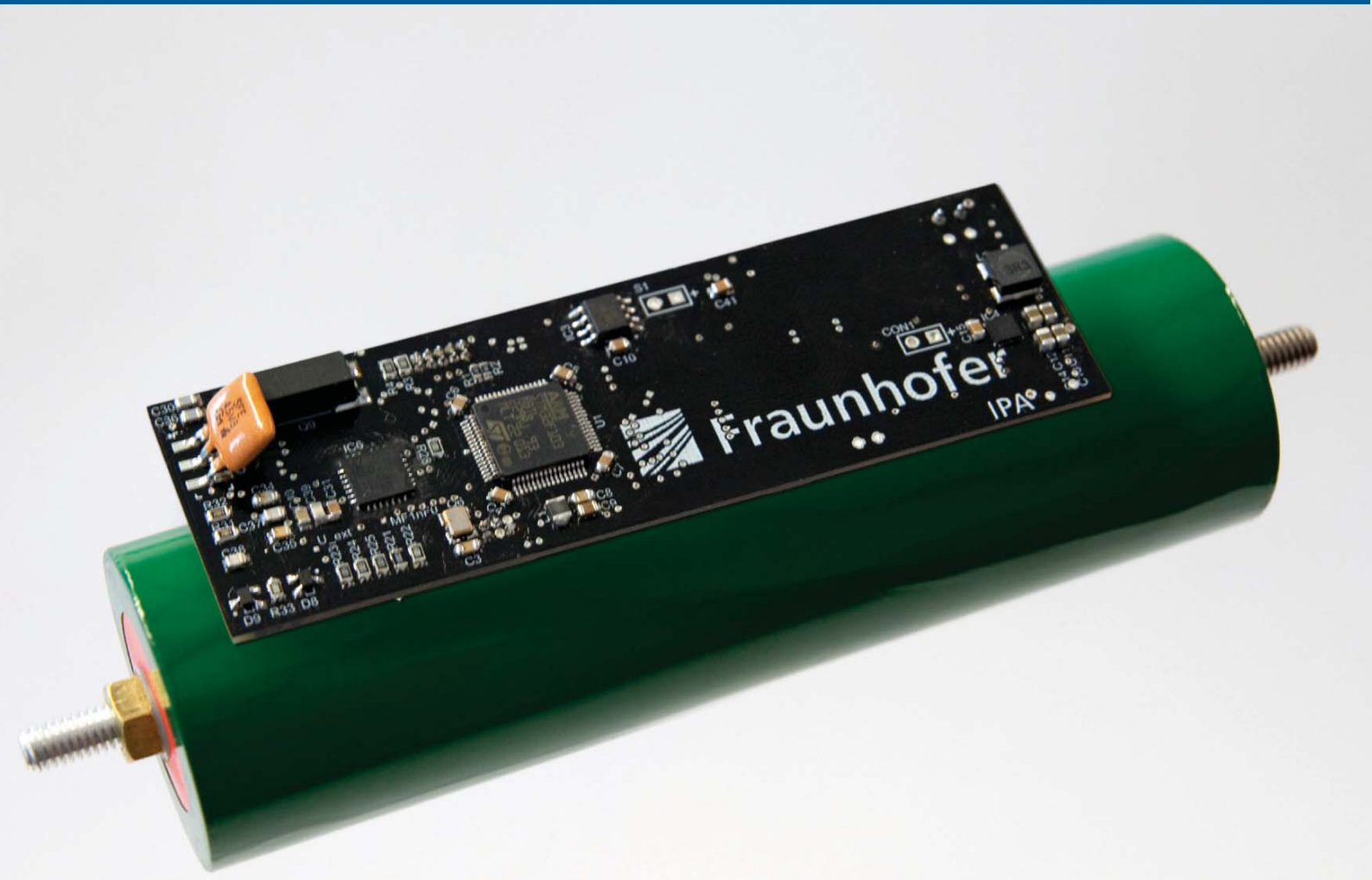
STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG

JONATHAN BRIX

Entwicklung eines verteilten Energiemanagementsystems



Universität Stuttgart

Fraunhofer
IPA

STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG BAND 46

Herausgeber:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Alexander Verl
Univ.-Prof. a. D. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper

Jonathan Brix

Entwicklung eines verteilten Energiemanagementsystems

FRAUNHOFER VERLAG

Kontaktadresse:
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon 0711 970-00, Telefax 0711 970-1399
info@ipa.fraunhofer.de, www.ipa.fraunhofer.de

STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG

Herausgeber:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Alexander Verl
Univ.-Prof. a. D. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart
Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) der Universität Stuttgart
Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW)
der Universität Stuttgart

Titelbild: © Fraunhofer IPA

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über www.dnb.de abrufbar.
ISSN: 2195-2892
ISBN (Print): 978-3-8396-0909-5

D 93

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2015

Druck: Mediendienstleistungen des Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart
Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© by FRAUNHOFER VERLAG, 2015
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Postfach 80 04 69, 70504 Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon 0711 970-2500
Telefax 0711 970-2508
E-Mail verlag@fraunhofer.de
URL http://verlag.fraunhofer.de

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.
Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften. Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

GELEITWORT DER HERAUSGEBER

Produktionswissenschaftliche Forschungsfragen entstehen in der Regel im Anwendungszusammenhang, die Produktionsforschung ist also weitgehend erfahrungsbasiert. Der wissenschaftliche Anspruch der „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung" liegt unter anderem darin, Dissertation für Dissertation ein übergreifendes ganzheitliches Theoriegebäude der Produktion zu erstellen.

Die Herausgeber dieser Dissertations-Reihe leiten gemeinsam das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA und jeweils ein Institut der Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik an der Universität Stuttgart.

Die von ihnen betreuten Dissertationen sind der marktorientierten Nachhaltigkeit verpflichtet, ihr Ansatz ist systemisch und interdisziplinär. Die Autoren bearbeiten anspruchsvolle Forschungsfragen im Spannungsfeld zwischen theoretischen Grundlagen und industrieller Anwendung.

Die „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung" ersetzt die Reihen „IPA-IAO Forschung und Praxis" (Hrsg. H.J. Warnecke / H.-J. Bullinger / E. Westkämper / D. Spath) bzw. ISW Forschung und Praxis (Hrsg. G. Stute / G. Pritschow / A. Verl). In den vergangenen Jahrzehnten sind darin über 800 Dissertationen erschienen.

Der Strukturwandel in den Industrien unseres Landes muss auch in der Forschung in einen globalen Zusammenhang gestellt werden. Der reine Fokus auf Erkenntnisgewinn ist zu eindimensional. Die „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung" zielen also darauf ab, mittelfristig Lösungen für den Markt anzubieten. Daher konzentrieren sich die Stuttgarter produktionstechnischen Institute auf das Thema ganzheitliche Produktion in den Kernindustrien Deutschlands. Die leitende Forschungsfrage der Arbeiten ist: Wie können wir nachhaltig mit einem hohen Wertschöpfungsanteil in Deutschland für einen globalen Markt produzieren?

Wir wünschen den Autoren, dass ihre „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung" in der breiten Fachwelt als substanziell wahrgenommen werden und so die Produktionsforschung weltweit voranbringen.

Alexander Verl Thomas Bauernhansl Engelbert Westkämper

Entwicklung eines verteilten Energiemanagementsystems

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

von

Jonathan Brix
aus Berlin

Hauptberichter:	Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Alexander Verl
Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. Nejila Parspour
	Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss
Tag der mündlichen Prüfung:	29.06.2015

Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und
Fertigungseinrichtungen (ISW)
der Universität Stuttgart

2015

Vorwort des Autors

Diese Arbeit entstand während meiner Beschäftigung als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Gruppe vernetzte Systeme am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA.
Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Verl danke ich für die Betreuung dieser Arbeit.
Frau Prof. Dr.-Ing. Nejila Parspour sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss danke ich für die Übernahme des Mitberichts.
Besonders bedanken möchte ich mich bei meinen Kollegen Dr.-Ing. Kai Pfeiffer, Axel Wechsler, Dr.-Ing. Jens Bohnet sowie meinen Freunden Tim-Felix Mai, Johannes Krüger, Patrick Holst und Daniela Dollenmayer. Sie haben mich in vielen Gesprächen inspiriert und motiviert. Nicht unerwähnt bleiben darf Dr.-Ing. Patrick Wader. Er hat es geschafft bei mir den Schalter umzulegen, damit ich die Arbeit angehe. Danken möchte ich auch meinen Studenten, mit denen ich immer wieder neue und interessante Diskussionen führen konnte.
Meinen Eltern danke ich für die Unterstützung, die ich in meinem Studium und meinem Leben immer bekommen habe.
Die meiste Geduld und das meiste Verständnis mussten meine Frau und meine Tochter aufbringen. Vielen Dank!

Stuttgart im Dezember 2013

Kurzzusammenfassung

Traktionsbatterien bestimmen durch ihre hohen Kosten den Verkaufspreis von Elektrofahrzeugen und tragen dadurch zu geringer Marktakzeptanz dieser bei. Eine Traktionsbatterie besteht nicht nur aus dem Energiespeicher selbst, sondern unter anderem auch aus einer Überwachungseinrichtung - dem Batteriemanagementsystem (BMS). Das BMS soll einen fehlerfreien und sicheren Betrieb der Komponente Batterie sicherstellen. Da BMS individuell für jedes Fahrzeug entwickelt werden, ist es Ziel der vorliegenden Arbeit, einen Ansatz zu finden, BMS einheitlich zu gestalten und somit eine Möglichkeit zu schaffen, die Kosten der Batterie zu senken.

Diese Arbeit setzt sich mit der Architektur von BMS und deren Ladungsausgleichssystemen (Balancing) auseinander. Es wird gezeigt, dass derzeitige Systeme unflexibel sind und keine Möglichkeit bieten, das BMS einheitlich zu gestalten.

Es wird ein neues Konzept, die Intelligente Zelle, entwickelt, welche die Basis für ein einheitliches, skalierbares BMS bildet. Eine Intelligente Zelle besteht aus einem Energiespeicher und einer elektronischen Schaltung. Eine Menge an Intelligenten Zellen bildet eine Batterie, ohne dass ein übergeordnetes System notwendig ist, das heißt Intelligente Zellen bilden selbst ein verteiltes BMS. Die Funktionalität der

Intelligenten Zelle wird insbesondere über ein Leistungsstellglied erreicht, welches den Energiefluss steuert und sowohl das Balancing ermöglicht als auch Sicherheit gewährleistet. Intelligente Zellen kommunizieren über Powerline Communication (PLC). Das Protokoll für diese Kommunikation wird in Hinblick auf die neue Architektur entwickelt.

Es wird gezeigt, dass das Prinzip eines verteilten BMS umsetzbar ist. Die Intelligenten Zellen kommunizieren untereinander und stellen die Funktionalität eines BMS bereit. Das Leistungsstellglied der Intelligenten Zelle ermöglicht auch, stark gealterte oder defekte Zellen aus dem Verbund zu lösen. Es wird gezeigt, dass damit die Reichweite eines Elektrofahrzeugs durch die bessere Ausnutzung der verbauten Energie gesteigert werden kann. Die Lebensdauer einer Traktionsbatterie kann durch diesen Ansatz ebenfalls erhöht werden.

Das entwickelte Funktionsmuster der Intelligenten Zelle muss optimiert werden um den Schritt in Richtung Produkt gehen zu können. Sind diese Optimierungen erfolgreich, steht zukünftig ein BMS zur Verfügung, welches sowohl Kosten als auch Nutzen einer Traktionsbatterie verbessert.

Abstract

Traction batteries define the selling price of electric vehicles and by that lead to less market acceptance of them. A traction battery is not only made of the energy storage itself but also of a monitoring device - the battery management system (BMS). The BMS is designed to ensure trouble-free and safe operation of the battery. Since BMS are developed individually for each vehicle, it is the objective of this thesis to find an approach of standardized BMS design and thus to provide a way of reducing costs of the battery.

This work deals with the architecture of BMS and its balancing systems. It is shown that todays systems are inflexible and do not offer the possibility of a standardized BMS.

Accordingly a new concept, the intelligent cell is developed, which is the basis for a standardized, scalable BMS. An intelligent cell consists of an energy storage and an electronic circuit. Intelligent cells form a battery without having a central controller. This means intelligent cells build up a distributed BMS. Inter alia, the functionality of the intelligent cell is achieved by power electronics, which controls the flow of energy and enables both, balancing and security. Intelligent cells communicate via Powerline Communication (PLC).

The protocol for this communication is developed in consideration of the new architecture.

It is shown that the principle of a distributed BMS is possible. Intelligent cells communicate with each other and provide the functionality of a BMS. The power electronics of the intelligent cell makes it possible still using the battery at its maximum performance with strongly aged or even damaged cells by excluding them from the compound. It is shown that this technology enhances the range of an electric vehicle by the optimal usage of the installed energy. Furthermore, the approach can prolong the lifetime of a traction battery overall.

The developed prototype of the intelligent cell needs to be optimized to be market-ready. If these optimizations are successful a BMS will be available that improves both, costs and lifetime of a traction battery.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis **XIII**

Abkürzungsverzeichnis **XVII**

Abbildungsverzeichnis **XIX**

Tabellenverzeichnis **XXIII**

1 Einleitung **1**

1.1 Ausgangssituation 1

1.2 Problemstellung 2

1.3 Zielsetzung und Lösungsansatz 3

1.4 Vorgehensweise 6

2 Grundlagen **8**

2.1 Batteriesystem 8

2.2 Die elektrische Batterie 12

2.2.1 Lithium-Ionen-Zelle 17

2.2.2 Alterung einer Lithium-Ionen-Zelle 19

2.2.3 Lebenszyklus einer Zelle 25

3 Stand der Forschung und Technik **41**

3.1 Batteriemanagementsysteme 41

3.1.1 Grundfunktionalitäten 46

3.1.2 Ladezustand 47

3.1.3 Gesundheitszustand 49
3.1.4 Funktionszustand 49
3.1.5 Aufzeichnung von Betriebsdaten 50
3.1.6 Ausgleich von Ladungsungleichgewichten 50
3.1.7 Architektur von Batteriemanagementsystemen 69
3.2 Kommunikation 72
3.2.1 Kanalzugriffsverfahren 72
3.2.2 Kommunikationsprotokoll 73
3.3 Zusammenfassung des Standes der Technik 73

4 Lösungsansatz **75**
4.1 Ansatz zur Entwicklung eines verteilten BMS - Intelligente Zelle . . 75
4.2 Grundgedanke 77
4.3 Anforderung 78
4.4 Konzept 79
4.4.1 Architektur 81
4.4.2 Kommunikation 83
4.4.3 Leistungsstellglied 88
4.5 Vergleich zwischen herkömmlichen und verteilten BMS 92

5 Realisierung **95**
5.1 Elektrische Schaltung 95
5.1.1 Logik- und Datenerfassung 97
5.1.2 Speicher 98
5.1.3 Statusanzeige 98
5.1.4 Leistungsstellglied 99
5.1.5 Kommunikation 99
5.2 Software 100
5.2.1 Sicherheitsfunktionen 100

5.2.2 Kommunikation 101
5.3 Aufbau der Hardware 107
5.4 Prüfsystem zur Messung von realen Fahrzyklen 108
5.4.1 Logikeinheit 110
5.4.2 Spannungserfassung 110
5.4.3 Stromerfassung 111
5.4.4 Positionserfassung 112
5.5 Prüfstand zur Messung von Batteriezellen und -systemen 113
5.5.1 Hardware des Prüfstands 113
5.5.2 Software des Prüfstands 116

6 Validierung und Bewertung 118
6.1 Inbetriebnahme des Laboraufbaus 118
6.1.1 Inbetriebnahme und Test der Hardware 119
6.1.2 Inbetriebnahme und Test der Software 123
6.2 Messung realer Fahrdaten 125
6.2.1 Fahrdaten einer Autobahnfahrt 127
6.2.2 Fahrdaten einer Bergfahrt 130
6.2.3 Fahrdaten einer Stadtfahrt 134
6.3 Vermessung unter simulierten Realbedingungen 137
6.3.1 Vermessung von zwei Intelligenten Zellen 137
6.3.2 Simulationsmodell von zwei Intelligenten Zellen 140
6.3.3 Vergleich von Messung und Simulation 141
6.3.4 Simulation einer Batterieanordnung von Intelligenten Zellen 141
6.3.5 Auswirkungen des Fahrprofils 145
6.4 Zusammenfassung der Validierung 146
6.5 Spiegelung an der Zielsetzung 147
6.6 Weiterer Handlungsbedarf 148

7 Zusammenfassung **150**

8 Summary **153**

Anhang **156**

Literaturverzeichnis **173**

Abkürzungsverzeichnis

A/D-Wandler	Analog/Digital-Wandler
ASIC	Application-Specific Integrated Circuit (Anwendungsspezifische integrierte Schaltung)
BattG	Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Batterien und Akkumulatoren
BMS	Batteriemanagementsystem
Bus	Binary Unit System
C	C-Koeffizient
CAN	Controller Area Network (ISO 11898)
CC-CV	Constant Current - Constant Voltage (Konstanter Strom - Konstante Spannung)
CEN	Comité Européen de Normalisation (Europäisches Komitee für Normung)
CSMA/CA	Carrier sense multiple access with collision avoidance (Mehrfachzugriff mit Trägerprüfung und Kollisionsvermeidung)
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
GPIB	General Purpose Interface Bus (IEC-625-Bus)
LBT	Listen Before Talk (Hören vor dem Sprechen)
Lead-Acid	Blei-Säure
LED	Licht-emittierende Diode

Li	Lithium
MOSFET	Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor (Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor)
NaNiCl	Natrium-Nickelchlorid (verwendet in ZEBRA-Batterien)
NiCd	Nickel-Cadmium
NiMH	Nickel-Metallhydrid
NMR	Neue Maschinenrichtlinie
OBD	On-Board-Diagnose
OCV	Open-Circuit-Voltage (Leerlaufspannung)
PLC	Powerline Communication (Powerline-Kommunikation)
PTC	Positive Temperature Coefficient (Positiver Temperatur Koeffizient, Kaltleiter)
PWM	Pulsweitenmodulation
Q_n	Schalter n
$R_{DS(on)}$	Leitungswiderstand eines Feldeffekttransistors
SoF	State of Function (Funktionszustand)
SoH	State of Charge (Ladezustand)
SoH	State of Health (Gesundheitszustand)
U_{GS}	Gate-Source-Spannung eines Feldeffekttransistors
USABC	United States Advanced Battery Consortium
USART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
V_{pp}	Spitze-Spitze-Wert der Spannung
VMS	Vehicle Management System (Fahrzeugsteuergerät)
ZEBRA	Zero Emission Battery Research Activities

Abbildungsverzeichnis

1.1 Wertschöpfungskette der Batterie 4

2.1 Aufbau einer Batterie aus einzelnen Zellen 9
2.2 Entwicklungsstand von Lithium-Ionen-Batterien 11
2.3 Schematische Darstellung der Redoxreaktion 13
2.4 Spezifische Leistungsdichte über spezifischer Energiedichte 16
2.5 Unterschiedliche Formgebung von Zellen 18
2.6 Kapazitätsverlust einer lagernden Lithium-Ionen-Batteriezelle . . . 21
2.7 Selbstentladung einer lagernden Lithium-Ionen-Batteriezelle 21
2.8 Kapazitätsverlust einer lagernden Lithium-Ionen-Batteriezelle . . . 22
2.9 Abhängigkeit der Zyklusfestigkeit vom Entladestrom 24
2.10 Abhängigkeit der Zyklusfestigkeit vom Ladestrom 24
2.11 Lebenszyklus einer Lithium-Ionen-Batterie 27
2.12 Schritte bei der Herstellung einer Lithium-Ionen-Batteriezelle . . . 29
2.13 Beispiel für den Einsatz von produzierten Zellen 36
2.14 Verfahrensschritte für das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien . 39

3.1 Funktionalitäten eines Batteriemanagementsystems 43
3.2 Kapazitätsfenster einer Traktionsbatterie 44
3.3 Ersatzschaltbild einer Traktionsbatterie 46
3.4 Leerlaufspannung über SoC relativ zur Nennkapazität 48
3.5 Übersicht über verschiedene Balancing-Methoden 52

