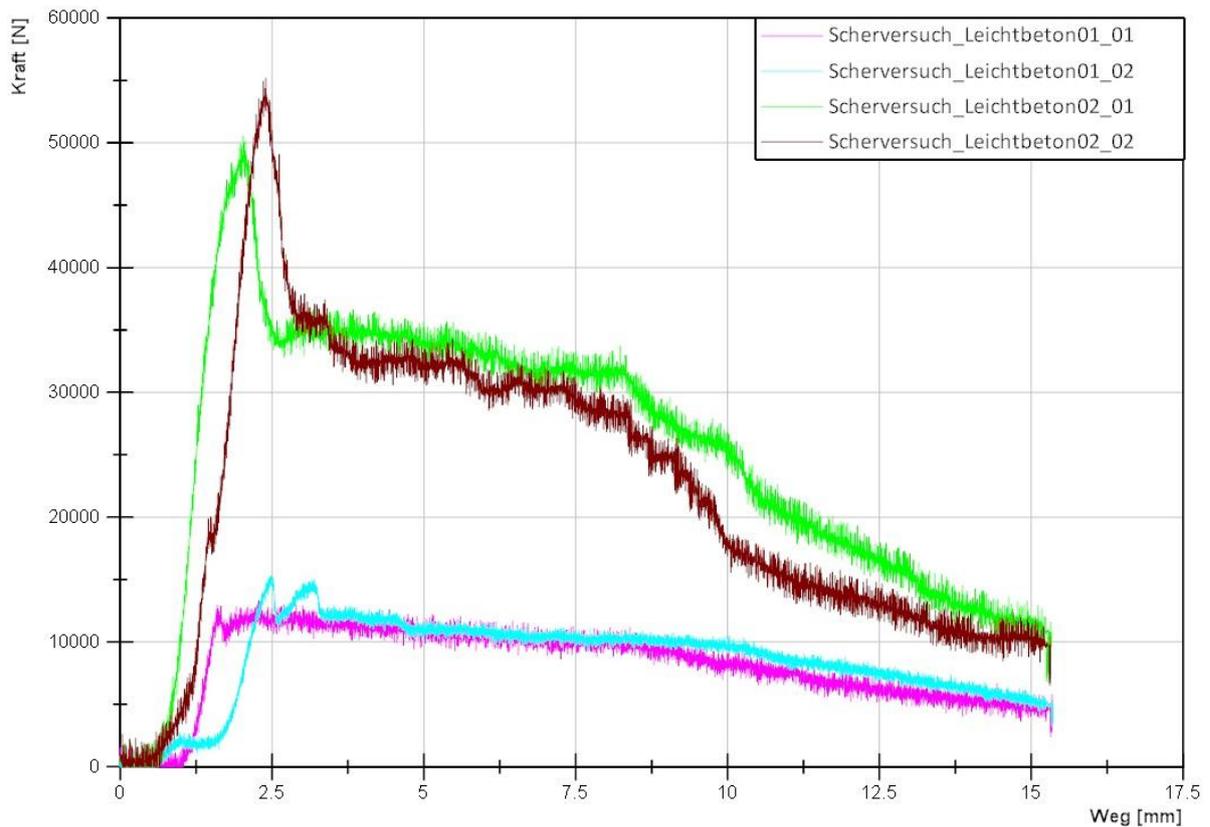


Abbildung 64: Kraft-Weg Kurven von Scherversuchen an Leichtbetonproben

Die in Abbildung 64 dargestellten Kraft-Weg Kurven zeigen, dass mit der entwickelten Prüfvorrichtung Versuche mit hoher Reproduzierbarkeit durchgeführt werden können. Die Kurven sind nicht gefiltert dargestellt. Gut zu erkennen ist, dass das gewählte Abbruchkriterium von 15 Millimetern sehr genau eingehalten wird. Trotz des plötzlichen Materialversagens kam es bei keinem Versuch zu einer Beeinträchtigung der Systemperformance oder einem „Absturz“ des CompactRIO-Systems. Dies zeigt, dass die notwendige Begrenzung der weggesteuerten Datenerfassung wie erwartet funktioniert.

Die nächste Abbildung zeigt Versuchsergebnisse an Stauchrohren, welche mit der entwickelten Prüfumgebung PRESTO 420 erfasst wurden.