3.6 Aufbau resitives Balancing 53
3.7 Aufbau analoges Balancing 55
3.8 Aufbau PWM Shunting 57
3.9 Aufbau Boost Shunting 58
3.10 Aufbau vollständiges Shunting 59
3.11 Aufbau kapazitives Shuttling 60
3.12 Beispiel für eine Ausführung des kapazitiven Shuttlings 61
3.13 Aufbau des Balancing mithilfe von Hochsetzstellern 62
3.14 Aufbau des Balancing mithilfe eines geteilten Transformators . . . 63
3.15 Aufbau des Balancing mithilfe einzelner Transformatoren 64
3.16 Aufbau des Balancing mithilfe eines geschalteten Transformators . 65
3.17 Aufbau des Balancing mittels eines Resonanzkonverters 66
3.18 Master-Slave-Architektur eines Batteriemanagementsystems 69
3.19 Bus-Architektur eines Batteriemanagementsystems 70

4.1 Aufbau der Intelligenten Zelle 77
4.2 Energie- und Informationsfluss innerhalb der Intelligenten Zelle . . 80
4.3 Architektur des BMS mit der Intelligenten Zelle 82
4.4 Ersatzschaltbild der Parallelschaltung und Reihenschaltung 86
4.5 Leistungsstellglied 89
4.6 Leistungsstellglied bei Energieabgabe 90
4.7 Leistungsstellglied bei niederohmigen Anschlussklemmen 90

5.1 Blockschaltbild des Laboraufbaus 96
5.2 Aufbau einer Daten-Nachricht 104
5.3 Zeitliche Abfolge des Arbitrierungszeitpunktes 105
5.4 Übersicht Fehlerwahrscheinlichkeit 106
5.5 Layout der Oberseite der Platine 107
5.6 Layout der Unterseite der Platine 107

5.7 Bild der Oberseite der Platine 108
5.8 Blockschaltbild des Messsystems 109
5.9 Bild des Datenloggers im Gehäuse 112
5.10 Blockschaltbild des Prüfstands 114
5.11 Bild des Prüfstands mit offener Umhausung 114
5.12 Vergleich zwischen Soll- und Ist-Strom 115
5.13 Screenshot der Prüfstandssoftware 117

6.1 Versuchsaufbau für Messung der Ein- und Ausschaltzeit 119
6.2 Einschaltzeit einer mit 1 Ω belasteten Intelligenten Zelle 120
6.3 Ausschaltzeit einer mit 1 Ω belasteten Intelligenten Zelle 120
6.4 Versuchsaufbau zur Messung der Interferenz 121
6.5 Spannungsverhalten von Schaltvorgängen 122
6.6 Modellierung der Arbitrierung 123
6.7 Überlappung der beiden Betriebszustände 125
6.8 Screenshot des Tools zur Zuweisung der Höhendaten 126
6.9 Streckenverlauf der Autobahnfahrt 127
6.10 Strom- und Spannungsverlauf der Autobahnfahrt 128
6.11 Geschwindigkeitsprofil der Autobahnfahrt 128
6.12 Histogramm der Autobahnfahrt 129
6.13 Höhenverlauf der Bergfahrt 130
6.14 Streckenverlauf der Bergfahrt 131
6.15 Strom- und Spannungsverlauf der Bergfahrt 132
6.16 Geschwindigkeitsprofil der Bergfahrt 132
6.17 Histogramm der Bergfahrt 133
6.18 Streckenverlauf der Stadtfahrt 134
6.19 Strom- und Spannungsverlauf der Stadtfahrt 135
6.20 Geschwindigkeitsverlauf der Stadtfahrt 135

6.21 Histogramm der Stadtfahrt 136
6.22 Versuchsaufbau mit zwei Intelligenten Zellen 137
6.23 Beaufschlagtes Stromprofil 138
6.24 Gemessene Gesamtspannung 139
6.25 Überlagerung aus Stromprofil und Gesamtspannung 140
6.26 Streuung der Kapazität von 200 neuen Zellen 142
6.27 Simulierte Abschaltzeitpunkte von 200 neuen Zellen 144

Tabellenverzeichnis

2.1 Eigenschaften unterschiedlicher Batteriezellchemien 15
2.2 Übersicht über die einzelnen Produktionsschritte 31
2.3 Vor- und Nachteile der Bauform von Lithium-Ionen-Zellen 33
2.4 Probleme beim Recycling von Lithium-Ionen-Zellen 40

3.1 Übersicht und Bewertung verschiedener Balancing-Methoden . . . 68
3.2 Eigenschaften von BMS-Architekturen 71

4.1 Möglichkeiten der Kommunikation 83
4.2 Vorteile der Powerline-Kommunikation 84
4.3 Wertetafel des Leistungsstellglieds 91
4.4 Vergleich zwischen zentralisiertem und verteilten BMS 94

5.1 Grundlegende Softwarefunktionen 100
5.2 Adressverteilung unter Verwendung von 12 Bit Adressen 103

6.1 Technische Daten verschiedener Elektrofahrzeuge 126
6.2 Eigenschaften der eingesetzten Batteriezellen 138
6.3 Berechnung des Quotienten f für verschiedene Fahrszenarien . . . 145

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Die Suche nach der Ursache für die heutigen Klimaveränderungen rückt die Thematik der Treibhausgasemissionen immer mehr in den Vordergrund. Man geht davon aus, dass der CO_2-Ausstoß, der durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe entsteht, einen maßgeblichen Teil zum Treibhauseffekt beiträgt [TRE12]. Längst hat die Politik weltweit Maßnahmen eingeleitet um die CO_2-Emissionen zu verringern. Ziel der deutschen Energiewende ist es, 80 % der Energieversorgung aus erneuerbaren Energiequellen zu speisen [BMU11]. Dazu gehört auch die Absichtserklärung der Bundesregierung, dass eine Millionen elektrisch betriebener Fahrzeuge auf Deutschlands Straßen bis zum Jahr 2020 fahren [FAZ13]. Der Umstieg vom Verbrennungsmotor zu elektrischen Antrieben verspricht ein großes Einsparpotential an Emissionen, sofern die Speisung dieser aus regenerativen Energiequellen erfolgt. Daher werden Elektrofahrzeuge zweifellos eine signifikante und wachsende Rolle bei den Bemühungen zur Verbesserung der Umweltverträglichkeit, nicht nur in Deutschland, in den nächsten Jahrzehnten einnehmen [MOS11].

1.2 Problemstellung

Die Resonanz zu Elektrofahrzeugen in Europa ist groß. Mehrheitliche 70 % der europäischen Autofahrer interessieren sich für dieses Thema. Aus Kundensicht sind nicht nur die Umweltaspekte entscheidend. Die ökologisch bessere Nutzung der Energieressourcen ist der eigentliche Hauptgesichtspunkt, weswegen grundsätzlich Alternativen zu Verbrennungsfahrzeugen wie Hybridfahrzeuge oder Wasserstofffahrzeuge in Betracht gezogen werden [MOS11].

Dennoch ist die Marktakzeptanz von Elektrofahrzeugen gering. Die Hauptursache dafür sind die hohen Anschaffungskosten. Kunden erwarten, dass sich die Mehrkosten eines Elektroautos spätestens 3 Jahre nach dem Kauf gegenüber den Kosten eines konventionellen Fahrzeug amortisiert haben, um die Anschaffung eines Elektrofahrzeuges grundsätzlich in Erwägung zu ziehen [BRO10].

Die Ursache für den hohen Anschaffungspreis ist schnell gefunden - die Batterie. Sie ist mit Abstand die teuerste Einzelkomponente eines elektrisch betriebenen Fahrzeugs und bestimmt damit praktisch dessen Preis. In einem typischen Stadtauto mit einer Reichweite zwischen 80 km und 120 km macht die Batterie einen Anteil von über 60 % der Herstellungskosten aus und hat damit immerhin noch einen Anteil von 40 % des Verkaufspreises [BMU09], [DIN10]. Kostenreduktionen bei der Batterietechnik können sich damit direkt auf den Endkundenpreis des Fahrzeugs auswirken.

Das volle Potential für Elektroautos auf dem weltweiten Markt wird Einschätzungen zufolge in dem in der Studie der Boston Consulting Group betrachteten Zeitraum bis zum Jahr 2020 durch die verhältnismäßig hohen Kosten der Batterie be-

schränkt [MOS11] und somit das angestrebte Ziel von 1 Million Elektrofahrzeugen in Deutschland zur umweltfreundlicheren Energiespeisung gefährdet. Als besondere Herausforderung wird die Reduzierung der Herstellungskosten der Batterie gesehen [DIN10].

Das United States Advanced Battery Consortium, ein Gremium wichtiger Automobilhersteller, hat das Ziel formuliert, den Preis der Batterie zu verringern, um die Hürde der teuren Batterie beim Autokauf deutlich zu verringern. Angestrebtes Ziel hierbei ist es, die Kosten von etwa 650 $/kWh auf 250 $/kWh mehr als zu halbieren [DIN10].

1.3 Zielsetzung und Lösungsansatz

Welche Möglichkeiten bieten sich um Kosten bei der Komponente Batterie zu sparen? Die Optimierung der Zellchemie und des Fertigungsprozesses scheint naheliegend. Der Preis einer Batterie wird aber nicht nur durch die Herstellung der einzelnen galvanischen Zelle an sich bestimmt. Einfluss darauf haben auch die Modulproduktion und der Einbau in das Fahrzeug. Abbildung 1.1 zeigt die gesamte Wertschöpfungskette von der Produktion über die Montage bis hin zum Einsatz der Batterie und deren Recycling.

Ein Teil der Gesamtkosten einer Batterie fällt bei der „Module production“ und „Pack Assembly“ auf Systeme, die verschiedene Kontrollfunktionen in der Batterie ausüben. Denn jede Batterie, die im automobilen Umfeld eingesetzt wird, erfordert unabhängig von ihrer speziellen Chemie eine Kontrolleinrichtung.

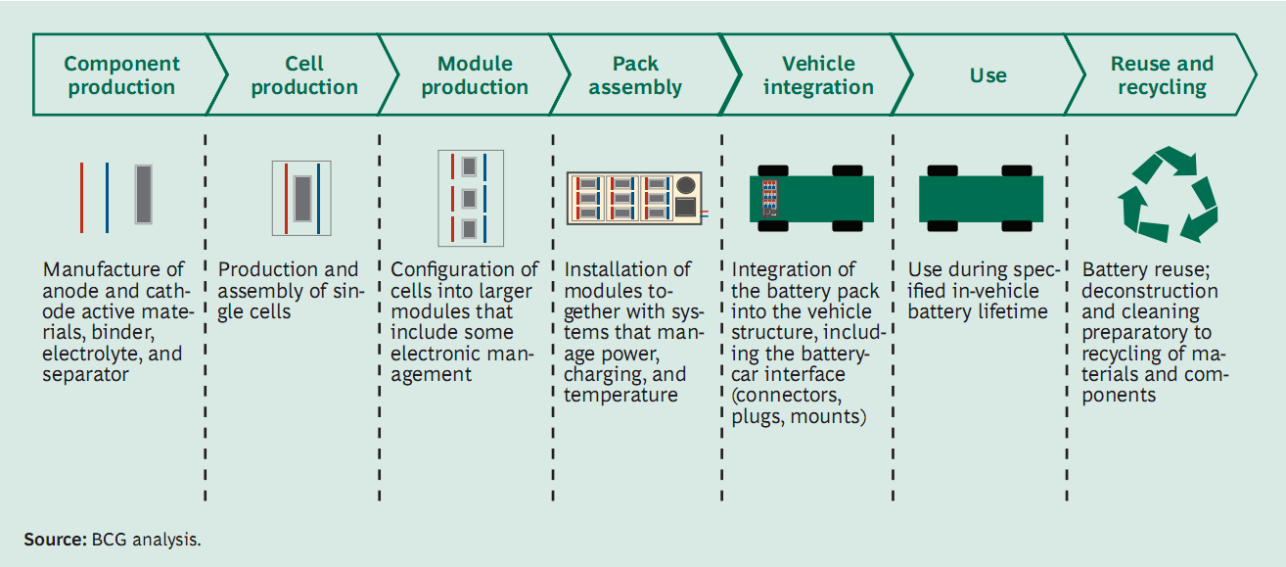


Abbildung 1.1: *Wertschöpfungskette der Batterie [DIN10]*

Aufgabe dieser Einrichtung ist die Überwachung der Batterie und ein Ladungsausgleich unter einzelnen Zellen, um diese nicht außerhalb ihrer zulässigen Betriebsparameter zu betreiben. Dieses System, das Batteriemanagementsystem (BMS), gewährleistet nicht nur einen sicheren Betrieb, sondern dient auch dazu, die Lebensdauer des Energiespeichers zu maximieren und somit dessen Wirtschaftlichkeit zu verbessern.

Heutige Batteriemanagementsysteme sind statische Systeme, also fest definierte Systeme, welche individuell für ihren jeweiligen Einsatz entwickelt werden [EE12].

Eine Standardisierung kann hilfreich sein, um Batteriemanagementsysteme universeller zu gestalten und somit durch die laufende Wiederverwendung dieser Komponente Kosten zu reduzieren [REE93]. So fiel der Preis für eine 18650-Zelle innerhalb von 10 Jahren nach ihrer Standardisierung um zwei Drittel [KIL11], wobei Preise für Batterien von Mobiltelefonen stagnieren, was auf das individuelle Batteriedesign für nahezu jedes neue Gerät zurückzuführen ist [CHAS12].

Voraussetzung für eine Standardisierung des Batteriemanagementsystems ist eine hohe Flexibilität, so dass keine Begrenzungen hinsichtlich Größe oder Aufbau einer Batterie gesetzt werden, sondern weiterhin eine freie Gestaltung der ganzen Komponente Batterie ohne Einschränkungen möglich ist. Somit kann die Erhöhung der Flexibilität eines Batteriemanagementsystems zu einer Standardisierung führen. Damit können Kosten eingespart werden, um die Nutzerakzeptanz und letztlich den Absatz von Elektrofahrzeugen zu steigern.

Eine weitere Möglichkeit der Kostenreduktion ist es, den Produktionsausschuss von Batteriezellen einzudämmen, indem eine Hardware installiert wird, die fertigungsbedingten Unterschiede der Batteriezellen ausgleichen kann. Somit werden der Ausschuss minimiert und der Preis der Zellen gesenkt.

Die Reichweite eines Elektrofahrzeugs wird durch die schwächste Zelle in der Batterie begrenzt. Eine Lösung, welche ein gleichmäßiges Entladen aller Batteriezellen und damit eine bessere Ausnutzung der Energiequelle ermöglicht, führt zu einer höheren Reichweite bei gleicher Batteriegröße beziehungsweise zu einer kleineren Batterie bei gleicher Reichweite.

Die Maximierung der Lebensdauer durch das BMS kann ebenfalls dazu beitragen die Bilanz eines Elektrofahrzeugs zu verbessern. Zellen verhalten sich über ihre Lebenszeit unterschiedlich. Wird jede Batteriezelle individuell behandelt, das heißt Lade- und Entladevorgang dem Zustand der Zelle angepasst, wird das Lebensende einer Batterie nicht vorzeitig durch das schwächste Glied begrenzt, sondern die Batterie altert gleichmäßig.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, ein einheitliches, modulares BMS zu entwickeln, welches es erlaubt, eine veränderliche Anzahl Energiespeicher beispielsweise Batteriezellen miteinander zu verbinden. Darüber hinaus sollte das BMS auch in der Lage sein, Zellen unterschiedlichen Aufnahmevermögens miteinander zu verschalten, so dass die nutzbare Kapazität des Verbundes maximiert wird.

1.4 Vorgehensweise

Die Arbeit ist in folgende Abschnitte gegliedert:

- **Grundlagen:** In diesem Abschnitt werden Grundlagen und Hintergründe zur Komponente Batterie erläutert. Es werden der Aufbau einer Batteriezelle und die besonderen Eigenschaften von Lithium-Ionen-Zellen, wie sie in heutigen Anwendungen eingesetzt werden, vorgestellt. Darüber hinaus beleuchtet der Abschnitt den Lebenszyklus einer Batteriezelle und stellt den Produktionsprozess, die Nutzung im First und Second Life vor. Durch Lagerung und Nutzung ist die Batteriezelle einer Alterung unterworfen. Auf diese Effekte wird ebenfalls eingegangen.

- **Stand der Technik:** In diesem Abschnitt wird der Stand der Technik von BMS betrachtet. Eingegangen wird auf Funktionalitäten, insbesondere auf Ladungsausgleichssysteme. Die Kommunikation ist ein wesentlicher Bestandteil eines BMS, weshalb auch Aspekte der Kommunikationstechnik vorgestellt werden.

- **Lösungsansatz:** Der Abschnitt stellt die wichtige Komponente für ein flexibles BMS unter Berücksichtigung der heute eingesetzten Technik vor und zeigt den Forschungsbedarf auf.

- **Lösung:** In diesem Abschnitt wird die Umsetzung des Lösungsansatzes in einem Laboraufbau vorgestellt und auf wichtige Details eingegangen. Der Aufbau dient als Grundlage und Testobjekt für Versuche.

- **Validierung:** Um die Funktionsfähigkeit des Ansatzes nachzuweisen wird das System durch realitätsnahe Messungen evaluiert, die Lösung im Bezug auf die Problemstellung validiert und es werden weitere zu lösende Probleme aufgezeigt.

- **Zusammenfassung und Ausblick:** Die Ergebnisse der Arbeit werden in diesem Abschnitt zusammengefasst. Die Arbeit wird hinsichtlich ihrer Zielsetzung bewertet und schließt im Ausblick mit einer Darstellung des weiteren Handlungsbedarfs ab.

2 Grundlagen

Im folgenden Kapitel werden Grundlagen erläutert, die für das Verständnis der weiteren Arbeit hilfreich sind. Es wird auf die Eigenschaften von Batteriespeichern, im Speziellen von Lithium-Ionen-Batterien, wie sie heute zur Anwendung kommen, eingegangen. Zunächst werden die technischen Grundlagen von Batteriezellen erläutert und im Weiteren auf deren Lebenszyklus eingegangen.

2.1 Batteriesystem

Ein Batteriesystem ist ein abgeschlossenes System und lässt sich im Wesentlichen in drei Bestandteile unterteilen:

- Batteriezellen (siehe Abschnitt 2.2)
- Batteriemanagementsystem (siehe Abschnitt 3.1)
- Gehäuse und Kühlung

Mehrere Zellen werden zu einem Modul in Reihe geschaltet. Die Batteriezelle und ihre Eigenschaften werden in Abschnitt 2.2 genauer beschrieben. Die Reihenschaltung bewirkt eine Erhöhung der Spannung.

Bei gleicher abgegebener Leistung sinkt der Strom und somit die ausschließlich vom Strom abhängigen Leitungsverluste. Dies erlaubt auch eine Reduktion von Kabelquerschnitten der Leistungsverkabelung. Mehrere Module werden wiederum zu einer Batterie verschaltet (siehe Abbildung 2.1). Diese Verschaltung erfolgt meist seriell, kann jedoch auch parallel erfolgen.