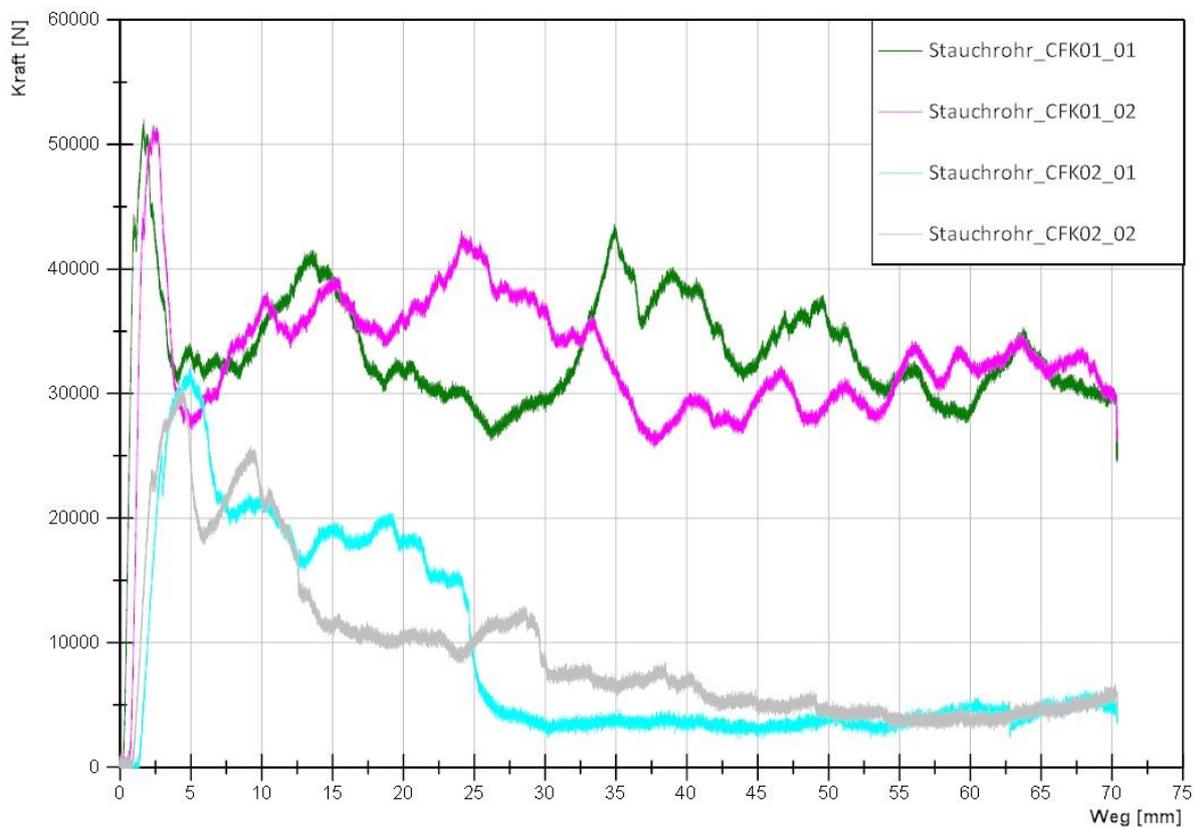


Abbildung 65: Kraft-Weg Kurven von Stauchversuchen an CFK-Formrohren

Die Abbildung 65 zeigt, dass mit der entwickelten Prüfumgebung das definierte Anfahren einer Startposition mit einer hohen Wiederholgenauigkeit durchgeführt werden kann. Ebenfalls ist, wie bereits in Abbildung 64 gezeigt wurde, die hohe Reproduzierbarkeit der einzelnen Versuche und die Erfüllung des wegabhängigen Abbruchkriteriums zu erkennen.

Die Abbildung 64 und Abbildung 65 zeigen, dass mit der entwickelten Prüfumgebung PRESTO 420 das Durchführen von quasi-statischen mechanischen Versuchen präzise und mit einer hohen Wiederholgenauigkeit erfolgen kann. Neben Versuchen an lithiumbasierenden Batterien (siehe Kapitel 6.5) wurde auch gezeigt, dass die Prüfumgebung auch für alternative quasi-statische Versuche an anderen Versuchsobjekten sehr gut geeignet ist.

6.7 Ausblick auf die weitere Entwicklung des Mess- und Steuerungssystems

Im Zuge der durchgeführten Diplomarbeit wurde ein Mess- und Steuerungssystem entwickelt, welches besonders für die Generierung von Validierungsdaten für prognosefähige Simulationsmodelle geeignet ist. Dabei wurde die Anbindung der Hydraulikkomponenten an das CompactRIO-System sowie die Messdatenerfassung der Kraft-, Spannung- und Wegmessung durchgeführt. Eine Erfassung von Temperaturdaten wurde während der Bearbeitung der Diplomarbeit nicht realisiert. Dies kann jedoch durch die modulare Programmierung des Systems zukünftig einfach erweitert werden. Die Temperaturmessung kann durch die Einbindung eines weiteren Messmoduls, beispielsweise eines Thermoelement-Eingangsmoduls (NI 9213), erfolgen.