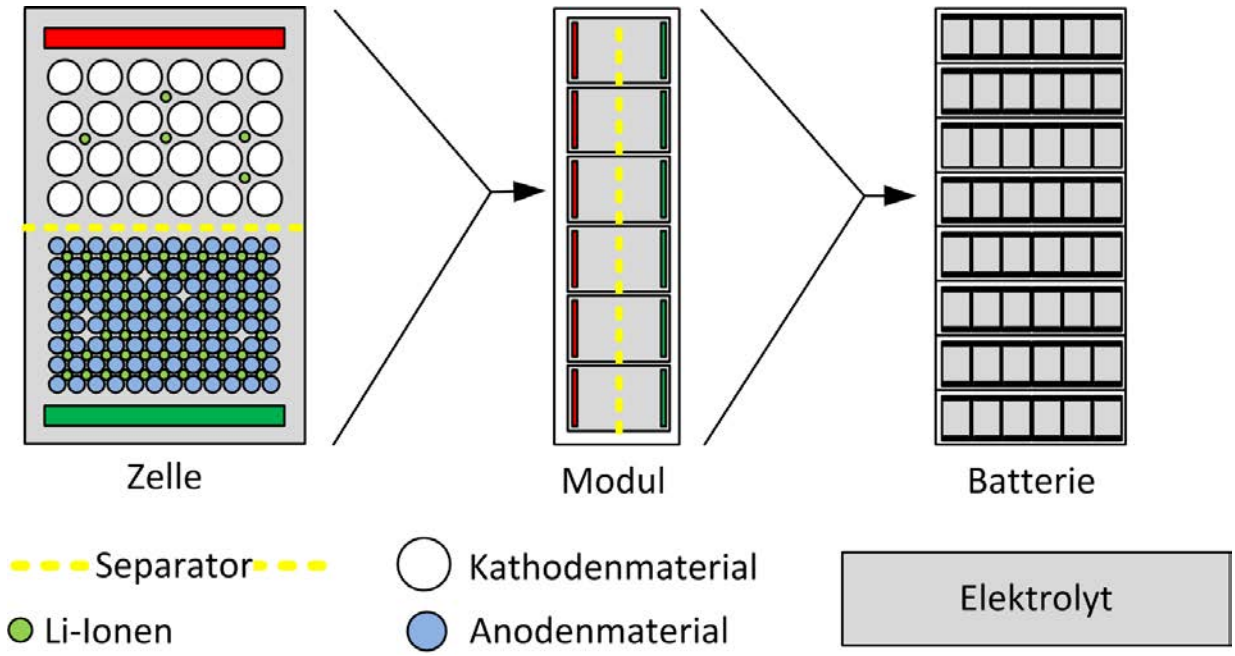


Abbildung 2.1: *Aufbau einer Batterie aus einzelnen Zellen*

Als Steuerungsgerät in der Batterie fungiert das Batteriemanagementsystem. Es stellt auch die Verbindung zum Fahrzeugmanagement dar. Auf die Eigenschaften des BMS wird in Abschnitt 3.1 eingegangen. Das Fahrzeugmanagement, auch Vehicle-Management-System (VMS) genannt, erfasst zentral alle sensorischen Daten des Fahrzeugs und interagiert mit dem Fahrzeugnutzer. Diese Anbindung des BMS an das VMS ermöglicht beispielsweise durch die Routeninformationen des Navigationssystems eine genaue Reichweitenabschätzung und kann angeben, zu welchem Zeitpunkt eine Lademöglichkeit aufgesucht werden sollte.

Alle Elemente (Zellen, BMS und Kühlung) werden in einem speziellen Gehäuse untergebracht. Aufgabe des Gehäuses ist es, die empfindlichen Batteriezellen zu schützen und mechanische Impulse, beispielsweise bei einem Unfall definiert abzuleiten, so dass möglichst keine gefährlichen Deformationen auftreten. Eine gefährliche Deformation wäre die Beschädigung des Separators in der Zelle, welche zu einem Kurzschluss führen könnte und somit im schlimmsten Fall zu einem Brand. Darüber hinaus ist im Gehäuse meist eine Kühlung integriert. Der Innenwiderstand der Batterie führt beim Entladen, besonders aber beim schnellen Laden, zu erhöhten Zelltemperaturen, welche sich negativ auf die Lebensdauer auswirken (siehe Abschnitt 2.2.2). Dem soll eine meist aktive Kühlung entgegenwirken. Oft werden geeignete wasserähnliche Flüssigkeiten verwendet, welche gegenüber Luft eine höhere spezifische Wärmekapazität aufweisen und die Wärme somit bei gleichem Querschnitt und Fluss schneller abführen können. Als Kühlmittel ist besonders die Dispersion Cryosolplus hervorzuheben, welche hauptsächlich aus Wasser und Paraffin besteht und eine dreifach höhere Wärmekapazität als Wasser aufweist [PUD12]. Diese Arbeit soll sich auf die elektrotechnischen Komponenten konzentrieren. Daher wird auf das Kühlsystem und deren Technologien im Folgenden nicht näher eingegangen.

Ein Batteriesystem als Traktionsbatterie für Fahrzeuge muss verschiedenen Anforderungen genügen. Dabei spielen neben den technischen auch die ökologischen Gesichtspunkte eine Rolle. Als Kernindikatoren hat das USABC Eigenschaften definiert, die als Ziele für die weitere Batterieentwicklung innerhalb dieses Verbundes dienen.

Diese Ziele sind [CHA06]:

- Betriebstemperatur: $-40\,^{\circ}\mathrm{C}$ bis $50\,^{\circ}\mathrm{C}$
- Spezifische oder gravimetrische Leistungsdichte: $300\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{kg}}$
- Volumetrische Leistungsdichte: $460\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{l}}$
- Spezifische oder gravimetrische Energiedichte: $150\,\frac{\mathrm{Wh}}{\mathrm{kg}}$
- Volumetrische Energiedichte: $230\,\frac{\mathrm{Wh}}{\mathrm{l}}$
- Zykluslebenszeit: 1000 Zyklen
- Kalendarische Lebenszeit: 10 Jahre
- Produktionspreis: $150\,\$/\mathrm{kWh}$

Den Entwicklungsstand von Lithium-Ionen-Batterien im Vergleich zu den von der USABC formulierten Zielen zeigt Abbildung 2.2.

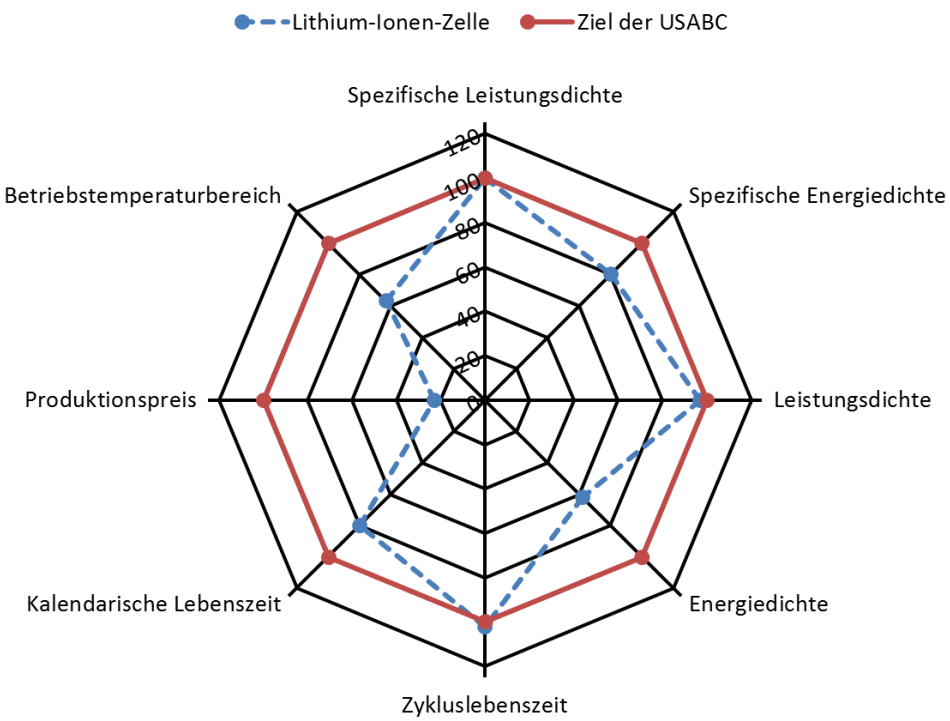


Abbildung 2.2: *Entwicklungsstand von Lithium-Ionen-Batterien relativ zu den Zielen der USABC in % vgl. [CHA06]*

Das Umweltbewusstsein, welches die Elektromobilität maßgeblich im heutigen Maße vorantreibt, darf auch bei der Zellproduktion nicht vernachlässigt werden. Die Herstellungsenergie sowie die verwendeten Rohstoffe müssen effizient verwendet werden und eingesetzte Materialien müssen umweltverträglich und recyclebar sein (siehe auch Abschnitt 2.2.3). Dies kann jedoch in direkter Verbindung zu anderen Zielen wie beispielsweise der Verbesserung der Energiedichte stehen. Somit dürfen die einzelnen Zielgrößen nicht vollständig unabhängig voneinander angesehen werden [WALL11].

2.2 Die elektrische Batterie

Eine elektrische Batterie ist der Zusammenschluss von mehreren, meist gleichartigen, galvanischen Zellen in einem Gehäuse. Der Begriff Batterie wird jedoch umgangssprachlich fälschlicherweise auch für einzelne Zellen verwendet.

Eine galvanische Zelle stellt einen elektrochemischen Energiespeicher dar, der Energie mittels einer elektrochemischen Redoxreaktion abgeben kann. Tiefergehende Beschreibungen werden zum Beispiel in [ONG11] dargestellt.

Hierbei wird zwischen der Primärzelle und der Sekundärzelle unterschieden. Eine Primärzelle ist nicht wiederaufladbar. Sie hatte eine große Bedeutung im Consumerbereich, also bei portablen Geräten wie beispielsweise Fernbedienungen oder Uhren, wird heute aber nur noch vereinzelt eingesetzt. Eine Sekundärzelle ist dafür ausgelegt mehrmals wiederverwendet, also ge- und wieder entladen zu werden. Sie wird auch Akkumulator oder Akku genannt, welche auch im Folgenden synonym verwendet werden.

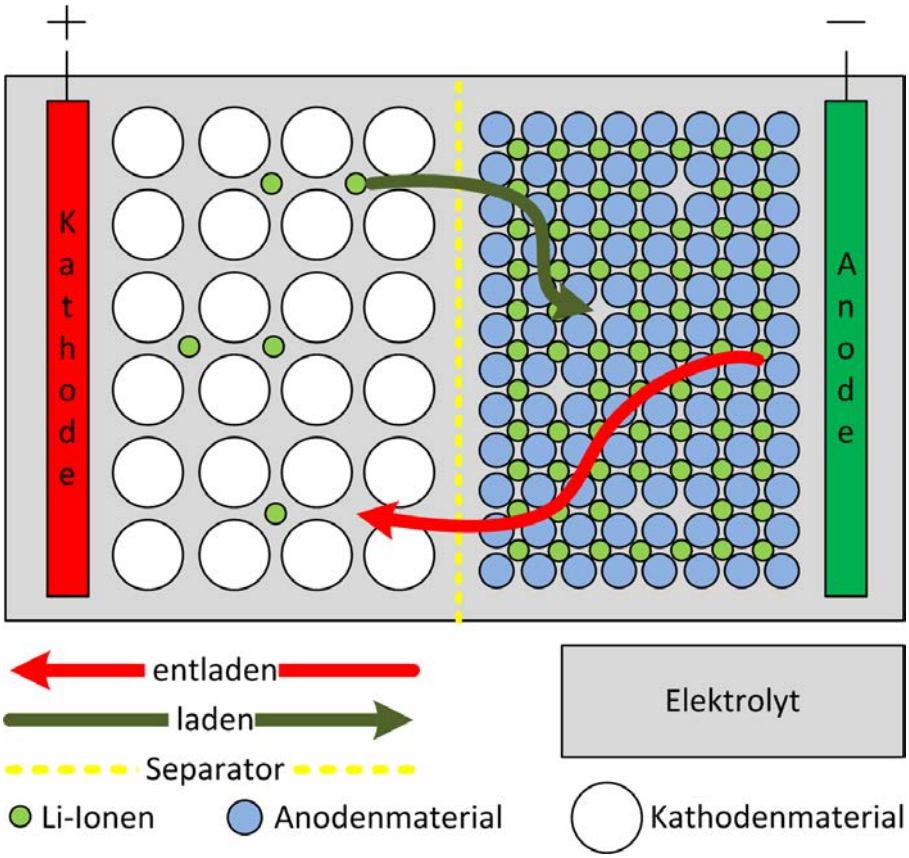


Abbildung 2.3: *Schematische Darstellung der Redoxreaktion*

Eine Zelle besteht aus zwei Elektroden, der Anode und der Kathode in einem Elektrolyt, welche durch einen Separator getrennt werden. Die Anode bezeichnet die Elektrode, bei der eine Elektronenabgabe stattfindet, an der Kathode erfolgt die Elektronenaufnahme. Beim Ladevorgang kehrt sich dieser Prozess um, weswegen die Begriffe positive Elektrode für die Kathode und negative Elektrode für die Anode verwendet werden [PARS12]. Die Elektroden sind getrennt durch einen Separator, welcher einen Kurzschluss zwischen den Elektroden durch einen Elektronenstrom verhindert und nur für den Ionenfluss permeabel ist. Elektroden und Elektrolyt sowie deren Aufbau und Zusammensetzung charakterisieren eine Batteriezelle in ihren elektrischen Eigenschaften und werden auch als Aktivmaterialien bezeichnet. Abbildung 2.3 zeigt den Aufbau und den Fluss der Ionen beim Laden und Entladen.

Die wichtigsten Eigenschaften einer galvanischen Zelle sind:

- **Nennspannung:** Die Deutsche Ausgabe des internationalen elektrotechnischen Wörterbuchs (DIN EN 60050-482) definiert die Nennspannung wie folgt: „Die Nennspannung einer Zelle ist ein geeigneter, angenäherter Wert der Spannung zur Bezeichnung oder Identifizierung eines elektrochemischen Systems, einer Zelle oder einer Batterie.“ Sie wird in V angegeben und ist abhängig von den verwendeten aktiven Materialien. Da die nutzbare Energie einer Zelle das Produkt aus ihrer Kapazität und der Nennspannung ist, kann über diesen Zusammenhang die Nennspannung bestimmt werden.

- **Kapazität:** Die Kapazität ist die Menge der Ladung, die ein Akkumulator aufnehmen beziehungsweise abgeben kann. Die Kapazität wird in Ah oder in As beziehungsweise C (Coulomb), angegeben, wobei gilt 1 As = 1 C

- **Spezifische oder auch gravimetrische Energiedichte:** Die gravimetrische Energiedichte eines Akkumulators ist die Menge an abgebbarer Energie pro Masseneinheit. Sie wird in $\frac{\mathrm{Wh}}{\mathrm{kg}}$ angegeben.

- **Energiedichte oder auch volumetrische Energiedichte:** Die volumetrische Energiedichte eines Akkumulators ist die Menge an abgebbarer Energie pro Raumeinheit. Sie wird in $\frac{\mathrm{Wh}}{\mathrm{l}}$ angegeben.

- **Leistungsdichte:** Die Leistungsdichte beschreibt die maximale Leistung, die ein Akkumulator pro Masseneinheit abgeben kann. Sie wird in $\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{kg}}$ angegeben.

- **Selbstentladung:** Die Selbstentladung beschreibt den reversiblen Verlust der Kapazität über einen Zeitraum, welche eine Zelle nicht durch einen äußeren

Stromkreis verliert (vgl. DIN EN 60050-482). Sie wird bei Sekundärzellen meist in % der Nennkapazität pro Monat oder Jahr angegeben.

- **Zyklenfestigkeit:** Mit der Zyklenfestigkeit einer Zelle wird die Anzahl definierter Entlade- und Ladezyklen (Belastung und Ladung beispielsweise mit 1 C) beschrieben, bis die Kapazität der Zelle einen bestimmten Wert der Nennkapazität (meist 80 %) aufweist.

C steht hier nicht für die Einheit Coulomb, sondern für den C-Koeffizienten. Dieser errechnet sich aus Entlade- beziehungsweise Ladestrom bezogen auf die Nennkapazität der Zelle. Der Wert 1 C bildet ab, dass einer Zelle mit einer Kapazität von 1 Ah für 60 Minuten ein Strom von 1 A entnommen werden kann. Analog liefert dieselbe Zelle für 30 Minuten einen Strom von 2 A, was einer Entladung mit 2 C entspricht [PARS12].

Tabelle 2.1 zeigt die Eigenschaft von verschiedenen Zellchemien.

Größe	**Lead-Acid**	**NiCd**	**NiMH**	**NaNiCl**	**Li-Ion**
Gravimetrische Energiedichte in $\frac{\mathrm{W\,h}}{\mathrm{kg}}$	20-35	30-50	50-80	80-100	90-200
Leitungsdichte in $\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{kg}}$	100	600	1000	170	300-4000
Kalendarische Lebensdauer in Jahren	3-5	5-15	<5	8-10	5-15
Zyklenfestigkeit in Zyklen	1200	2000	1000	1500	500-4000
Sicherheit (+/0/-)	+	+	+	0	-
Umweltverträglichkeit (+/0/-)	0	-	0	+	0

Tabelle 2.1: *Eigenschaften unterschiedlicher Batteriezellchemien [KLE12]*

Die gravimetrische Energiedichte ist praktisch das wichtigste Maß für eine Batteriezelle. Sie beschreibt das Vermögen der Zelle Energie bezogen auf ihr Eigengewicht zu speichern und ist damit direkt mit der Reichweite eines Fahrzeugs in Verbindung zu setzen. Sie wird aus der Ladung, der Spannung und dem Gewicht errechnet und ist die gespeicherte Energie der Zelle pro Masse. Ihre SI-Einheit ist $\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}}$.

Angaben im Bereich der Elektromobilität sind jedoch fast ausschließlich in $\frac{\mathrm{Wh}}{\mathrm{kg}}$ zu finden.

Nicht nur in automotiven, sondern auch in vielen anderen Anwendungen, wo eine möglichst hohe Energiedichte gefordert ist, werden Lithium-Ionen-Batterien eingesetzt. Sie weisen unter den heute industriell verfügbaren Sekundärzellen die höchste Energiedichte auf. Das Ragone-Diagramm, Abbildung 2.4, zeigt eine Gegenüberstellung unterschiedlicher Zellchemien bezogen auf Ihre Energie- und Leistungsdichte.

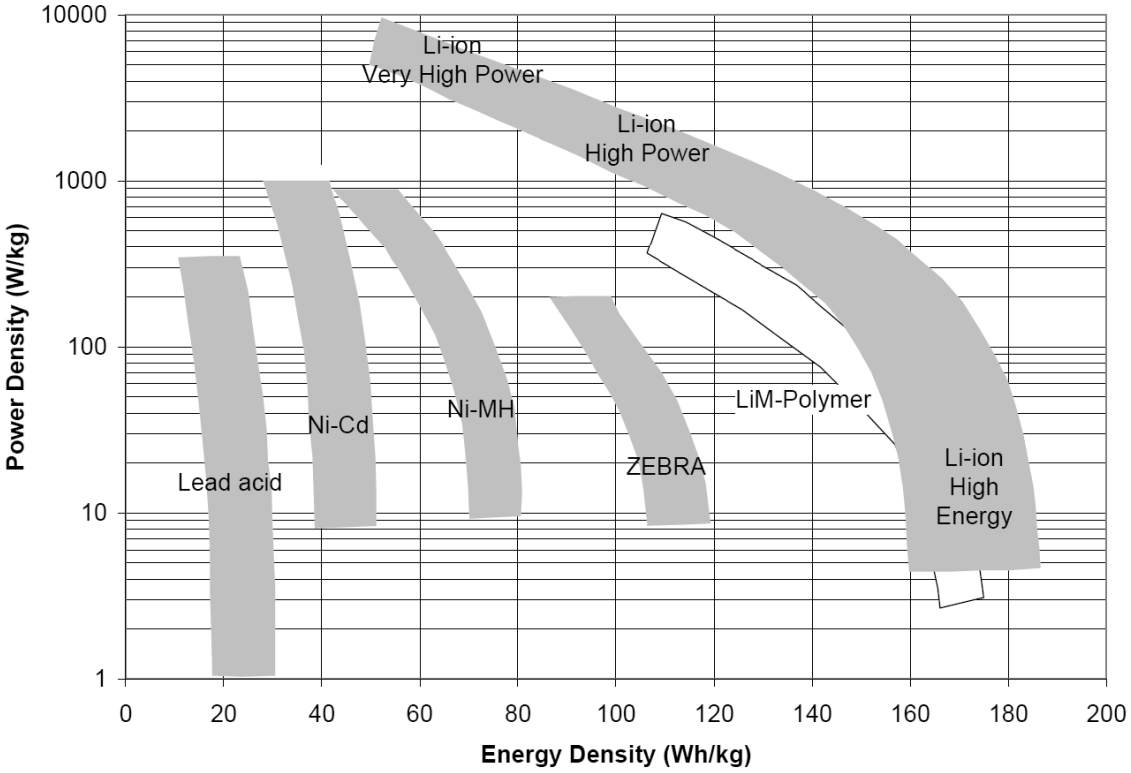


Abbildung 2.4: *Spezifische Leistungsdichte über spezifischer Energiedichte vgl. [BROU07], [KAL07]*

Im Folgenden wird ohne Beschränkung der Ansätze und Lösungen beispielhaft von Lithium-Ionen-Zellen ausgegangen. Sie sind aus heutiger Sicht auch für die Zukunft die vielversprechendste Technologie [BRUE13] und werden heute im automotiven Umfeld praktisch ausschließlich eingesetzt.