Zur Senkung der großen anfallenden Datenmenge bei dynamischen Vorgängen und höheren Vorschubgeschwindigkeiten während der weggesteuerten Datenerfassung ist eine Separierung der zu erfassenden Messkanäle denkbar. Derzeit werden alle Messkanäle ständig abgetastet. Besonders beim Erfassen der Eingänge des 16-Kanal Spannungseingangsmoduls kommt das CompactRIO-System dabei an seine Systemleistungsgrenze. Dadurch muss eine zeitliche Begrenzung der Erfassungsschleife am FPGA bei der weggesteuerten Datenerfassung erfolgen. Durch eine vom Anlagenbediener steuerbare Anzahl der zu erfassenden Kanäle könnte die Datenerfassung bis zur maximalen Geschwindigkeit von 11.5mm/s auch ohne Begrenzung der Erfassungsschleife arbeiten.

Zur Erfüllung des gewünschten Versuchsablaufs nach Kapitel 6.1, sind nur noch die Anforderungen der Haltefunktion der Prüfvorrichtung mit einem zeitbezogenen Abbruchkriterium zu implementieren, was jedoch durch den modularen Aufbau der Steuer-Logik einfach erfolgen kann. Durch die Möglichkeit des Anfahrens einer definierten Startposition und der funktionsfähigen weg- und kraftabhängigen Abbruchkriterien wird bereits eine hohe Reproduzierbarkeit der Versuche erreicht. Eine entsprechende Regelung der Vorschubgeschwindigkeit und Druckkraft während der Hubbewegung würde die Reproduzierbarkeit der Versuchsdurchführung noch weiter erhöhen.

Bei einer Erweiterung der MSS in Richtung eines vollständigen automatisierten Betriebs der Prüfvorrichtung, muss auch eine Erweiterung der Sicherheitsvorkehrungen für das Bedienpersonal erfolgen, um die Gefahr von Arbeitsunfällen zu minimieren. Hier ist

beispielsweise der Einsatz von Lichtschranken zur Verhinderung des Zugangs zur Prüfvorrichtung während der Versuchsdurchführung denkbar.

7 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Entwicklung einer Prüfumgebung zur Durchführung von mechanischen Belastungstests im quasi-statischen Belastungsfall an lithiumbasierenden Batterien.

Das primäre Ziel, die Unterstützung der Entwicklung eines prognosefähigen Finite-Elemente Rechenmodells einer Lithium-Polymer Batterie, konnte mit größter Zufriedenheit erreicht werden. Die Unterstützung besteht im Bereitstellen von Messdaten aus quasi-statischen mechanischen Versuchen an Batteriezellen zur Validierung der Simulationsergebnisse. Durch die langsame Vorschubgeschwindigkeit gekoppelt mit dem entwickelten Mess- und Steuerungssystem ist das Erkennen von möglichen Kurzschlüssen bei quasi-statischer mechanischer Belastung von Batterien sehr genau möglich und kann somit optimal in die Simulation integriert werden.

Sekundär ist die Prüfvorrichtung auch für alternative quasi-statische mechanische Versuche wie beispielsweise Verbundwerkstoffe und für genormte mechanische Versuche an Batterien anwendbar. Jedoch ist auf Grund der Auslegung der Hydraulikkomponenten auf quasi-statische Belastungsfälle nicht jede, in den bestehenden Prüfnormen und Richtlinien für elektrische Energiespeicher anzufindende Vorschubgeschwindigkeit erreichbar.

Die durchgeführten Versuche an ungeladenen und geladenen Lithium-Polymer Batteriezellen zeigten, dass bei mechanischen Versuchen eine sichere Prüfumgebung unbedingt notwendig ist und Schutzmaßnahmen für das Bedienpersonal, die Prüfvorrichtung und die umliegende Infrastruktur erforderlich sind. Besonders Intrusionen von Fremdkörpern in geladene Batteriezellen resultierten in sehr aggressiven Reaktionen. Dabei sind vor allem die Brand- und Explosionsgefahr sowie der Austritt von heißen Bestandteilen wie Gasen, Elektrolyt und Partikeln aus den Batteriezellen als größte Gefahren zu sehen.

Durch das entwickelte Mess- und Steuerungssystem ist die Betätigung der Prüfvorrichtung aus sicherer Entfernung beziehungsweise aus einem eigenen Bedienraum möglich. Des Weiteren ist durch die Möglichkeit des automatisierten Anfahrens einer Referenz- und Startposition eine hohe Reproduzierbarkeit der durchzuführenden Versuche garantiert. Besonders das entwickelte Datenerfassungssystem ist speziell auf die Ermittlung von Kraft-Weg Kurven ausgelegt. Dies wird durch eine Kombination aus weg- und zeitgesteuerter Datenerfassung mit

einer Interaktion zur Steuer-Logik erreicht. Durch die hohe Auflösung der verwendeten Messmodule sowie die Genauigkeit der verfügbaren Sensoren können aussagekräftige Messdaten erfasst werden. Zur Erkennung von schleichenden Kurzschlüssen wird die Echtzeitfähigkeit des Mess- und Steuerungssystems genutzt. Die einwandfreie Funktion der entwickelten Prüfumgebung konnte durch Versuche an Lithium-Polymerzellen und Verbundwerkstoffen mit unterschiedlichem Materialverhalten belegt werden.

8 Ausblick

Der zunehmende Anteil von Hybrid- und Elektrofahrzeugen im Straßenverkehr, welche Lithium-Ionen Batterien als Energiespeicher verwenden, macht die crashsichere Untersuchung solcher Fahrzeuge notwendig. Dabei ist unter anderem von Interesse, welche mechanische Belastung eine verbaute Lithium-Ionen Batterie bis zum Eintreten eines Kurzschlusses ertragen kann.

Die entwickelte Prüfumgebung stellt eine Möglichkeit dar, um quasi-statische mechanische Untersuchungen an Batteriezellen und Batteriemodulen durchzuführen. Bei der Bearbeitung der Diplomarbeit wurden Versuche an Einzelzellen durchgeführt. In Zukunft sind Tests auch an Batteriemodulen durchzuführen, um Erkenntnisse im Large-Scale Bereich zu sammeln. Auch eine Erweiterung der Prüfvorrichtung für höhere Vorschubgeschwindigkeiten durch Adaption der Hydraulikkomponenten ist denkbar. Für durchzuführende Zugversuche muss eine Erweiterung der Hydraulikkomponenten durch ein Stromregelventil für den Ölrücklauf durchgeführt werden, um die Steuerung der Rückhubgeschwindigkeit des Hydraulikkolbens zu ermöglichen. Neben dem manuellen Betrieb der Prüfvorrichtung ist die Erweiterung in Richtung eines vollständigen automatisierten Prüfablaufes durchzuführen. Dadurch kann einerseits die Reproduzierbarkeit der Versuche, andererseits auch die Sicherheit des Bedienpersonals erhöht werden. Eine weitere Erhöhung der Reproduzierbarkeit kann durch eine Regelung der Vorschubgeschwindigkeit sowie der Druckkraft während der Hubbewegung der Prüfvorrichtung erfolgen. Zur Vermeidung von Arbeitsunfällen muss bei einer Automatisierung des Bewegungsablaufs der Prüfvorrichtung auch eine Erweiterung der Sicherheitsvorkehrungen zum Schutz des Bedienpersonals vorgenommen werden.

Beim Prüfen von Batteriemodulen kommen neben der möglichen erhöhten Brand- und Explosionsgefahr zunehmend die elektrischen Gefahren zum Tragen. Hier ist eine Untersuchung zum Schutz vor Hoch-Volt Spannungen notwendig. Auch der Schutz des Bedienpersonals ist in Hinblick auf diese elektrischen Gefahren zu erweitern, da ein Berühren von Bauteilen welche unter Hoch-Volt Spannungen stehen, unter allen Umständen zu vermeiden ist.

9 Literaturverzeichnis

Amita Technologies Inc. <http://www.amitatech.com/product-Li-Polymer.htm>. [Online] [Zitat vom: 21. 03 2012.] <http://www.amitatech.com/product-Li-Polymer.htm>.

BATSO. 2011. *Manual for Evaluation of Energy Systems for Light Electric Vehicle (LEV) - Secondary Lithium Batteries.* s.l. : Battery Safety Organisation, 2011.

Breitfuß, Christoph. 2010. *Fahrzeugsicherheit von Elektrobussen - Analyse der Crashesicherheit und der Implementierung einer Lithium-Ionen-Polymer-Batterie.* Graz : Technische Universität Graz, 2010.

Chevrolet, Volt. Chevrolet Volt Suisse. [Online] [Zitat vom: 12. 04 2012.] <http://www.chevrolet-volt.ch/technologie/technische-daten.html>.

Conte, Fiorentino Valerio. 2009. Sicherheitsrelevantes Design von Lithium-Ionen-Batterien. *ATZechnik.* 2009, 01/2009.

David Linden, Thomas B. Reddy et.al. 2001. *Handbook of Batteries - Third Edition.* s.l. : Mcgraw-Hill Professional, 2001.

Doughty, Daniel H. und Crafts, Chris C. 2006. *FreedomCAR Electric Energy Storage System Abuse Test Manual for Electric and Hybrid Electric Vehicle Applications.* Albuquerque : Sandia National Laboratories, 2006.

Groiß, René und Jossen, Andreas. *Sicherheitsaspekte beim Testen von Lithium-Ionen Batterien.* Öllingen : BaSyTec GmbH.