2.2.1 Lithium-Ionen-Zelle

Der Begriff Lithium-Ionen-Zelle versteht sich als Oberbegriff für unterschiedliche Kombinationen von aktiven Materialien, wobei als Basismaterial Lithium dient. An der chemischen Reaktion einer Lithium-Ionen-Zelle sind Kathode, Anode und das Elektrolyt beteiligt. Zwischen dem Kathoden- beziehungsweise Anodenmaterial werden die Lithium-Ionen über den Elektrolyten ausgetauscht (siehe auch Abschnitt 2.2).

Reines Lithium hat in der elektrochemischen Spannungsreihe ein hohes negatives Potential von $-3{,}05\,\mathrm{V}$. Damit ergibt sich ein großer Potentialunterschied zu anderen Materialien. Die Nennspannung von Lithium-Ionen-Zellen reicht von 2,9 V bis 4,0 V, abhängig von dem Material der Elektroden. Lithium hat ein geringes spezifisches Gewicht von $0{,}534\,\frac{\mathrm{g}}{\mathrm{cm}^3}$. Diese beiden Eigenschaften führen dazu, dass Lithium-Ionen-Zellen beeindruckende Werte bei Energie- und Leistungsdichte aufweisen und sich daher im Bereich portabler Anwendungen wie beispielsweise Mobiltelefonen durchgesetzt haben. Defizite der Lithium-Ionen-Zelle bestehen jedoch in Kosten, Sicherheit und der Umweltverträglichkeit, verglichen mit anderen bekannten Zellchemien.

Lithium-Ionen-Zellen weisen nicht nur in ihrer Energiedichte durchweg bessere elektrische Eigenschaften im Vergleich zu anderen heute verfügbaren Zellchemien auf (siehe Tabelle 2.1 und Abbildung 2.4). Energiedichten aktuell verfügbarer und eingesetzter Lithium-Ionen-Batterien betragen laut Herstellerangaben etwa $200\,\frac{\mathrm{W\,h}}{\mathrm{kg}}$ [WALL11]. In Labortests wurden Energiedichten von $400\,\frac{\mathrm{W\,h}}{\mathrm{kg}}$ gemessen [ENVIA12], was für ein Fahrzeug mit einer 100 kg schweren Batterie eine Reichweite von 320 km bedeuten würde, legt man einen Durchschnittsverbrauch von

125 $\frac{\mathrm{Wh}}{\mathrm{km}}$ [PIST09] zugrunde. Vergleicht man ein durch eine Lithium-Ionen-Batterie angetriebenes Fahrzeug mit einem Verbrennungsfahrzeug, liegt der Wert der Energiedichte der Batterie um den Faktor 60 unter der Energiedichte von beispielsweise Benzin mit 11 944 $\frac{\mathrm{Wh}}{\mathrm{kg}}$ [SPA11]. Dieser Faktor reduziert sich auf etwa 4,4, was in dem deutlich höheren Wirkungsgrad des elektrischen Antriebsstranges begründet ist, legt man Literaturangaben zugrunde [DAI05], [DAI12].

Die Formgebung einer Lithium-Ionen-Batterie, wie sie in Fahrzeugen eingesetzt wird, reicht von der zylindrischen und ovalen über die prismatische bis hin zur sogenannten Pouch-Zelle, eine in Folie eingeschweißte Batterieform auch Coffeebag genannt.



Abbildung 2.5: *Unterschiedliche Formgebung von Zellen (v. l. n. r. Pouch, prismatisch, zylindrisch)*

Abbildung 2.5 zeigt schematisch diese Grundformen von Lithium-Ionen-Zellen.

2.2.2 Alterung einer Lithium-Ionen-Zelle

Jede Komponente eines Fahrzeugs ist durch elektrische und mechanische Belastung einer gewissen Abnutzung unterlegen. Auch bei einer Lithium-Ionen-Zelle tritt eine Abnutzung über ihrer Betriebszeit auf. Die Zelle altert, das heißt es verringern sich zunehmend die verfügbare Kapazität und abgebbare Leistung. Auch die Sicherheit nimmt ab, da sich die Zelle im Betrieb mit zunehmendem Alter stärker erwärmt und damit einen Brand durch eine chemische Kettenraktion (Thermal Runaway) begünstigt. Darüber hinaus entstehen Gase, welche besonders bei Pouch-Zellen ein Platzen der Zelle verursachen können. Ursachen für dieses Verhalten sind mechanische und thermische Beanspruchung sowie chemische Effekte. Damit wird die Lebenszeit der Batteriezelle durch diese Faktoren begrenzt.

Die Alterung setzt sich zusammen aus der sogenannten kalendarischen Alterung und der zyklischen Alterung. Die kalendarische Alterung beschreibt Langzeiteffekte innerhalb der Batterie, die unabhängig von der Nutzung auftreten. Die zyklische Alterung stellt eine Abnutzung durch einen vollständigen Zyklus, sprich Laden und Entladen bis zu den zulässigen Grenzen, dar.

Die chemischen Alterungsprozesse in einer Batteriezelle sind sehr komplex. Die Abnahme der Leistungsfähigkeit oder der Kapazität ist nicht auf eine einzelne Ursache zurückzuführen, sondern auf viele verschiedene Prozesse und deren Auswirkungen. Analysen lassen meist nicht die isolierte Betrachtung eines einzelnen Prozesses zu, da sie gemeinsam auftreten und interagieren, was die Untersuchung stark erschwert [VET05].

Im Folgenden werden die beiden Alterungsmechanismen einer Batteriezelle kurz dargestellt, ohne auf deren chemische Ursachen einzugehen.

Kalendarische Alterung

Eine von der Benutzung unabhängige kalendarische Alterung im ruhenden Zustand wird physikalisch von zwei Parametern beeinflusst: der Lagertemperatur und dem Ladungszustand der Batteriezelle. Grundsätzlich sollte die Lagertemperatur und der Ladezustand, auch State of Charge (SoC) genannt, der Batterie möglichst niedrig sein [JOS06]. Ist die Restladung niedrig, muss innerhalb eines kurzen Zeitraums nachgeladen werden, da die Selbstentladung zu einer Tiefenentladung mit irreversiblen Schäden führen kann. Die Abbildungen 2.6 und 2.8 zeigen, wie der irreversible Kapazitätsverlust monoton sowohl mit der Temperatur als auch mit dem Ladezustand stark ansteigt. Auch die Selbstentladung steigt mit Temperatur und Ladezustand (siehe Abbildung 2.7). Es ist naheliegend zu vermuten, dass sich chemische Prozesse durch den höheren Ladezustand und besonders durch die höhere Temperatur beschleunigen.

Die Auswirkungen dieser Parameter können durch die unterschiedliche Batteriechemie und die Bauform sowie Baugröße von Lithium-Ionen-Zellen qualitativ als auch quantitativ variieren. Vergleicht man Abbildung 2.6 mit Abbildung 2.8, verläuft der Kapazitätsverlust in beiden Fällen monoton steigend. In Abbildung 2.6 scheint der Kapazitätsverlust exponentiell mit zunehmender Temperatur zu steigen, während in Abbildung 2.8 die Steigung des Verlustes abnimmt.

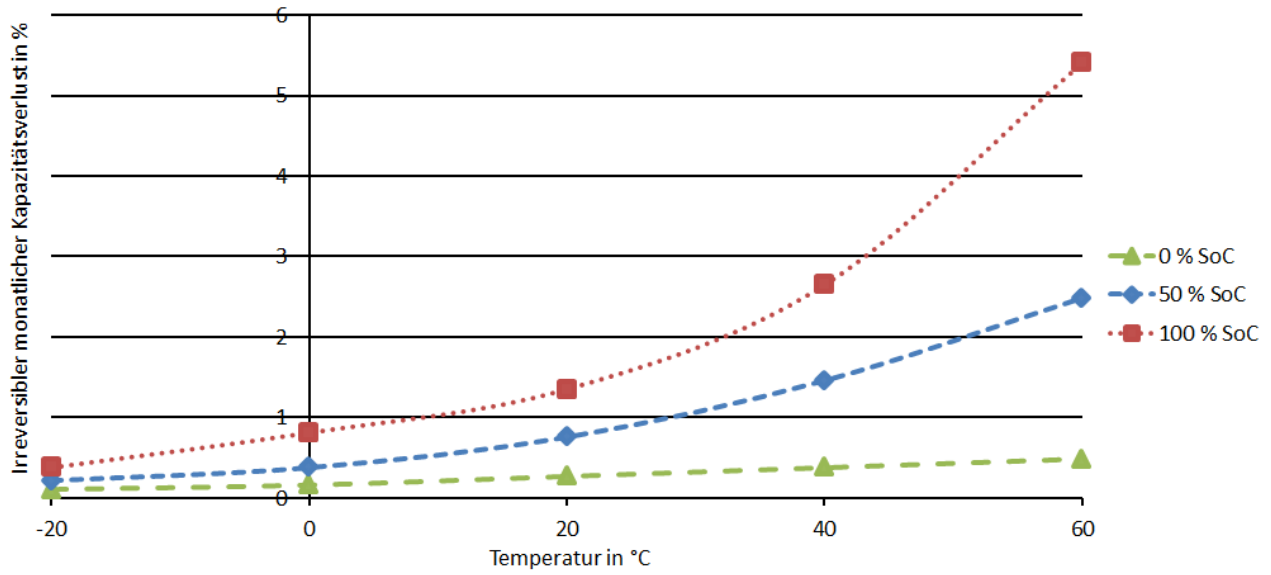


Abbildung 2.6: *Auswirkungen von Temperatur und Ladezustand auf Kapazitätsverlust einer lagernden Lithium-Ionen-Batteriezelle vgl. [JOS06]*

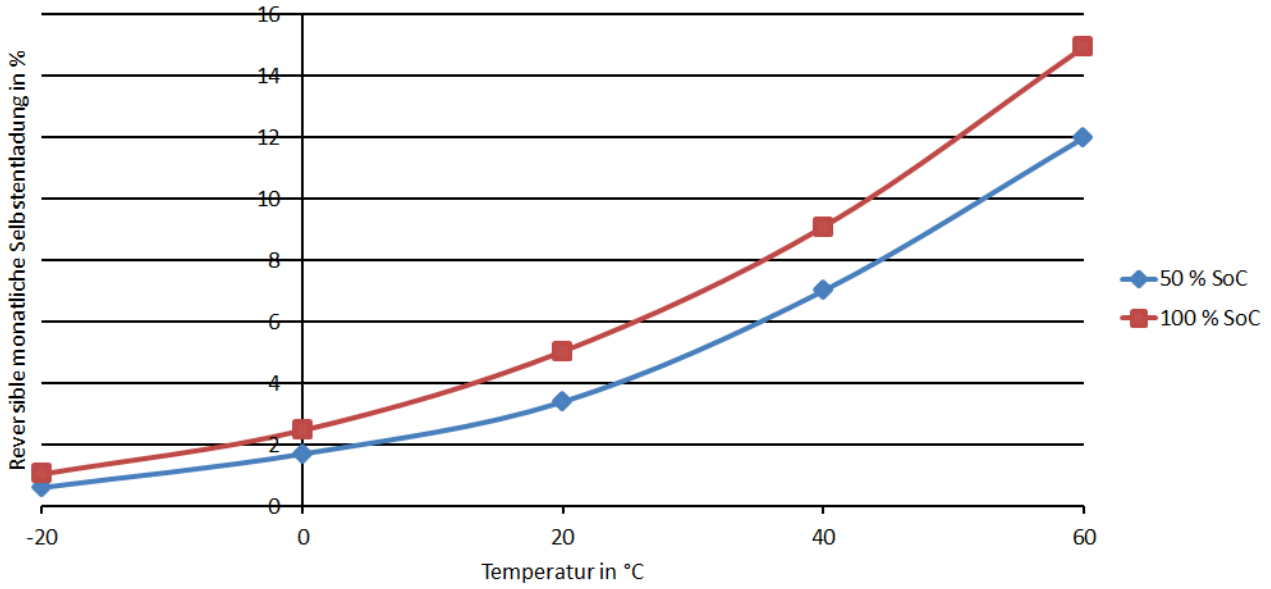


Abbildung 2.7: *Auswirkungen von Temperatur und Ladezustand auf die Selbstentladung einer lagernden Lithium-Ionen-Batteriezelle vgl. [JOS06]*

In Abbildung 2.6 liegt der Kapazitätsverlust bei 50 °C und 100 % SoC bei etwa 4 %/Monat was rechnerisch 38,7 %/Jahr entspricht. Abbildung 2.8 weist bei gleichen Randbedingungen ebenfalls einen Verlust von 38 %/Jahr auf.

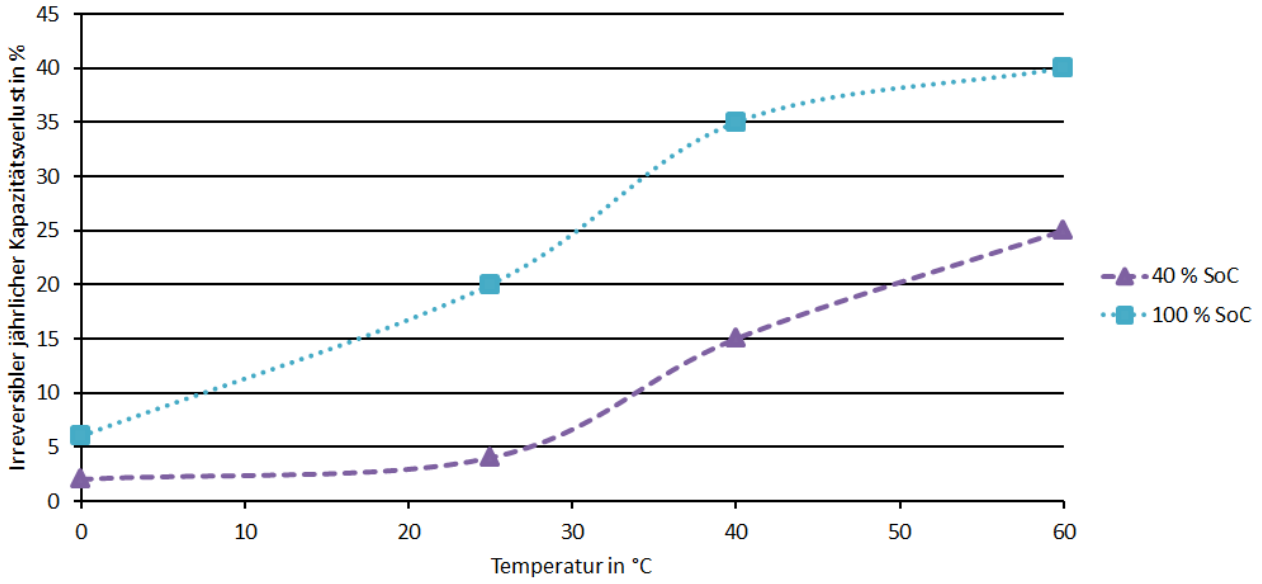


Abbildung 2.8: *Auswirkungen von Temperatur und Ladezustand auf Kapazitätsverlust einer lagernden Lithium-Ionen-Batteriezelle vgl. [BUCH13]*

Die irreversible kalendarische Alterung stellt besonders unter der elektromobilen Anwendung ein Problem dar, da das Fahrzeug meist teilentladen abgestellt, danach direkt geladen wird und nach der Aufladung größtenteils im vollgeladenen Zustand lange steht. Die Selbstentladung erweist sich hingegen als weniger problematisch, da abgestellte Fahrzeuge meist dauerhaft mit dem Netz verbunden sind oder innerhalb eines kurzen Zeitraums wieder bewegt werden. Das längere Abstellen eines Elektrofahrzeugs ohne Verbindung zu einer Ladequelle tritt im Alltag selten auf. Bei einem zu 100 % geladenem Fahrzeug ist bei 25 °C eine Selbstentladung von etwa 6 %/Monat beziehungsweise 0,2 %/Tag zu verzeichnen (siehe Abbildung 2.7).

Zyklische Alterung

Die zyklische Alterung der Batterie hängt, verglichen mit der kalendarischen Alterung, nicht nur von Temperatur und Ladezustand sondern auch von der Art und Weise der Belastung einer Batteriezelle ab. Die Alterung, welche durch die Zyklisierung der Batterie verursacht wird, wird als Zyklusfestigkeit angegeben. Die Zyklusfestigkeit spiegelt die Anzahl der Zyklen unter einer bestimmten Belastung wieder, bis eine gewisse Grenze der Kapazität bezogen auf ihre Nennkapazität erreicht ist.

Die Betriebstemperatur einer Batteriezelle wird von den meisten Herstellern zwischen −30 °C bis 60 °C definiert. Jedoch reduziert sich die Zyklenfestigkeit dramatisch mit steigender Temperatur, das heißt die Kapazität nimmt schneller ab. Dies ist vergleichbar mit der kalendarischen Alterung [VEZ09].
Auch der Lade- beziehungsweise Entladestrom hat einen großen Einfluss auf die Lebensdauer der Batteriezelle. So ergibt sich bei Belastung mit dem dreifachen Nennstrom (3 C) gegenüber der Belastung mit dem einfach Nennstrom (1 C) eine um 40 % reduzierte Zyklenfestigkeit [VEZ09].
Die Zellen der 330 V-Traktionsbatterie eines Mitsubishi iMieV haben eine Nennkapazität von 50 A h, der Motor eine Spitzenleistung von 49 kW, woraus sich eine Spitzenbelastung von 3 C ergibt. Eine erhöhte Belastung der Batterie von 3 C ist bei Abruf der Spitzenleistung gegeben. Dadurch, dass diese Spitzenbelastung im für Elektrofahrzeuge bevorzugten urbanen Umfeld vergleichsweise selten auftritt, wird diese erhöhte Belastung oft vernachlässigt. Versuche haben gezeigt, dass das Fahrzeug beispielsweise beim Einsatz in einer bergigen Umgebung überwiegend im Spitzenlastbereich bewegt wird, was zu einer erhöhten Alterung und damit geringeren Zyklenfestigkeit führen kann [BRIX12].