Hybrid-Autos.info. www.hybrid-autos.info. [Online] [Zitat vom: 20. 04 2012.] <http://www.hybrid-autos.info/Elektro-Fahrzeuge/Renault/renault-kangoo-be-bop-ze.html>.

Kassatly, Sherif. 2010. *The Lithium-Ion Battery Industry For Electric Vehicles.* Massachusetts : Massachusetts Institute of Technology, 2010.

Lichtenegger, Bernhard. 2012. *Entwicklung eines Finite Elemente Modells zur Untersuchung der mechanischen Eigenschaften von lithiumbasierenden Batterien.* Graz : Technische Universität Graz, 2012.

Lucien F.Trueb, Paul Rüetschi. 1997. *Batterien und Akkumulatoren - Mobile Energiequellen für heute und morgen .* Berlin : Springer Berlin Heidelberg, 1997.

Moosbauer, Dominik Johann. 2010. *Elektrochemische Charakterisierung von Elektrolyten und Elektroden für Lithium-Ionen Batterien - Entwicklung einer neuen Messmethode für elektrochemische Untersuchungen an Elektroden mit der EQCM.* Regensburg : Universität Regensburg, Fakultät für Chemie und Pharmazie, 2010.

National Instruments Cooperation. 2011. *Design, Entwicklung und Programmierung von FPGAs.* s.l. : National Instruments Cooperation, 2011.

National Instruments Cooperation, 2012. <http://austria.ni.com/>. [Online] [Zitat vom: 30. 04 2012.] <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/8828>.

Pasquarette, John. 2010. *Advantages of FPGA Based System Design - Virtuelle Instrumente in der Praxis.* s.l. : National Instruments Cooperation, 2010.

Roth, Peter E., et al. 2004. *Advanced Technology Development Program for Lithium-Ion Batteries: Thermal Abuse Performance of 18650 Li-Ion Cells.* Albuquerque : Sandia National Laboratories, 2004.

Schaub, Norbert. 2010. *SafetyUpdate 2010 - Testing.* Aschaffenburg : Carhs Training GmbH & Prof. Norbert Schaub, 2010.

Schwertle, Timo. 2009. *Elektromobilität Strukturelle Betrachtungen zukünftiger Energienutzung.* Köln : Köln Internatinal School of Design, 2009.

Sinz, Wolfgang, et al. 2012. *Concepts for Mechanical Abuse Testing of High-Voltage Batteries.* Graz : SAE International, 2012.

Teslamotors. www.Teslamotors.com. [Online] [Zitat vom: 15. 04 2012.] http://www.teslamotors.com/de_DE/roadster/technology/battery.

Wakefield, Ernest Henry. 1993. *History of the Electric Automobile.* s.l. : SAE International, 1993.

Wierzbicki T., Sahraei E., Hill R. 2010. *Modeling of Lithium-ion Prismatic Batteries for Mechanical Integrity: Experiments, Calibration, and Validation.* Impact and Crashworthiness Lab, Massachusetts Institute of Technology : Massachusetts Institute of Technology, 2010.

Zinniker, Rolf. 2001. *Batterien und Akkus - Elektrochemische Beschreibung.* Zürich : ETH Zürich, 2001.

10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Eines der ersten Elektrofahrzeuge der Welt (Wakefield, 1993).....	1
Abbildung 2: Aufbau eines Lithium-Ionen Akkumulators beim Entladen (Conte, 2009).....	6
Abbildung 3: Elektronen- und Ionenbewegung in einem elektrochemischen Element	7
Abbildung 4: Speicherung der Lithium-Ionen bei Ladung (links) und Entladung (rechts) nach (Zinniker, 2001)	8
Abbildung 5: Einteilung der Prüfungen an Traktionsbatterien	9
Abbildung 6: Unterteilung der Beanspruchungsart bei mechanischen Tests.....	10
Abbildung 7: Impaktorplatte für Eindrückversuche nach dem FreedomCAR Abuse Test Manual	14
Abbildung 8: Penetrationstest an einer Lithium-Ionen Zelle (Hazard Level 6) vor (links) und nach (rechts) dem Versuch	16
Abbildung 9: Gaszusammensetzung beim Ausgasen von Lithium-Ionen Batterien (Roth, et al., 2004)	19
Abbildung 10: Lithium-Ionen Batterie für Versuchsdurchführungen	24
Abbildung 11: Werkstattpresse für Prinzipversuche – links: adaptierter Aufbau (ERBA 5); rechts: handelsüblicher Aufbau	26
Abbildung 12: Deformierte Batteriezelle nach dem Prinzipversuch	27
Abbildung 13: Ausgasen der Versuchszelle 0, 5, 10, 15 Sekunden nach optischer Erkennung des Ausgasens, Betrachtung seitlich (obere Bildfolge) und von Oben (untere Bildfolge)	28
Abbildung 14: Brand einer Lithium-Ionen Zelle.....	29
Abbildung 15: Adaptierte Werkstattpresse für Prinzipversuche.....	31
Abbildung 16: Die Komponenten der Prüfvorrichtung.....	50
Abbildung 17: Konzept zur Auslegung der Rahmenprofile	51
Abbildung 18: Statische FE-Analyse eines Rahmenkonzeptes in Pro-Engineer® und Lastannahme	52
Abbildung 19: Statische FE-Analyse der Rahmenkonstruktion (links: unverformt; rechts: maximalverformt).....	53
Abbildung 20: Abmessungen der Rahmenkonstruktion	54
Abbildung 21: Die Arbeitspositionen der Prüfvorrichtung (links: verfügbare Arbeitshöhe=500mm; rechts: vergrößerter Arbeitsbereich=864mm)	55
Abbildung 22: Statische FE-Simulation der Zylinderanbindung: Darstellung unverformt (links), maximalverformt (rechts) und Lastannahmen.....	56
Abbildung 23: Zylinderanbindung ohne (links) und mit Hydraulikzylinder (rechts)	57
Abbildung 24: Unterseite der Zylinderanbindung ohne (links) und mit (rechts) Hydraulikzylinder	57
Abbildung 25: Berechnete Deformation der entwickelten Prüfvorrichtung in der oberen Arbeitsposition	58
Abbildung 26: Berechnete Deformation der entwickelten Prüfvorrichtung in der unteren Arbeitsposition.....	59

Abbildung 27: Komponenten der Prüfvorrichtung	60
Abbildung 28: CNC-Bearbeitung des Rahmens.....	61
Abbildung 29: Obere Aufspannplatte	61
Abbildung 30: Zylinderanbindung mit unterer Aufspannplatte und Führungswinkeln.....	62
Abbildung 31: Geschützte Anordnung eines Kraftsensors (rechts: Schnittdarstellung)	62
Abbildung 32: Fertiggestellte Konstruktion der Aufbau-Kraftmessung in Pro-Engineer®	63
Abbildung 33: Dreieckanordnung der Kraftmessung (links Gesamtaufbau, rechts ohne obere Aufbauplatte)	64
Abbildung 34: Am Prüfstand montierter Kraftmessaufbau	64
Abbildung 35: Komponenten des Führungssystems	65
Abbildung 36: Die Hydraulikkomponenten des Prüfstandes.....	67
Abbildung 37: Spannelemente für Knick-, Eindrück- und Impaktorversuche.....	68
Abbildung 38: Zylindrische Auflager (Ø30mm) für die Dreipunktbiegeversuche	68
Abbildung 39: Montierter zylindrischer Impaktor für Eindrück- und Dreipunktbiegeversuche.....	69
Abbildung 40: Impaktor mit hemisphärischer Form (Ø30mm) für Eindrückversuche	69
Abbildung 41: Aufbau-Kraftmessung mit montiertem Kraftaufnehmer	70
Abbildung 42: Digitales Längenmesssystem.....	72
Abbildung 43: Die Hardware-Komponenten des CompactRIO – Steuerungs- und Messsystems	74
Abbildung 44: Knicktest – Inbetriebnahmeversuch.....	78
Abbildung 45: Kraft-Weg Verlauf – Knicktest Inbetriebnahmeversuch.....	79
Abbildung 46: Der Arbeitsablauf bei der Entwicklung der Mess- und Steuerungssoftware	81
Abbildung 47: Versuchsablauf für quasi-statische mechanische Tests an elektrischen Energiespeichern	82
Abbildung 48: Prinzipaufbau der Mess- und Steuerungssoftware	84
Abbildung 49: Die Programmier- und Kommunikationsebenen des CompactRIO-Systems (National Instruments Cooperation, 2011).....	86
Abbildung 50: Logische Verknüpfungen von Ein- und Ausgängen am FPGA-Chipsatz (Pasquarette, 2010)	87
Abbildung 51: Darstellung der Programmiererebenen am Prinzipaufbau der Mess- und Steuerungssoftware	88
Abbildung 52: Die Funktionen der Messdatenerfassung (MDE)	89
Abbildung 53: Ablaufdiagramm der zeit- und weggesteuerten Datenerfassung	90
Abbildung 54: Messdatenübertragung zwischen den Systemebenen FPGA und LabVIEW® Real Time.....	93
Abbildung 55: Kraft-Weg-Diagramm eines Testkörpers mit plötzlichem Materialversagen	94
Abbildung 56: Kraft-Zeit-Diagramm eines Testkörpers mit plötzlichem Materialversagen	95
Abbildung 57: Einbinden von Zusatzinformationen bei der Erstellung der Messdatei	99