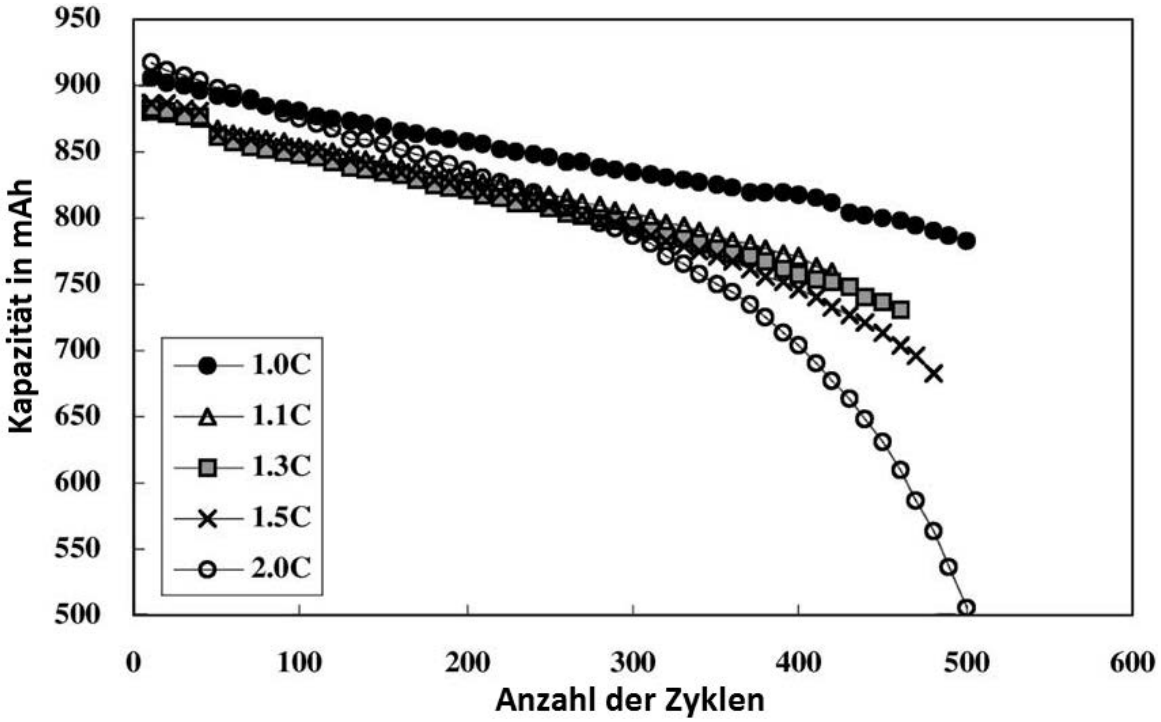


Abbildung 2.9: *Abhängigkeit der Zyklusfestigkeit vom Entladestrom [CHOI02]*

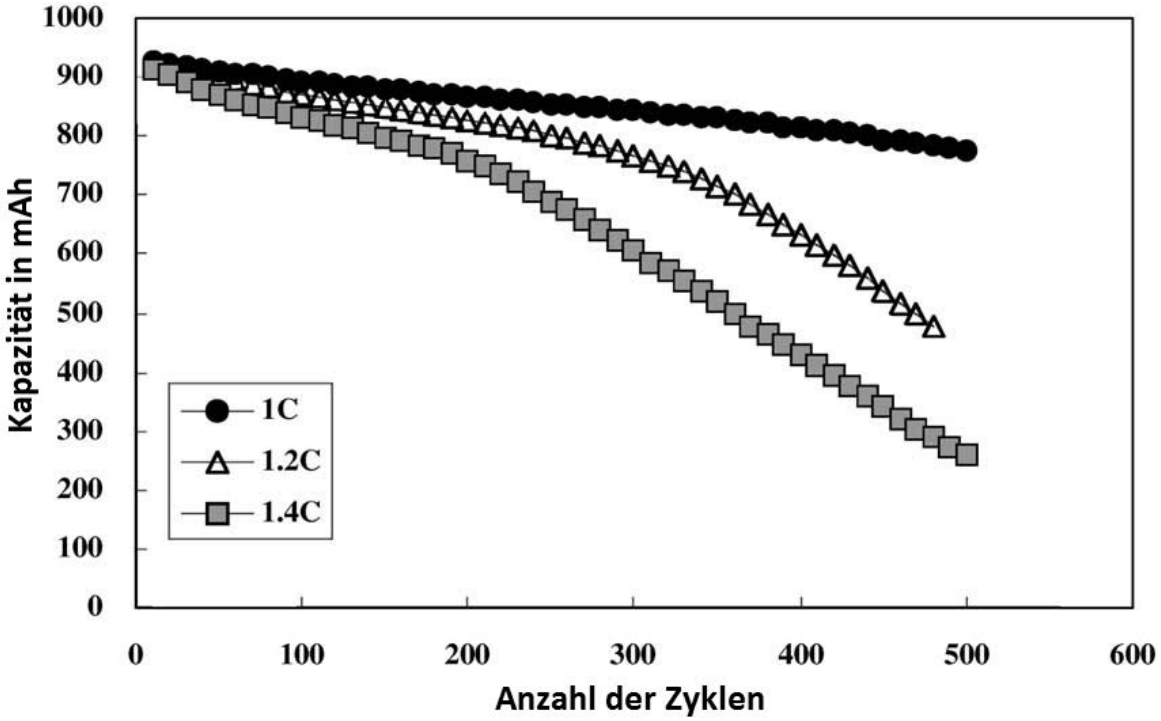


Abbildung 2.10: *Abhängigkeit der Zyklusfestigkeit vom Ladestrom [CHOI02]*

In einer Untersuchung werden Versuchsergebnisse einer kleinen prismatischen Lithium-Ionen-Zelle mit einer Nennkapazität von 900 mA h vorgestellt [CHOI02]. Die Zyklusfestigkeit sinkt stark mit Zunahme des Entlade- oder Ladestroms (siehe Abbildungen 2.9 und 2.10).

Würde eine größere Batterie in einem Fahrzeug eingesetzt, um die Belastungen und damit die Alterung geringer zu halten, wäre dies mit erhöhten Kosten und einem erhöhten Gewicht verbunden. Es ist zu diskutieren, wo das Optimum liegt, welches ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten gerecht wird.
Ein Szenario ist es, die Batterie günstig und schlank herzustellen und dafür in regelmäßigen Abständen zu tauschen, da die Qualität der Batteriezellen sinken würde [DIN10]. Dies widerspricht dem angestrebten und sinnvollen Ziel der USABC, eine Lebenszeit der Batterie von 10 Jahren zu erreichen (siehe Abschnitt 2.1).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass hohe Ströme, hohe Temperaturen und die Annäherung an die Lade- beziehungsweise Entladegrenze die Zyklusfestigkeit einschränken.

2.2.3 Lebenszyklus einer Zelle

Umweltschutz und der schonende Umgang mit Ressourcen stehen seit der Einführung von Elektrofahrzeugen mehr im Fokus des Käufers. Ein Elektrofahrzeug stößt bei seinem Betrieb lokal keine Emissionen aus. Emissionen entstehen aber durch die Produktion des Fahrzeuges selbst und die Produktion von elektrischer Energie für die Batterie. Auch wenn diese Energie aus regenerativen Quellen stammt, entstehen Emissionen durch die Herstellung dieser Energiewandler. Das besonde-

re Augenmerk unter ökologischen Gesichtspunkten liegt dabei auf der Batterie. Sie wird aufwendig unter Einsatz besonders seltener und damit teurer Rohstoffe produziert. Batterien enthalten auch gesundheits- und umweltgefährdende Stoffe wie Schwermetalle. Somit sollten auch die verwendeten Materialien hinsichtlich Sicherheit und Gefährdungspotential sowie Wiederverwertbarkeit beziehungsweise Entsorgung analysiert werden. Soll eine vollständige Betrachtung, beispielsweise durch einen Hersteller erstellt werden, sollte auch auf die Einflüsse geachtet werden, welche durch die Erzeugung von Energie für das Laden des Fahrzeugs entstehen.

Eine Aufbereitung ist unter heutigen Gesichtspunkten wirtschaftlich sinnvoll. Um ökologisch und ökonomisch eine Batterie bewerten zu können, ist die Betrachtung ihres gesamten Lebenszyklus (Life-Cycle) notwendig (siehe Abbildung 2.11).

Der Lebenszyklus der Zelle beginnt mit ihrer Fertigung. Durch Fertigungstoleranzen unterscheiden sich die Zellen hinsichtlich ihrer Eigenschaften, vor allem hinsichtlich ihrer Kapazität. Durch die Reihenschaltung im Batteriesystem (siehe Abschnitt 2.1) bestimmt die schwächste Zelle die Gesamtleistungsfähigkeit der Batterie. Besonders schwache Zellen sind Produktionsausschuss und können nicht ohne weitere Maßnahme in eine Traktionsbatterie übernommen werden (siehe auch [MO13]).

Die Überführung in ein Batteriesystem ist der letzte Produktionsschritt in der Batteriefertigung. Zellen werden in einem Gehäuse in Reihe geschaltet und mit einer Kühlung sowie einem BMS ausgestattet. Die Integration erfordert einen hohen Montageaufwand, da nicht nur die Zellen elektrisch miteinander verbunden werden müssen, sondern das BMS, je nach Architektur, verkabelt werden muss. Die Überführung in ein Batteriesystem unterscheidet sich von Fahrzeugtyp zu Fahrzeugtyp in Anzahl der Zellen und ihrem mechanischen Aufbau.

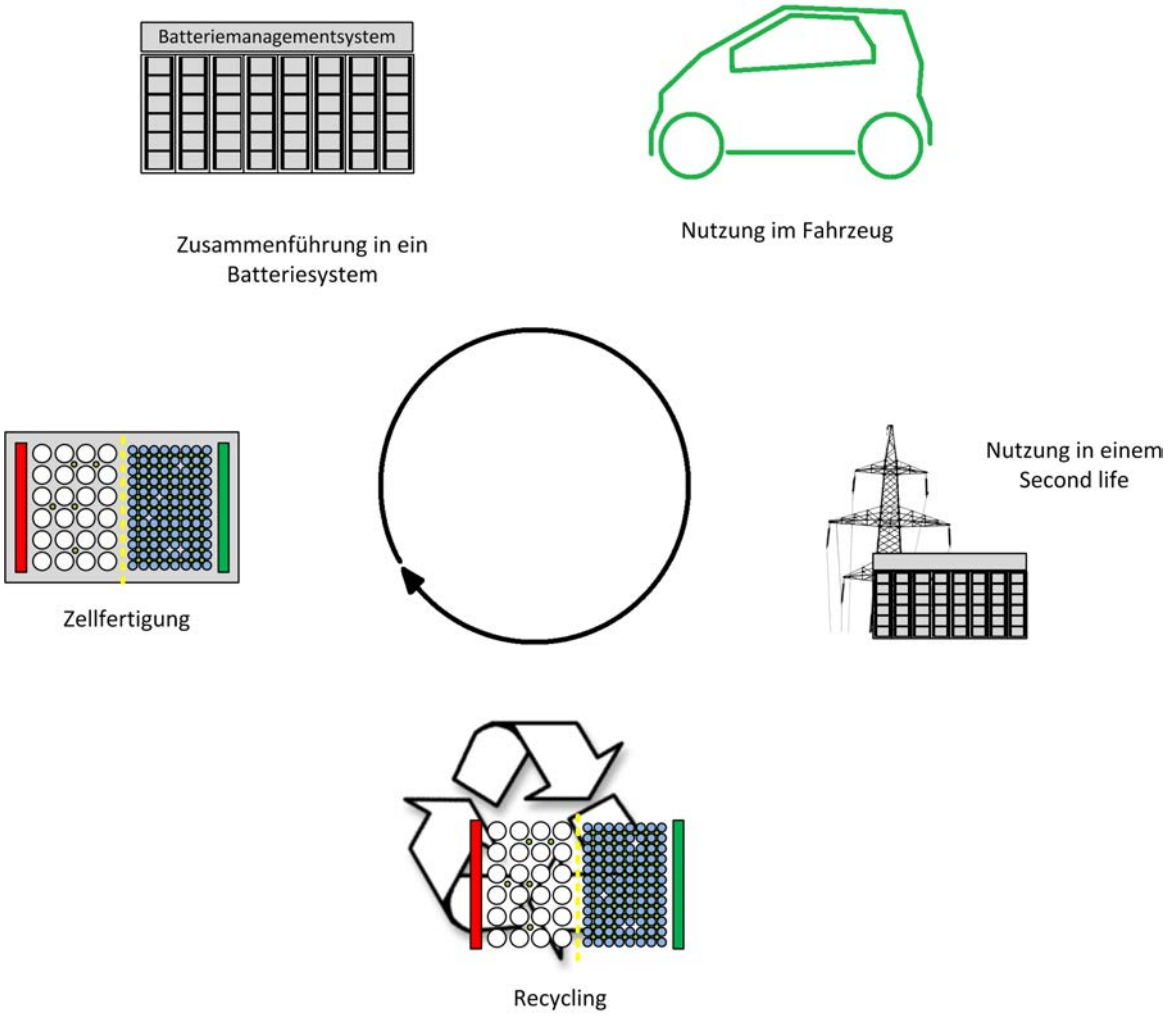


Abbildung 2.11: *Lebenszyklus einer Lithium-Ionen-Batterie*

Bei der Nutzung im Fahrzeug wird die Zelle belastet. Hohe Ströme oder Temperaturen führen zu einer starken Alterung und erhöhen die Ausfallrate einer Zelle (siehe Abschnitt 2.2.2). Diese Informationen der Nutzung werden nicht in der Batterie erfasst, sondern im Fahrzeugspeicher des VMS abgelegt.

Nach der Nutzung im Fahrzeug wird der Energiespeicher einem weiteren Einsatzzweck zugeführt. Die Wertermittlung gestaltet sich schwierig, da die Vorgeschichte der einzelnen Zelle unbekannt ist.

Das Recycling ist ein aufwendiger, aber notwendiger Schritt im Lebenszyklus der Zelle. Durch unterschiedliche Bauformen und Ausprägungen der Batteriemanagementsysteme wird eine Automatisierung des Recyclings erschwert [DOR13].
Im Weiteren soll auf die Zellfertigung, deren Zusammenführung in ein Batteriesystem, Nutzung im First Life und Second Life sowie auf die Aufbereitung einer Batteriezelle unter technischen Gesichtspunkten eingegangen werden.

Zellfertigung

In der Literatur wird die Zellenfertigung in acht grundsätzlichen Produktionsschritten beschrieben [SCH11]. Abbildung 2.12 zeigt die Abfolge der einzelnen Schritte. Jeder dieser Schritte birgt besondere Anforderungen an die Prozessparameter. Ein Indikator für einen guten Produktionsprozess von Batteriezellen ist die geringe Streuung der Zellkapazitäten [MO13]. Die Zusammensetzung von Materialien und Prozessparametern bestimmt demgegenüber die elektrischen Eigenschaften der Batteriezellen. Eine gute Fertigung sollte so aufgebaut sein, dass Fremdpartikel in den entstehenden Zellen vermieden werden [MO13]. Darüber hinaus sollte der Ausschuss möglichst gering sein. Es sind 80 % nutzbare Produktionsmenge anzustreben, mit 90 % befindet man sich in der Spitzengruppe der Hersteller [MO13].

- **Mischen:** In diesem Schritt werden die chemischen Komponenten der Elektrodenschicht zum sogenannten Slurry gemischt. Die besondere Anforderung bei diesem Schritt ist die Einhaltung des richtigen Mischungsverhältnisses, welches direkten Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Batterie hat. Das Mischen im Chargenprozess (Batch-Prozess) dauert mehrere Stunden. Eine Verkürzung dieses Prozessschrittes verspricht Kosteneinsparungen.

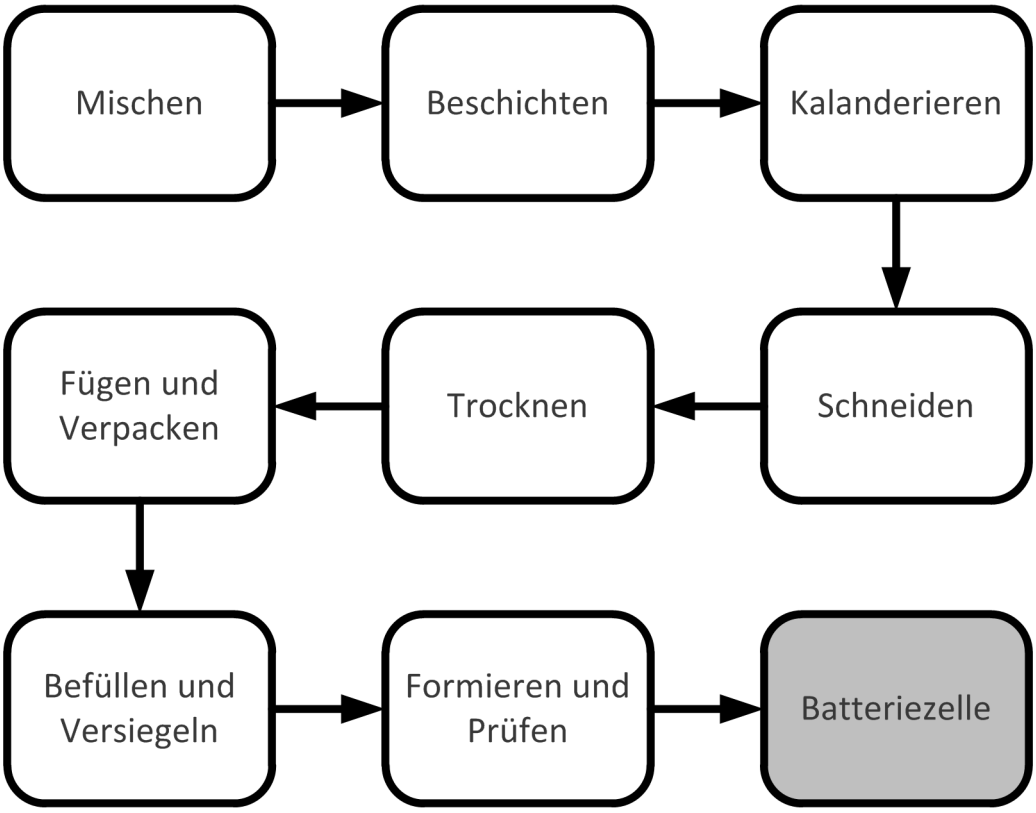


Abbildung 2.12: *Einzelne Schritte bei der Herstellung einer Lithium-Ionen-Batteriezelle*

- **Beschichten:** Die Suspension (Slurry) wird auf die Elektrodenfolien aufgetragen. Dieser empfindliche Prozessschritt erfordert wiederum eine hohe Reproduzierbarkeit und Gleichmäßigkeit. Für die Erhöhung der Produktivität hier ist ein höherer Durchsatz notwendig. Ein weiterer Ansatzpunkt zur Optimierung ist die doppelseitige Beschichtung [KLE12]. Bei diesem Prozessschritt wird ein Lösungsmittel verwendet, welches die Viskosität des Slurry bestimmt und eine rasche Trocknung ermöglicht. Die Rückgewinnung des umweltgefährdenden Lösungsmittels ist mit hohen Kosten verbunden, weswegen Lösungsmittelfreiheit angestrebt wird [MO13].

- **Kalandrieren:** Mittels Walzen der Elektrodenfolien wird eine definierte Schichtdicke und eine gewisse Oberflächenporosität hergestellt. Eine hohe Präzision wirkt sich dabei auf die Qualität der Zelle aus [MO13].

- **Schneiden:** Bei diesem Prozessschritt wird die durchgängige Folie in einzelne Elektrodenblätter geschnitten. Die verwendeten Schneideelemente verschleißen mit der Zeit und es kann sich ein Grat an der Schnittkante bilden, welcher die Leistungsfähigkeit und Sicherheit der produzierten Batteriezelle beeinträchtigen kann [MO13]. Der Einsatz von anderen Schneidetechniken wie beispielsweise das Laser-Schneiden, kann die Qualität dieses Prozessschrittes verbessern. Auch bei diesem Schritt strebt man nach einer höheren Geschwindigkeit, um den Durchsatz und damit die Produktivität zu steigern.

- **Trocknen:** Bei diesem Prozessschritt wird die Elektrodenfolie getrocknet, das Lösungsmittel wird entzogen. Dieser Prozessschritt ist hinsichtlich der Qualität als weniger kritisch zu bewerten, hängt jedoch von der Art des Beschichtungsprozesses (Lösungsmittelfreiheit) ab. Die Energieeinkopplung hat direkten Einfluss auf die Dauer dieses Prozessschrittes. Hier besteht Optimierungspotential der Energieeffizienz, abhängig von der Prozesszeit.

- **Fügen und Verpacken:** In diesem Fertigungsschritt werden die Elektrodenfolien von Anode und Kathode sowie Separator aufeinandergelegt, gewickelt oder gefaltet und mit den Kontaktelektroden verbunden. Die Technik bestimmt den späteren Formfaktor und die Prozesszeit. Im schnellen Wickelprozess werden Rundzellen oder Ovalzellen gefertigt, im Faltprozess sogenannte Coffeebags. Elektrodenfolien mit hohen Schichtdicken haben einen begrenzten Biegeradius, weswegen für diese Folien das Stapeln in Frage kommt, beispielsweise in prismatischen Zellen. Je nach Technologie wird die Zelle foliert oder in ein Gehäuse eingelegt. Die Präzision dieses Fügeprozesses hat direkten Einfluss auf die Eigenschaften der Zelle. Fremdpartikel müssen unbedingt vermieden werden [MO13].