Abbildung 58: Die Datenübertragung über Netzwerkvariablen	102
Abbildung 59: Der Programmablauf des Automatikbetriebs	103
Abbildung 60: Funktionsüberprüfung: Abbruchkriterium Kraft	105
Abbildung 61: Kraft-Weg Kurve bei der Überprüfung des Kraft-Abbruchkriteriums 100kN	106
Abbildung 62: Funktionsüberprüfung: Abbruchkriterium Weg.....	107
Abbildung 63: Vergleich der Messsysteme: PRESTO420 und Kayser Threde MINIDAU®	109
Abbildung 64: Kraft-Weg Kurven von Scherversuchen an Leichtbetonproben	111
Abbildung 65: Kraft-Weg Kurven von Stauchversuchen an CFK-Formrohren	112
Abbildung 66: Übersicht über existierende normative und legislative Batterietests (Sinz, et al., 2012)	i

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Normative und legislative Bestimmungen für mechanische Belastungstests an elektrischen Energiespeichern	13
Tabelle 2: Kontrollierter Eindrückversuch nach dem FreedomCAR Abuse Test Manual (Doughty, et al., 2006)	14
Tabelle 3: Gefahrenpotentiale und Beschreibungen (Doughty, et al., 2006)	15
Tabelle 4: Abgeleitete Anforderungen aus der Literaturrecherche	22
Tabelle 5: Auszug technischer Daten der Versuchszelle (Amita Technologies Inc.)	23
Tabelle 6: Technische Daten der adaptierten Werkstattpresse	25
Tabelle 7: Das Lastenheft für die Entwicklung der Prüfvorrichtung	36
Tabelle 8: Annahmen für die Auslegung der Hydraulikkomponenten	41
Tabelle 9: Benötigter Volumenstrom zum Erreichen der gewählten Vorschubgeschwindigkeiten	41
Tabelle 10: Eckdaten des Hydraulikaggregats und des Druckbegrenzungsventils	41
Tabelle 11: Grenzen der Durchflussmengen des verwendeten proportionalen Stromregelventils	42
Tabelle 12: Abmessungen des Hydraulikzylinders	42
Tabelle 13: Berechnete Vorschubgeschwindigkeiten und Prüfkraften der entwickelten Prüfvorrichtung	42
Tabelle 14: Auflistung der am Institut verfügbaren Kraftaufnehmer	71
Tabelle 15: Technische Daten des verwendeten Längenmesssystems	72
Tabelle 16: Verwendete Komponenten des Mess- und Steuerungssystems (National Instruments Cooperation, 2012)	74
Tabelle 17: Auszug elektrischer Daten der Verstärkerkarte und der Proportionalventile	77
Tabelle 18: Beispielhafte Einstellwerte für das proportional Strom- und Druckregelventil	77
Tabelle 19: Maximal und minimal erreichbare Druckkräfte und Vorschubgeschwindigkeiten	80
Tabelle 20: Anforderungen und Randbedingungen an die Mess- und Steuerungssoftware	84
Tabelle 21: Vorgabeparameter der Analog-Eingangsmodule	89
Tabelle 22: Auszug von zeit- und weggesteuert erfassten Messdaten	91
Tabelle 23: Parameter für die Berechnung der zulässigen Anzahl von Werten für die DMA-FIFO-Datenübertragung	96
Tabelle 24: Technische Daten des Druckmessumformers	101
Tabelle 25: Vergleich der erreichbaren Auflösungen der Messsysteme Kayser Threde MINIDAU® und PRESTO 420	110
Tabelle 26: Datenblatt der getesteten Lithium-Polymerzelle (Modell: 7799130L) (Amita Technologies Inc.)	ii

12 Abkürzungsverzeichnis

°C	Grad Celsius
°C/min	Grad Celsius pro Minute
μ	Querkontraktionszahl
μm	Mikrometer (10 ⁻⁶ m)
A	Fläche
A	Ampere
Ah	Amperestunden
AIT	Austrian Institute of Technology
B	Breite
BATSO	Battery Safety Organsiation
bit	binary digit
C ₂ H ₄	Ethylen
CAD	Computer Aided Design
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CH ₄	Methan
CNC	Computerized Numerical Control
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
CompactRIO	Compact Reconfigurable Input Output
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMA	Direct Memory Access
DMS	Dehnmessstreifen
EES	Elektrischer Energiespeicher
Fa.	Firma
FE	Finite Elemente
FIFO	First In First Out
FMVSS	Federal Motor Vehicle Safety Standard
g	Gramm
GB	Gigabyte
H	Höhe
H ₂	Wasserstoff
HEV	Hybrid Electric Vehicle
Hz	Hertz
IEC	International Electrotechnical Commission
ISO	International Standard Organisation
kg	Kilogramm