- **Befüllen und Versiegeln:** In die Elektrodenpakete wird Elektrolyt eingefüllt und die Zelle anschließend verschlossen. Anforderung hierbei ist das gleichmäßige Einbringen von Elektrolyt in die Zelle. Auch hier kann die Produktivität durch Geschwindigkeitserhöhung des Prozessschrittes verbessert werden. Darüber hinaus sollte dieser Schritt unter inerten Bedingungen durchgeführt werden [MO13].

- **Formieren und Prüfen:** Den Abschluss der Zellfertigung bildet das Formieren und Prüfen. Die Zelle wird dabei elektrisch konditioniert, einer Wärmelagerung unterzogen, formiert und entgast [GUT12]. Abschließend wird sie einem Test unterzogen. Dieser Prozessschritt beinhaltet eine lange Lagerzeit für die Tests. Die Dauer hängt von den eingesetzten Materialien und der Verarbeitung der vorangegangenen Prozessschritte ab. Ziel ist die Verkürzung der Lagerzeit durch Anpassung der Materialien beziehungsweise Prozessschritte. Ein weiteres Ziel ist es, die Alterungsbeständigkeit der Zelle durch das Formieren zu erhöhen [MO13].

Prozessschritt	Qualitätsmerkmal	Optimierungspotenzial
Mischen	Reproduzierbar gleiche Mischungen	Erhöhung der Mischgeschwindigkeit
Beschichten	Reproduzierbarkeit, Gleichmäßigkeit	Erhöhung des Durchsatzes, Lösungsmittelfreiheit
Kalandrieren	Präzision	Erhöhung der Geschwindigkeit
Schneiden	Gratfreiheit	Erhöhung der Geschwindigkeit
Trocknen	-	Erhöhung der Geschwindigkeit und Energieeffizienz
Fügen und Verpacken	-	Erhöhung der Präzision
Befüllen und Versiegeln	Gleichmäßigkeit	Erhöhung der Durchdringungsgeschwindigkeit
Formieren und Prüfen	Alterungsbeständigkeit der Zelle	Reduktion der Testdauer

Tabelle 2.2: *Übersicht über die einzelnen Produktionsschritte bei der Zellfertigung [DOR13], [MO13]*

Tabelle 2.2 bildet die einzelnen Prozessschritte mit ihrem Qualitätsmerkmal und Optimierungspotential ab.

Zusammenführung in ein Batteriesystem

Wie im Produktionsprozessschritt „Fügen und Verpacken“ und in Abschnitt 2.2.1 bereits erwähnt, gibt es verschiedene Bauformen von Lithium-Ionen-Zellen, welche hinsichtlich des Fertigungsprozesses und der Eigenschaften unterschiedliche Vor- und Nachteile aufweisen.

- **Rundzelle oder Ovalzelle:** Die Rundzelle entsteht durch das Aufwickeln von Anode, Kathode und Separator. Dieser Wickel wird in ein festes Gehäuse eingebracht. Diese Bauform findet schon sehr lange Verwendung, daher besteht eine große Fertigungserfahrung [MO13]. Weiterhin ist die Rundzelle mechanisch sehr robust und dicht. Nachteilig wirkt sich die geometrische Form bei der Kühlung und der Überführung in einen Zellverbund aus, da sie vorhandenen Bauraum nicht optimal ausnutzen kann [NOW13].

- **Prismatische Zelle:** Hier werden Separator und die Aktivmaterialien meist in einer Z-Wicklung, welche mäanderförmig verläuft, miteinander verbunden und in ein prismatisches Gehäuse eingebracht. Eine andere Möglichkeit besteht im Zusammenfügen mehrerer geschnittener Blätter von Aktivmaterialien und deren Einbringung in ein prismatisches Gehäuse. Die prismatische Zelle bietet eine sehr hohe Packdichte und kann aufgrund ihrer Form besonders einfach verbaut werden, weswegen sie bei Traktionsbatterien sehr oft Anwendung findet. Die Produktion gestaltet sich jedoch durch die aufwendi-

gere Wickel- oder Schneidetechnik und das Einbringen in das Gehäuse komplizierter [MO13]. Außerdem hat sie durch das Gewicht des Gehäuses eine niedrigere Energiedichte im Vergleich zu einer Pouch-Zelle.

- **Pouch-Zelle (Coffeebag):** Diese Zelle besteht aus geschichteten Aktivmaterialien. Anders als die prismatische oder runde Zellform, hat die Pouch-Zelle kein festes Gehäuse, sondern wird von einer preiswerten aluminiumbeschichteten Folie umgeben, welche auch eine effektive Kühlung ermöglicht und aufgrund des geringen Gewichts die Energiedichte maximiert [DOR13], [NOW13]. Diese Zelle ist aber auch sehr empfindlich gegen mechanische Beanspruchung. Bei dem Betrieb von Lithium-Ionen-Zellen können Gase (siehe auch Abschnitt 2.2.2) entstehen, wodurch sich dieser Zelltyp wegen des fehlenden festen Gehäuses und damit fehlenden Gegendrucks, aufblähen kann. Des Weiteren ist die Schweißnaht der Zelle für Luft und Wasser nicht dauerhaft undurchlässig, wodurch die Zelle im Vergleich zum festen Gehäuse weniger langzeitstabil ist [MO13], [DOR13].

Die Vor- und Nachteile der verschiedenen Bauformen werden in Tabelle 2.3 nochmals übersichtlich zusammengefasst.

Bauform	Vorteil	Nachteil
Rund bzw. Oval	Etablierter Produktionsprozess, mechanisch robust, hohe Lebensdauererwartung	Wenig platzsparend, schwierig zu kühlen
Prismatisch	hohe Packdichte, einfache Konstruktion einer Batterie	Komplizierter Produktionsprozess, geringere Energiedichte
Pouch	billig, gut zu kühlen, höhere Energiedichte	Empfindlich für Gasung, mechanisch empfindlich, weniger langzeitstabil

Tabelle 2.3: *Vor- und Nachteile der Bauform von Lithium-Ionen-Zellen*

Nach der Produktion der Zellen werden diese für die Zusammenführung in ein Batteriesystem oft über weite Strecken transportiert. Eine Studie empfiehlt daher die regionale Produktion von Batteriezellen [SCH11]. Der Transport ist grundsätzlich mit Risiken verbunden, die sich beispielsweise auf dem Seeweg durch große Temperaturunterschiede und das leitfähige Salzwasser verschärfen. Darüber hinaus erschweren Sicherheitsbestimmungen den Transport, da Batteriezellen als Gefahrgut eingestuft werden [DOR13].

Nutzung der Batteriezelle

Das fertige Batteriesystem wird für seinen Hauptzweck, sein sogenanntes First Life, installiert. Im Fall der Elektromobilität wird es in das Fahrzeug - meist fest - integriert. An dieser Stelle sei der Vollständigkeit halber darauf hingewiesen, dass unter der Leitung der Firma Better Place ein System entwickelt wurde, welches den einfachen Wechsel der ganzen Batterie, als Ersatz für das Laden dieser, erlaubt. Die feste Integration in das Fahrzeug kann sich auch nachteilig beim Defekt einer einzelnen Zelle, verursacht beispielsweise durch einen Fertigungsfehler, auswirken, da eine Reparatur, insbesondere in kleinen Werkstätten, nicht umsetzbar ist. Die Nutzung der Batteriezelle führt aufgrund der zyklischen Alterung zu einem immer weiter voranschreitenden Kapazitätsverlust (siehe Abschnitt 2.2.2). Im Bereich der Elektromobilität ist das Lebensende einer Traktionsbatterie erreicht, wenn sie 80 % ihrer ursprünglichen Kapazität erreicht hat [DIN10]. Die Lebenszeit einer Batterie sollte der Lebenszeit des Fahrzeugs entsprechen. Das United States Advanced Battery Consortium gibt als Zielgröße für diese Zeit 10 Jahre an. Legt man Literaturwerte für die Alterung einer Batteriezelle (siehe Abschnitt 2.2.2) zugrunde ist ersichtlich, dass dieses Ziel bei weitem noch nicht erreicht werden kann. Eine

Batterie mit einem mittleren SoC von 40 % und einer mittleren Temperatur von 25 °C hat nach [BUCH13] eine kalendarische Alterung von 4 %/Jahr. Damit ergibt sich rechnerisch eine Lebensdauer von etwa 5,47 Jahren. Hinzu kommt der Alterungseffekt durch die Zyklisierung. Zur Umsetzbarkeit dieser Forderung sind Überlegungen notwendig weitere Ansätze zu finden, welche die Lebensdauer der Batteriezelle verlängern.

Second Life

Die Zelle kann nach der Nutzung im First Life einem zweiten Nutzen zugeführt werden, dem sogenannten Second Life. Eine Second Life Anwendung ist beispielsweise die Pufferung von Energie für die häusliche Versorgung. So lassen sich sogenannte Energieinseln, begrenzte weitgehend von externer Energiezufuhr unabhängige Teilnetze, realisieren und Energieproduktion von Energieverbrauch entkoppeln. Beispielsweise kann am Tag produzierte Sonnenenergie am Abend beziehungsweise in der Nacht genutzt werden.

Abbildung 2.13 zeigt den Entwurf für einen Lebenszyklus von Batteriezellen in einem First, Second und einem weiteren Lebenszyklus, dem Third Life. Zellen, welche die Produktionskriterien des Herstellers erfüllen (grün), werden für die Verwendung in einem Elektrofahrzeug vorgesehen, während Zellen, die dieses Kriterium nicht erreichen (orange) direkt einem Second Life, hier dargestellt als Photovoltaik-Pufferbatterie, zugeführt werden. Während der Betriebszeit des Fahrzeugs können im Rahmen einer Wartung ungleichmäßig stark gealterte Module dem Second Life beziehungsweise Third Life (rot) zugeführt und durch neue ersetzt werden, wenn dies die Architektur des Fahrzeugs zulässt. Dies ist heute jedoch nicht der

Fall [DOR13]. Die Austauschbarkeit, beispielsweise im Rahmen einer Wartung, oder die Überführung in ein Second Life kann durch die Einführung eines ganzheitlichen Standards stark vereinfacht werden.

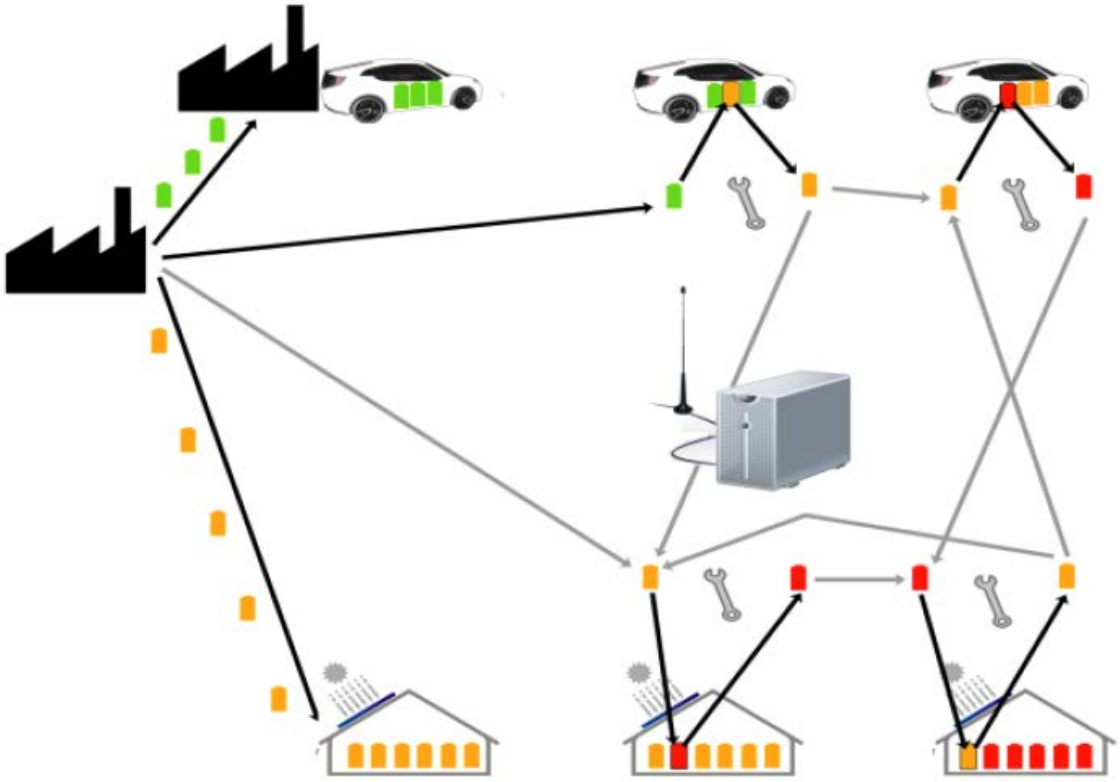


Abbildung 2.13: *Beispiel für den Einsatz von produzierten Lithium-Ionen-Zellen [BRAND12]*

Wird die Batterie schonend im Fahrzeug verwendet, erhöht sich ihr Wert bei dem Übergang in das Second Life und kann somit den Wertverlust der Batterie im First Life deutlich senken [BAR11].

Dennoch wird die Alterung der Zelle fortschreiten, bis ihre Aufnahmekapazität auch für den Einsatzzweck im Third Life unzureichend ist. Somit ist ein wirtschaftlicher Betrieb der Zelle nicht mehr möglich und sie wird der Verwertung zugeführt. Grund dafür sind die Lade- und Entladeverluste durch den gesteigerten Innenwiderstand aufgrund der hohen Alterung.

Recycling der Batteriezelle

Zunächst sind Batteriezellen aufgrund der verwendeten Materialien ein Gefahrgut, weswegen sie besonders entsorgt werden müssen. Für Batteriezellen gelten gesetzliche Vorgaben, wie die EU-Direktive 2006/66/EC oder das Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Batterien und Akkumulatoren (BattG), das eine Mindestsammelquote von 50 % von sogenannten „sonstigen Industriebatterien“ bis 2016 und deren Verwertung (Recycling) vorschreibt [EU06], [DOR13]. Auch ist das Recycling gegenüber der Verwendung von Primärmaterial ökologisch sinnvoll und entkoppelt ein rohstoffarmes Land wie Deutschland ökonomisch von den volatilen Rohstoffmärkten [STE12]. Dies ist auch im Sinne der Rohstoffstrategie der Bundesregierung [BMWI10]. Dennoch ist das Recycling von Batteriezellen heute größtenteils noch in der Entwicklungsphase.

Das hydrometallurgische Recycling, die Trennung der metallischen Elemente in einem nasschemischen Prozess, kann in 7 Schritten beschrieben werden (siehe Abbildung 2.14) [STE12].

- **Demontage:** Ziel dieses Schrittes ist die Gewinnung der einzelnen Zellen. Dabei werden die Zellen aus dem Batteriegehäuse entnommen und von ihrer Elektronik getrennt. Die meisten der heute verwendeten Batterien weisen unterschiedliche Bauformen und geometrische Maße auf, was die vollautomatische Demontage nahezu unmöglich macht.

- **Entladung:** Um Sicherheit zu gewährleisten, müssen die einzelnen Zellen entladen werden. Auch hier erweisen sich die unterschiedlichen Formfaktoren und Eigenschaften der Batteriezellen als problematisch. Anlagen müssen sehr flexibel sein, um die Zelle handhaben und kontaktieren zu können.

- **Zerkleinerung:** Bei diesem Prozesschritt wird die Zelle mechanisch zerkleinert. Er findet sich beim Recycling unterschiedlichster Güter wieder.

- **Elektrolytrückgewinnung:** Das flüssige Elektrolyt wird mit Hilfe eines Lösungsmittels chemisch aus den zerkleinerten Zellen separiert.

- **Mechanische Aufbereitung:** Die zerkleinerten Zellen ohne Elektrolyt werden mit in der Recyclingtechnologie etablierten Methoden in ihre einzelnen Bestandteile wie Kunststoff oder Kupfer getrennt.

- **Hydrometallurgie:** Bei der Hydrometallurgie werden die einzelnen Elemente aus einer wässrigen Lösung in hoher Reinheit gewonnen, so dass sie für einen weiteren Einsatz verwendbar werden.

- **Aktivmaterialsynthese:** Dieser letzte Schritt ist der direkte Übergang zu einem angeschlossenen Produktionsprozess. Die Materialien werden wieder in neue Aktivmaterialien umgewandelt.

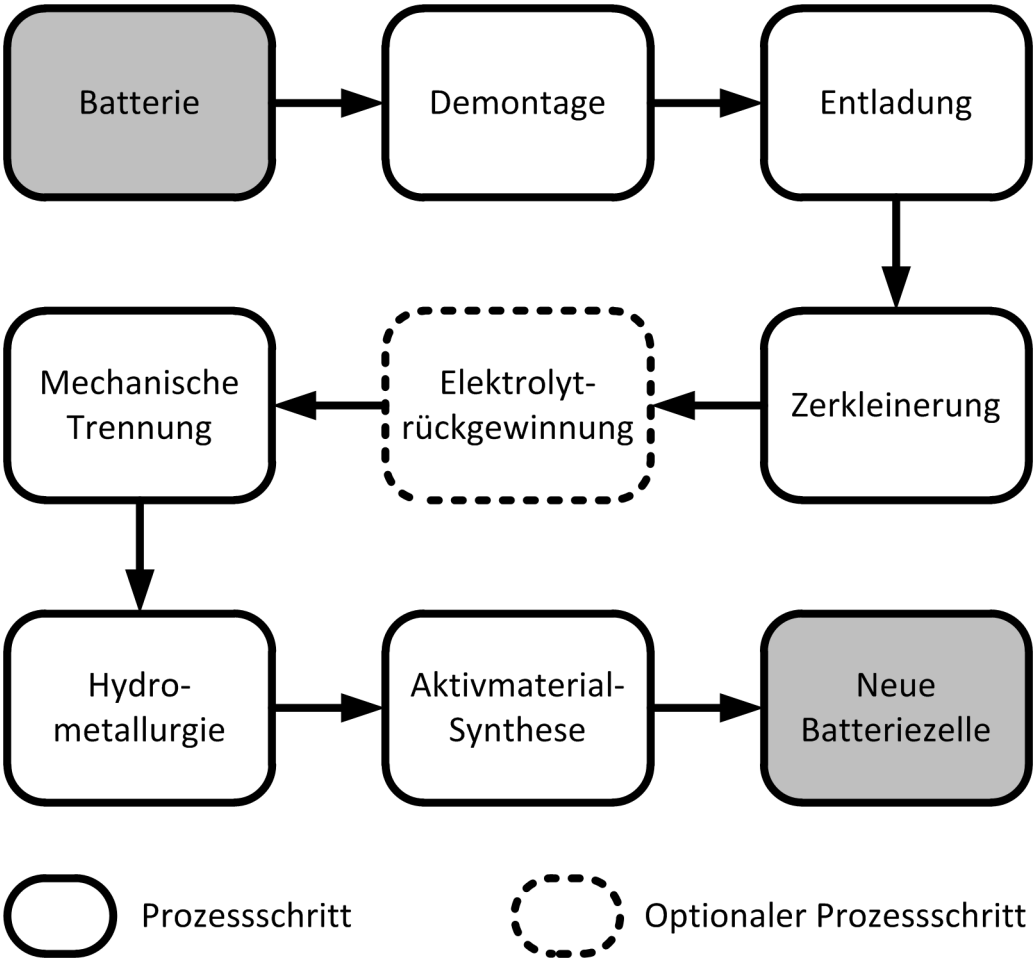


Abbildung 2.14: *Verfahrensschritte für das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien vgl. [STE12]*

Es ist zu erwarten, dass bis 2020, wenn eine ausreichende Anzahl an Traktionsbatterien das Ende ihrer Lebenszeit erreicht hat, Recyclingsysteme im industriellen Maßstab verfügbar und auch die notwendigen gesetzlichen Bestimmungen verabschiedet sein werden [STE12].

Tabelle 2.4 bildet Probleme der einzelnen Prozessschritte beim Recycling nochmals übersichtlich ab.

Prozessschritt	Problem
Demontage	Handling unterschiedlicher Batterieabmaße, Restspannung der Batterie, keine Informationen zur Batterie
Entladen	Handhabung und Kontaktierung unterschiedlicher Zellenabmaße, keine standardisierten Stecker, keine Informationen zum SoC
Zerkleinerung	Vermeidung von Gefahrsituationen
Elektrolytrückgewinnung	Ökonomisch nicht attraktiv
Mechanische Aufbereitung	-
Hydrometallurgie	Einsatz von weniger Chemikalien, ökonomische Attraktivität bei Batteriechemien ohne wertvolle Elemente
Aktivmaterialsynthese	Reinheit des Materials, Gefährdung der ökonomischen Attraktivität

Tabelle 2.4: *Probleme beim Recycling von Lithium-Ionen-Zellen angelehnt an [DOR13]*

Ein anderer Ansatz ist das pyrometallurgische Verfahren, bei dem die metallischen Elemente durch Schmelzen gewonnen werden. Dies kann direkt ohne eine Demontage oder nach einer mechanischen Aufbereitung erfolgen. Das pyrometallurgische Verfahren stellt eine Möglichkeit dar, große Mengen von Batterien einfach zu Recyclen [DOR13]. Meist werden die aus dem Recycling gewonnenen Stoffe nicht der Batterieproduktion zugeführt, sondern anderen Zwecken wie beispielsweise dem Straßenbau und der Stahlindustrie [DOR13]. Dadurch ist ein geschlossener Kreislauf der Materialien größtenteils nicht mehr möglich.

3 Stand der Forschung und Technik

Im folgenden Kapitel wird auf die Eigenschaften, Funktionen und Architektur des für eine lithiumbasierte Traktionsbatterie unabdingbaren Batteriemanagementsystems (BMS) eingegangen. Eine Traktionsbatterie für automotive Anwendungen besteht neben dem chemischen Energiespeicher auch aus einer Elektronik, welche die Betriebsparameter überwacht, gegebenfalls bei der Verletzung von vorgegebenen Grenzen einschreitet und die Batterielebensdauer optimieren kann. Im Detail werden verschiedene bekannte Ladungsausgleichssysteme, welche ein BMS vorrangig charakterisieren, vorgestellt und diskutiert.

3.1 Batteriemanagementsysteme

Die Aufgabe eines BMS ist es, die maximale Leistungsfähigkeit des Batteriesystems bei minimalem Leistungsverbrauch zu erreichen und damit die Lebensdauer der Batterie zu maximieren [LUK08]. Eine andere Quelle definiert ein BMS wie folgt: Die Aufgabe eines Batteriemanagementsystems ist der kontrollierte und effektive Gebrauch der Energie und Leistung sowohl aus als auch in ein Batteriesystem [BROU07].

Durch unterschiedliche Eigenschaften der Batterietechnologien unterscheiden sich auch deren Überwachungssysteme. Lithium-Ionen-Zellen sind im Vergleich zu anderen Zellchemien besonders kritisch und erfordern eine sensible Überwachung.

Das Gesamtsystem sollte über einen elektronischen Sicherheitsschalter verfügen, welcher im Notfall, beispielsweise bei Überstrom, den Stromkreis auftrennt, um die Batterie nur im zulässigen Bereich zu betreiben. Dieser zulässige Bereich besteht aus einem Spannungs-, Strom- und Temperaturfenster, in dem die Batterie sicher betrieben werden kann. Dies wird durch den Batteriehersteller vorgegeben.

Bei Verlassen des zulässigen Bereichs können große Gefahren entstehen. Eine Spannungsüberschreitung kann, ebenso wie ein zu hoher Strom, zu einer zu hohen Temperatur und damit zur Entflammung oder gar Explosion der Batterie führen. Bei Entladung auf eine zu geringe Spannung wird die Batteriekapazität dauerhaft vermindert [BERG02]. Dies kann zum Ausfall einzelner Zellen oder, im Extremfall, der gesamten Batterie führen.

Die Funktionen eines BMS teilen sich auf in Grundfunktionen, die vorrangig der Sicherheit dienen, sowie zusätzliche Funktionen, welche eine lange und gute Performanz der Batterie sicherstellen sollen. Grundfunktionen oder Primäraufgaben sind die Überwachung von Spannung und Strom sowie Temperatur und Druck der Batterie, um Herstellervorgaben einzuhalten und damit einen sicheren Betrieb zu gewährleisten. Eine zusätzliche Funktion oder sekundäre Aufgabe ist die Steuerung des Energieflusses aus oder in den Zellverbund. Zu den zusätzlichen Aufgaben zählt auch die Erfassung und Auswertung von Messgrößen, um beispielsweise den Ladezustand zu rechnerisch ermitteln.

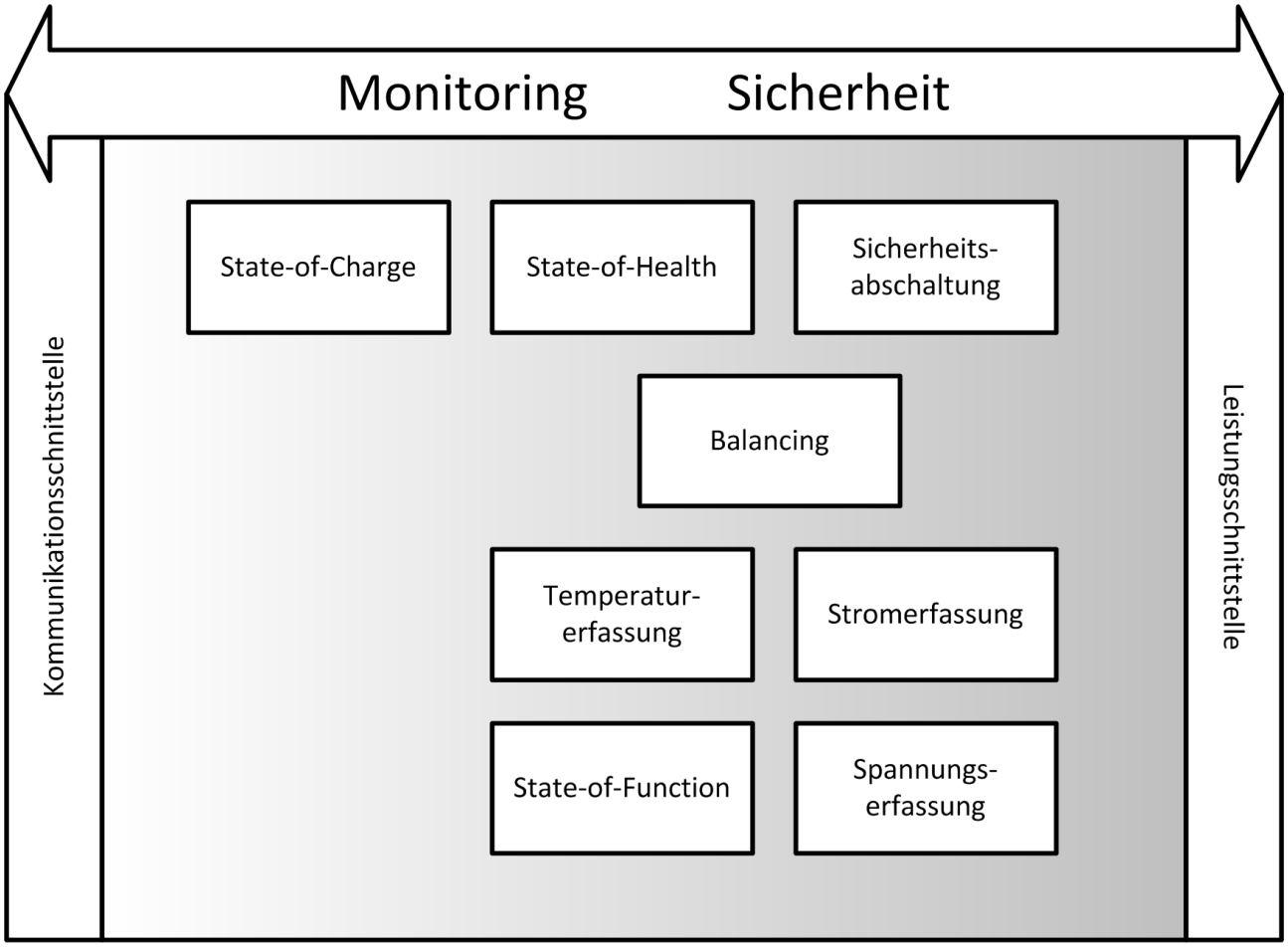


Abbildung 3.1: *Funktionalitäten eines Batteriemanagementsystems*

Die Wahl der Ladeschlussspannung hat ebenfalls einen Einfluss auf die Lebensdauer [BERG02]. Je höher diese Spannung gewählt wird, desto geringer ist die zu erwartende Zyklenlebensdauer, wobei die nutzbare Energie durch die höhere Spannung nur leicht zunimmt. Ebenfalls wirken sich tiefe Entladungen negativ auf die Lebensdauer aus (siehe Abschnitt 2.2.2). Traktionsbatterien werden daher meist in einem kleineren Kapazitätsfenster betrieben, als es theoretisch möglich ist, um die Lebensdauer der Batterie zu erhöhen (vgl. Abschnitt 2.2.2). Abbildung 3.2 zeigt ein Beispiel.

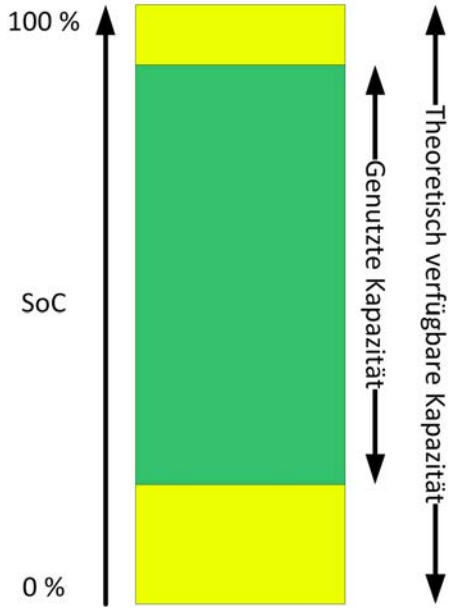


Abbildung 3.2: *Kapazitätsfenster einer Traktionsbatterie*

Darüber hinaus kann durch das Batteriemanagementsystem eine Kommunikation zu einem übergeordneten System stattfinden, um aktuelle Daten für beispielsweise das Fahrzeugmanagement weiterzugeben oder Einfluss auf den Energieverbrauch über den Verbraucher zu nehmen. Dies könnte bei einem Elektrofahrzeug im Entladefall beispielsweise die Reduktion des Spitzenstroms durch Begrenzung der Leistungsabgabe sein. Im Ladefall kann eine Kommunikation mit dem Ladegerät erfolgen und so die Ladeparameter abhängig vom Zustand der Zellen vorgegeben werden. Damit wird der Vorgang optimiert und dieser verspricht im Gegensatz zu einer ungeregelten Ladung eine höhere Lebensdauer.

In der Literatur werden als weitere Anforderungen an das BMS das Balancing des Zellverbunds, die Kommunikation der Batteriezustände an die Fahrzeugelektronik, das thermische Management, die Möglichkeit einer Wartung der Batterie durch Servicepersonal und die Auswertung aufgezeichneter Messdaten über eine Analyseschnittstelle angeführt [BROU07].

Die Grundfunktionen eines BMS sind zusammengefasst (siehe Abschnitt 3.1.1):

- Überspannungsschutz
- Unterspannungsschutz
- Überstromschutz
- Temperaturschutz

Zusätzliche Funktionen sind:

- Ladezustand (State of Charge - SoC) - (siehe Abschnitt 3.1.2)
- Alterungszustand (State of Health - SoH) - (siehe Abschnitt 3.1.3)
- Funktionszustand (State of Function - SoF) - (siehe Abschnitt 3.1.4)
- Aufzeichnung von Betriebsdaten (History) - (siehe Abschnitt 3.1.5)
- Energieausgleich auf Zell- oder Modulebene (Balancing) - (siehe Abschnitt 3.1.6)

An ein BMS für Elektroautos werden Anforderungen von automotiven Standards wie hohe mechanische oder thermische Widerstandsfähigkeit oder hohe Zuverlässigkeit gestellt. Es sollte auch den schnellen Wechsel zwischen Laden und Entladen beherrschen, wie er beim rekuperativen Bremsen auftritt. Des Weiteren können durch das BMS Betriebsdaten an das VMS wie Anzahl der Lade- und Entladezyklen, auftretende Minimal- und Maximalwerte im Betrieb oder die Menge des gesamten Ladungsflusses über der Zeit aus beziehungsweise in den Zellverbund, weitergeleitet werden.

3.1.1 Grundfunktionalitäten

Die Grundfunktionalitäten eines BMS sind die Überwachung der elementaren Größen, die einen sicheren Betrieb einer Batterie ermöglichen. Meist wird das Lade- beziehungsweise Entladesystem abgeschaltet, wenn zu hohe oder zu niedrige Spannungen oder eine zu hohe Temperatur erkannt werden. Der Einsatz einer aktiven Kühlung kann auch mit der Temperaturerfassung gekoppelt werden, um die Batterie bei einer Temperatur zu betreiben, die eine hohe Energieabgabe und geringe Alterung verspricht. Anders verhält es sich bei einem Kurzschluss. Kann der große Strom nicht über einen einfachen Schalter unterbrochen werden, spricht eine Sicherung an (siehe Abbildung 3.3). Diese Kurzschlusssicherung kann jedoch nur bei

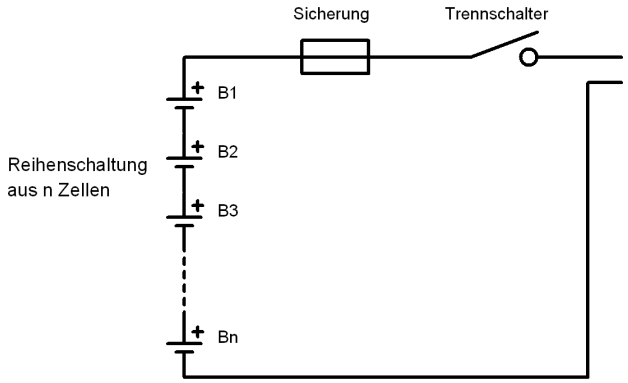


Abbildung 3.3: *Ersatzschaltbild einer Traktionsbatterie*

Stromfluss durch alle Zellen auslösen. Durch beispielsweise einen mechanischen Defekt ist es möglich, dass sich ein Kurzschlussstrom zwischen einzelnen Bereichen der Batterie ausbildet. Hier kann ein strombegrenzendes Element, beispielsweise ein Kaltleiterelement (zum Beispiel PTC-Thermistor), zum Einsatz kommen, welches an jeder einzelnen Zelle installiert wird. Es erwärmt sich bei sehr hohen Strömen, wird dadurch hochohmig und begrenzt somit den Kurzschlussstrom.

3.1.2 Ladezustand

Der Ladezustand wird als State of Charge (SoC) bezeichnet und gibt ähnlich einer Tankanzeige den aktuellen Ladungszustand einer Batteriezelle im Vergleich zu ihrem maximalen Aufnahmevermögen bei einer gegebenen Entladerate an. Diese Angabe ist notwendig, um eine Reichweitenabschätzung eines Fahrzeugs durchführen zu können. Sie kann auch genutzt werden, um eine Überladung oder Tiefenentladung zu vermeiden. Der Ladezustand bestimmt sich aus der Nennkapazität der C_N der Batterie und der aufbilanzierten entnommenen Ladung seit der letzten Vollladung sowie der Selbstentladung, zusammengefasst als Q_b.

$$SoC = \frac{C_N - Q_b}{C_N} \cdot 100\% \tag{3.1}$$

Die Ermittlung des SoC kann grundsätzlich wissensbasiert oder nicht-wissensbasiert erfolgen. Bei der wissensbasierten Ermittlung, auch Amperestundenzählung genannt, wird ständig der Strom, ausgehend von der Nennkapazität der Batterie, über die Zeit integriert, so dass zu jedem Zeitpunkt die geflossene Ladungsmenge bestimmt werden kann und daraus, ausgehend von einem bekannten Ladezustand SoC_0, die in der Batterie verbliebene Ladungsmenge.

$$SoC(t) = \left(SoC_0 - \frac{1}{C_N} \int_t I(t)\,\mathrm{d}t \right) \cdot 100\% \tag{3.2}$$

Nachteilig bei dieser Methode ist, dass Messfehler bei der Strommessung aufintegriert werden und ein Offsetfehler entstehen kann, wodurch die Genauigkeit mit der Zeit abnimmt.

Eine Möglichkeit der nicht-wissensbasierten Ermittlung des SoC ist dessen Ableitung aus der anliegenden Leerlaufspannung, auch Open-Circuit-Voltage-Messung (OCV-Messung), genannt. Die bekannte und hinterlegte Funktion des SoC über der Leerlaufspannung wird für die Ermittlung herangezogen.

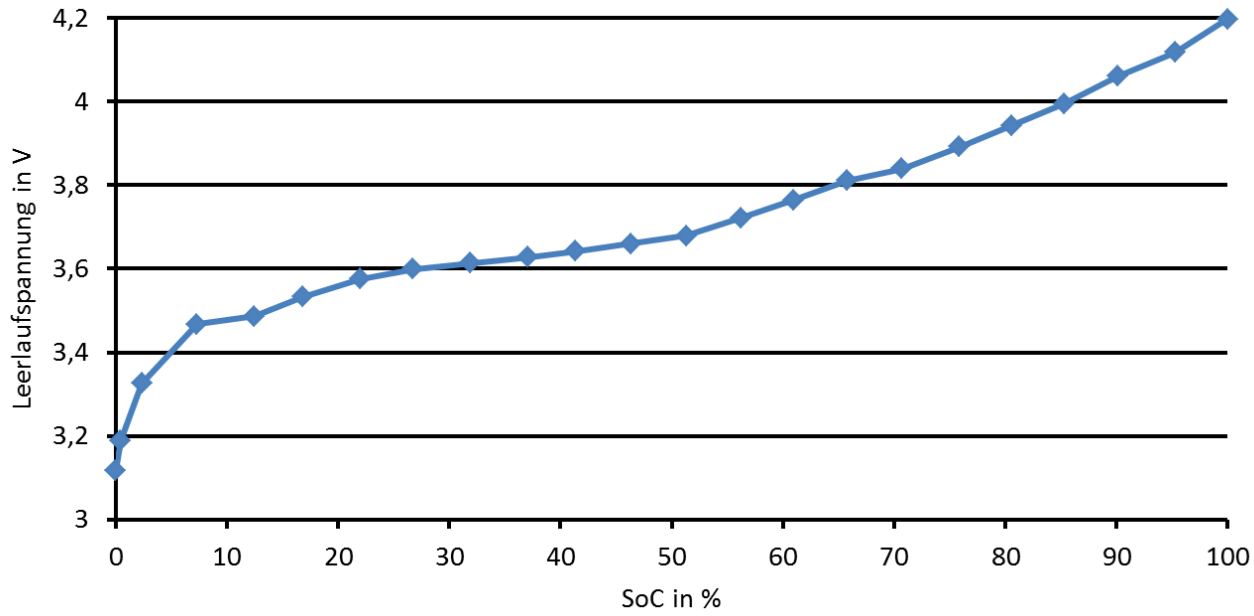


Abbildung 3.4: *Leerlaufspannung über SoC relativ zur Nennkapazität einer GR18650DA Zelle vgl. [JUNG10]*

In Abbildung 3.4 entspricht beispielsweise eine Spannung von 4,0 V etwa einem SoC von 85 %. Nachteilig bei dieser Methode ist, dass sich der Verlauf der Leerlaufspannung über dem SoC sowohl mit der Temperatur, aber besonders auch mit der Alterung verändern kann. Eine präzise Aussage des SoC bei gealterten Batterien lässt diese Methode ohne Korrektur nicht zu.