kHz	Kilohertz
kN	Kilonewton
kS/s	Kilosamples pro Sekunde
L	Länge
l/min	Liter pro Minute
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench
LED	Light-Emitting Diode
LEV	Light Electric Vehicle
LiPF ₆	Lithiumhexafluorophosphat
LSB	Least Significant Bit
m/s	Meter pro Sekunde
MB-DRAM	Megabyte-Dynamic Random Access Memory
MDE	Messdatenerfassung
MHz	Megahertz
MIT	Massachusetts Institute of Technology
mm	Millimeter
mm/min	Millimeter pro Minute
mm/s	Millimeter pro Sekunde
ms	Millisekunde
MSS	Mess- und Steuerungssoftware
mV	Millivolt
N	Newton
NI	National Instruments
ns	Nanosekunde
NWV	Netzwerkvariable
Pa	Pascal
PE	Polyethylen
PRESTO420	Press for Battery Systems and Others 420 Kilonewton
R	Widerstand
SAE	Society of Automotive Engineers
SEI	Solid Electrolyte Interface
SOC	State of Charge
SS	Steuerungssystem
S/s	Samples pro Sekunde
TDMS	Technical Data Management Streaming
TTL	Transistor-Transistor-Logik
UI	User Interface
UL	Underwriter Laboratories

UN	United Nations
USABC	United States Advanced Battery Consortium
V	Volt
VDE	Verband der Elektrotechnik
Wh	Wattstunden
Wh/kg	Wattstunden pro Kilogramm
Wh/l	Wattstunden pro Liter
ε	Längendehnung
ρ	spezifischer Widerstand

Anhang

	UL 1642	FreedomCar	SAE J2464	USABC	BATSO 01	UN 38.3	IEC 62281 IEC 62133	INERIS ELLICERT Version D	IEC 62660-2 (IEC 61982)	ISO 12405-1 and -2	UL 2271	UL 2580	DIN VDE V 0510-11
ELECTRICAL TESTS													
(External) Short Circuit	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Cycling@max. current													x
(Internal) Partial Short Circuit		x		x	x							x	
Abnormal Charging	x						x				x	x	
Overcharge, Forced Charge		x	x	x	x	x	x	x	x	x			x
Over discharge		x	x			x				x	x	x	
Overvoltage		x	x										
Forced Discharge Test, High Rate Discharge	x		x				x	x	x				
Rapid charge/discharge		x											
AC exposure				x									
Continuous Low-Rate Charging							x						
Reverse charge											x	x	
Insulation resistance												x	
MECHANICAL TESTS													
Crush Test	x	x	x	x	x		x	x	x		x	x	
Impact Test	x					x					x	x	
Shock Test	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Vibration Test	x			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Drop Test, Package Drop Tests, Fall	x	x	x	x	x		x	x			x	x	
(Nail) Penetration		x	x	x				x			x	x	
Immersion		x	x	x				x					
Roll-over		x	x	x									
ENVIRONMENTAL AND THERMAL TESTS													
Heating, Thermal Stability	x	x	x	x			x	x	x		x	x	
Extreme Cold				x									
Temperature Cycling, Thermal Shock Cycling, Thermal Cycling	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Dewing										x			
Low pressure, Altitude	x				x	x	x	x			x	x	
Flaming particles	x												
Projectile test	x										x	x	
Fuel Fire, Outside Fire		x	x	x				x					
Elevated Temperature Storage		x		x									
Separator High Temp Stability			x										
Thermal Runaway Test, Overheat				x									
Moulded Case Stress at High Temp							x						
OTHERS													
Passive Propagation Resistance			x										
Hazardous Substance Monitoring		x	x										
Compromise of Thermal Insulation				x									

Abbildung 66: Übersicht über existierende normative und legislative Batterietests (Sinz, et al., 2012)

Modell:		7799130L	Einheit
Positives Material		LiMn ₂ O ₄	
Negatives Material		Graphit	
Spannung	Durchschnitt	3.8	V
	Max.	4.2	V
	Min.	2.8	V
Kapazität		8.2	Ah
Zyklenlebensdauer		1700	
Gewicht		200	g
Interner Widerstand		< 4	mΩ
Energie		31.4	Wh
Energiedichte	pro Gewicht	157	Wh/kg
	pro Volumen	316	Wh/l
Max. Lade C-Rate		3C	
Max. Entlade C-Rate		5C	
Abmessungen	Dicke	7.70~8.05	mm
	Breite	98.0	mm
	Länge	130.0	mm
Betriebstemperatur	Laden	0~4	°C
	Entladen	-20~55	°C
Lagertemperatur		-20~40	°C

Tabelle 26: Datenblatt der getesteten Lithium-Polymerzelle (Modell: 7799130L) (Amita Technologies Inc.)