Kompliziertere Algorithmen versprechen eine genauere Bestimmung des SoC. Als Beispiel sei an dieser Stelle ein Kalmann-Filter genannt, welches ein Prozessmodell simuliert und mit einem Messmodell vergleicht [JUNG10].

3.1.3 Gesundheitszustand

Der Gesundheitszustand, als State of Health (SoH) bezeichnet, gibt das Vermögen der Batteriezelle Energie zu speichern an, hohe Ströme auf- oder abzugeben und Ladung über eine größere Zeitspanne zu speichern. Er wird relativ zu den initialen Werten beziehungsweise im Vergleich zu einer noch nicht genutzten Batteriezelle in Prozent angegeben. Sie ist eng mit dem Alter beziehungsweise der Alterung und dem SoC (siehe Abschnitt 3.1.2) der Batteriezelle verknüpft [LUK08]. In der Größe SoH fließen die verbleibende Kapazität der Zelle, deren Innenwiderstand, Leerlaufspannung und Selbstentladung ein. Der SoH ist jedoch wie der SoC keine fest definierte Größe. Die Berechnung des SoH bei führenden Herstellern von BMS gilt als Betriebsgeheimnis [MCK06]. Die Bestimmung kann durch verschiedenste Messungen wie Innenwiderstandsmessung oder Impedanzspektroskopie und deren Interpretation oder durch eine Abschätzung oder Berechnung mit den Nutzungsdaten erfolgen.

3.1.4 Funktionszustand

Der Funktionszustand, State of Function (SoF), gibt die Qualität der Batteriezelle an, welche für die Funktionalität des versorgten Systems relevant ist. Die Zugänglichkeit der in einer Batteriezelle vorhandenen Energie kann durch die Art des Verbrauchs eingeschränkt werden und steht nicht oder nicht im vollem Umfang zur Verfügung [WIE99]. Der SoF ist eine Funktion aus SoC, SoH und der Arbeitstemperatur [LUK08]. Überlicherweise in Form einer Ja / Nein Antwort sagt der SoF voraus, ob die Batterie eine bestimmte Leistung für eine bestimmte Anforderung bereitstellen kann [JUA10].

3.1.5 Aufzeichnung von Betriebsdaten

Ähnlich wie der Fehlerspeicher eines Fahrzeugs kann die Batterie ebenfalls eine Historie (History) besitzen, in der neben den Standard-Daten wie Anzahl der Lade- und Entladezyklen, aktueller SoC und so weiter, auch besondere Ereignisse wie Zeitpunkt und Dauer einer besonders hohen Temperatur abgelegt werden. Diese Daten werden nicht in der Batterie (BMS), sondern im Fahrzeug (VMS) gespeichert, da die Batterie mit dem Fahrzeug meist eine feste Einheit bildet.

Diese Daten können bei einer Regelwartung des Fahrzeugs hilfreich sein. Beispielsweise garantieren Hersteller für Elektrofahrzeuge eine Anzahl an Zyklen, bevor 80 % der Nennkapazität erreicht sind. Des Weiteren geben diese Daten dem Hersteller Aufschluss über den Einsatz der produzierten Batterien und lassen so eine Optimierung für zukünftige Entwicklungen zu. Gesammelte Daten können auch eine Hilfe bei der Wertermittlung für ein Second Life (siehe Abschnitt 2.2.3) darstellen.

3.1.6 Ausgleich von Ladungsungleichgewichten

Neben den Grundfunktionalitäten, die jedes BMS besitzt, und den in Software realisierten Parametern SoC, SoH und SoF, gibt es als weitere Funktionalität den Ausgleich von Ladungsungleichgewichten, das sogenannte Balancing.

Durch Fertigungsschwankungen sowie ungleiches Altern der Batteriezellen entstehen Ungleichgewichte im SoC und langfristig im SoH innerhalb eines Batteriepacks. Durch die serielle Verschaltung der einzelnen Zellen werden eine hohe

Arbeitsspannung und damit geringe ohmsche Verluste bei der Übertragung der Energie ermöglicht. In dieser Serienschaltung bestimmt die Zelle, die zuerst die obere beziehungsweise untere Spannungsgrenze erreicht, das Ende von Ladung beziehungsweise Entladung. Gleichzeitig wird eine ohnehin schon gealterte Batteriezelle im Vergleich zu den anderen ungealterten Zellen im Verbund immer bis zu ihren Grenzen betrieben, was ebenfalls zu einer schnelleren Alterung führt. Das Balancing soll solche Ungleichgewichte ausgleichen beziehungsweise gänzlich eliminieren.

Grundfunktionalitäten und Softwareparameter haben praktisch keinen Einfluss auf die Hardware des Batteriemanagementsystems. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die Konstruktion eines Batteriemanagementsystems maßgeblich von der Art und Weise des Balancing abhängt. Hierbei wird in sogenannte Shunting-, Shuttling- und Konvertermethoden unterschieden [MOO01].

Bei der **Shuntingmethode** wird der Last- beziehungsweise Ladestrom selektiv vollständig oder zum Teil um eine bestimmte Zelle herum geleitet [CAO08].

Bei der **Shuttlingmethode** wird Ladung aus einer Zelle entnommen und über ein Speicherelement, meist einen Kondensator, auf eine andere Zelle übertragen.

Als **Konvertermethode** werden solche Systeme bezeichnet, die galvanisch isolierte Eingangs- und Ausgangsseiten haben. Zentrales Element sind dabei Transformatoren [MOO01]. Streng genommen können einige Schaltungen der Energiekonvertermethode auch der Shuttling-Methode zugerechnet werden.

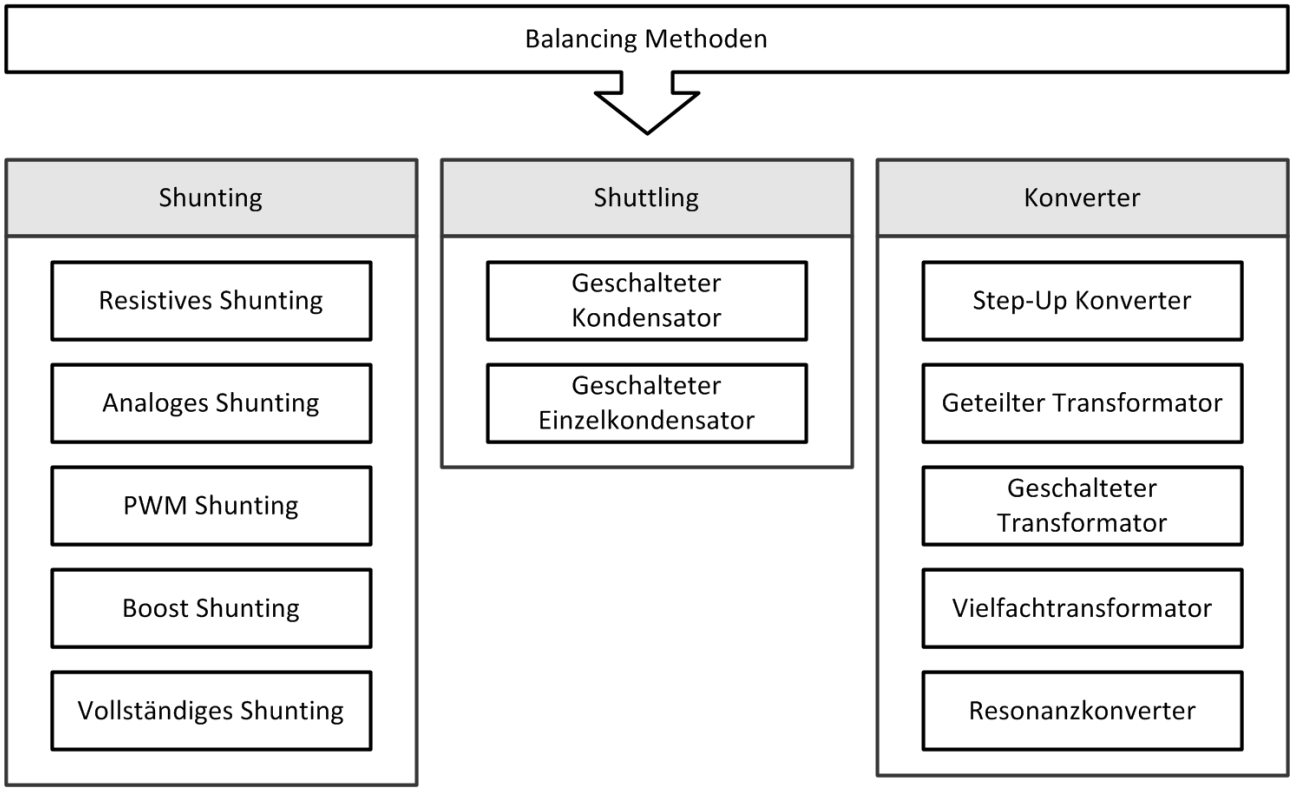


Abbildung 3.5: *Übersicht über verschiedene Balancing-Methoden*

Im Folgenden werden die in Abbildung 3.5 gezeigten Systeme aus den unterschiedlichen Technologiegruppen vorgestellt und abschließend ihre Charakteristika verglichen.

Resistives Shunting

Bei der Methode des verlustbehafteten resistiven Shunting wird selektiv ein Widerstand R_n zu einer Zelle B_n parallel geschaltet und Energie thermisch dissipiert (siehe Abbildung 3.6).

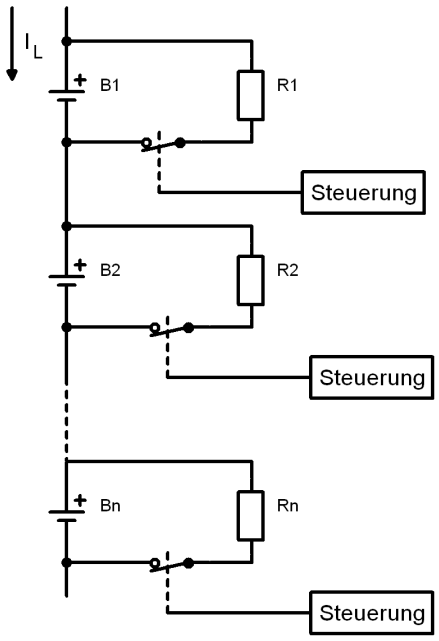


Abbildung 3.6: *Aufbau resitives Balancing*

Das System kann sowohl als Ladebegrenzer als auch als Balancer für den Lade- und Entladevorgang je nach Dimensionierung des Shunt(widerstand)s R_n eingesetzt werden.

Für ein Balancing beim Ladevorgang wird der Shunt R_n passend zur oberen Spannungsgrenze $U_{B,max}$ und dem Ladestrom I_L dimensioniert.

$$R_n = \frac{U_{B,max}}{I_L} \tag{3.3}$$

Erreicht eine Zelle die obere Spannungsgrenze, wird das System aktiv und der

Schalter S_n geschlossen. Damit wird die Ladeenergie für die Zelle thermisch dissipiert und schützt somit die Zelle vor Überladung. Um große Verlustleistungen an den Shunts zu vermeiden, empfiehlt sich dieses System vor allem für Ladegeräte, die einen kleinen Restladestrom (end of charge current) aufweisen.

Vorteile sind der hohe Schutz vor dem Überladen und die Fähigkeit, verhältnismäßig große Ladungsunterschiede der Zellen ausgleichen zu können. Die Nachteile des resistiven Balancing sind der große Verlustwiderstand und gegebenenfalls zusätzlicher Aufwand für Kühlsysteme beziehungsweise erhöhte Alterung der Zellen durch die erhöhte Temperatur. Nachteilig wirkt sich auch die große Inflexibilität durch den fest bestimmten Widerstand R_n aus.

Wird das System sowohl beim Entladen als auch beim Laden genutzt, werden diejenigen Zellen mit einem höheren SoC künstlich entladen, um sich so den Zellen mit dem niedrigsten SoC anzunähern. Im Gegensatz zu der Dimensionierung, die nur im Ladefall wirksam ist, wird der Widerstand R_n dabei so gewählt, dass der Entladestrom sehr gering ist (meist 10 mA pro Ah Kapazität der Zelle). Der Ausgleich der Ladung ist dafür verhältnismäßig gering. Mit einem Strom von 10 mA pro Ah Kapazität der Zelle gleicht der Shunt innerhalb einer Stunde ca. 1 % der Ladung aus. In einem dauerhaften Betrieb kann somit ein ganzer Batterieverbund innerhalb von einigen Tagen ausgeglichen werden [MOO01].

Nachteilig ist aber, dass das System so dimensioniert nur sehr kleine Ladungsmengen dissipativ ausgleichen kann und damit weder effektiv noch, durch die Umwandlung von elektrischer Energie in Wärme, effizient ist.

Grundsätzlich stellt das System eine der einfachsten und kostengünstigsten Möglichkeiten dar, Balancing zu betreiben und kommt daher oft zum Einsatz.

Analoges Shunting

Das Prinzip des analogen Shuntings basiert auf dem resistiven Shunting, mit dem Unterschied, dass die Energie in einem Halbleiterelement dissipiert wird.

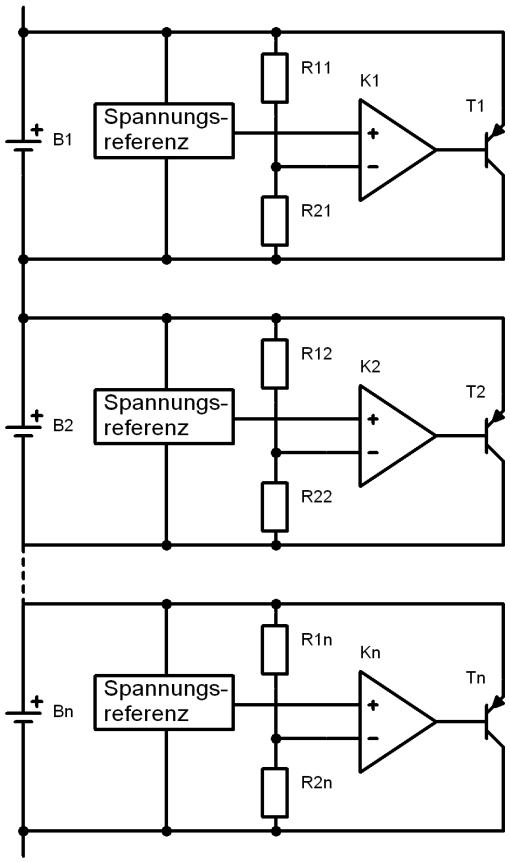


Abbildung 3.7: *Aufbau analoges Balancing*

Erreicht die Batterie eine Grenzspannung, steuert die Komparatorschaltung K_n den Transistor T_n derart, dass die Grenzspannung gehalten wird. Diese hängt von der Dimensionierung des Spannungsteilers R_{1n} und R_{2n} sowie der Spannungsreferenz ab (siehe Abbildung 3.7). Somit wird die Zelle vor einem weiteren Anstieg der Zellspannung geschützt.

Der Vorteil dieser Schaltung ist ihr verteilter Aufbau. Es ist kein übergeordnetes System notwendig, das Spannungen auswertet und Maßnahmen ergreifen muss. Dieses wird automatisch, jeweils durch die Komparatoren, übernommen. Dadurch ist das System sehr einfach. Nachteilig ist, dass diese Schaltung nur im Ladefall wirksam ist und wie das resistive Balancing verlustbehaftet ist.

PWM Shunting

Bei diesem Verfahren [NIS00] wird abwechselnd zwischen zwei benachbarten Zellen, zum Beispiel B_1 und B_2, eine Induktivität L_1 geschaltet (siehe Abbildung 3.8). Die Steuerung, welche von einem System angesteuert wird, passt die Schaltzeiten der Transistoren Q_{11} und Q_{21} abhängig von der Spannung der beiden Zellen so an, dass ein vollständiger Ladungsausgleich stattfindet. Der Ausgleich ist von der Pulsweite der Pulsweitenmodulation (PWM) abhängig. Je mehr sich die Ladezustände annähern, desto kürzer werden die Schaltzeiten. Sind die Ladezustände gleich, werden die Transistoren nicht mehr angesteuert, um unnötige Schaltverluste zu vermeiden. Die Schaltelemente sind ein p-Kanal MOSFET Q_{1n} und ein n-Kanal MOSFET Q_{2n}, die über dieselbe Signalleitung angesteuert werden können.

Das Verfahren ist einfach und effektiv. Es ist jedoch eine Logik notwendig, die die Schaltzeiten anpassen muss. Negativ, neben Schaltverlusten, sind elektromagnetische Abstrahlungen durch die schnellen Schaltvorgänge zu bemerken, die EMV-Probleme verursachen können. Darüber hinaus eignet sich dieses Verfahren nur begrenzt für einen modularen Ansatz, da immer zwei benachbarte Zellen über Schaltelemente verknüpft sind. So wäre eine modulare Ausführung nur über einen erhöhten Kontaktierungsaufwand zwischen den einzelnen Zellen möglich.

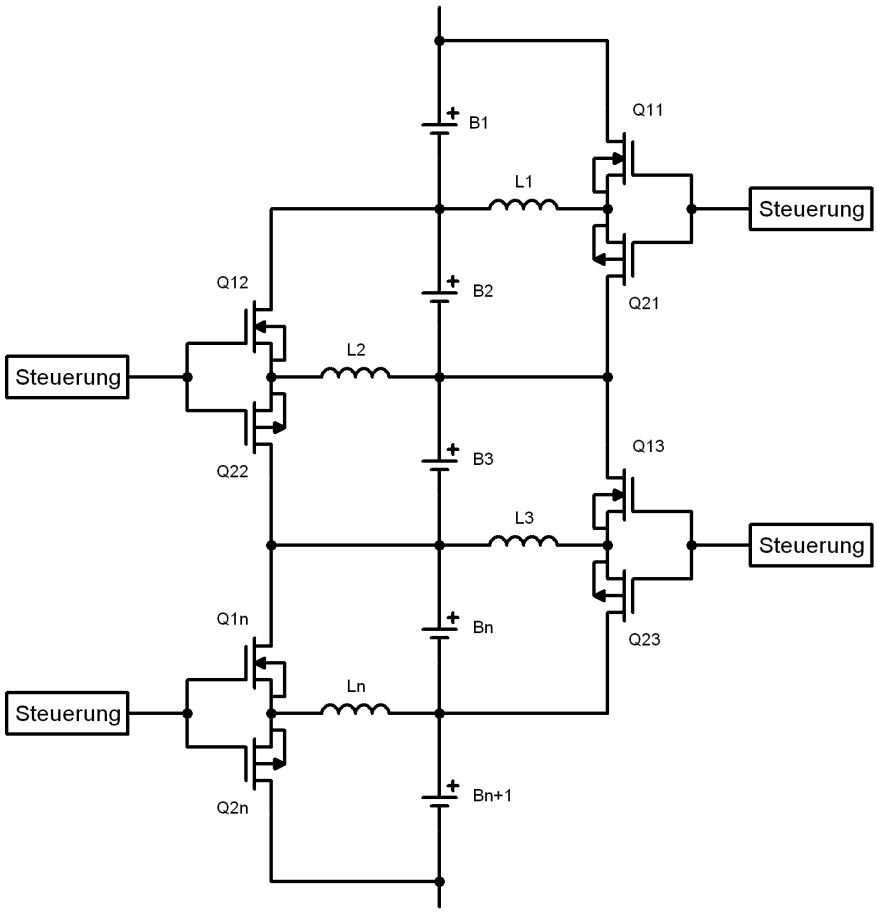


Abbildung 3.8: *Aufbau PWM Shunting*

Boost Shunting

Bei dieser Methode [MOO03] findet die Technik eines Hochsetzstellers (L_1, D_1) Anwendung (siehe Abbildung 3.9). Die Schaltung ist für eine Reihenschaltung der Elemente angepasst. Wird an einer Zelle ein vergleichsweise hoher SoC detektiert, so wird der entsprechende Schalter S_n mit einer Pulsweitenmodulation (PWM) moduliert und so Energie auf die benachbarte Zelle übertragen.

Das Verfahren ist effektiv, erfordert jedoch einen erhöhten Schaltaufwand. Es ist bedingt modularisierbar. Man kann den Aufbau des Boost-Shuntings auch als eine Form der Step-Up-Converter Methode ansehen.

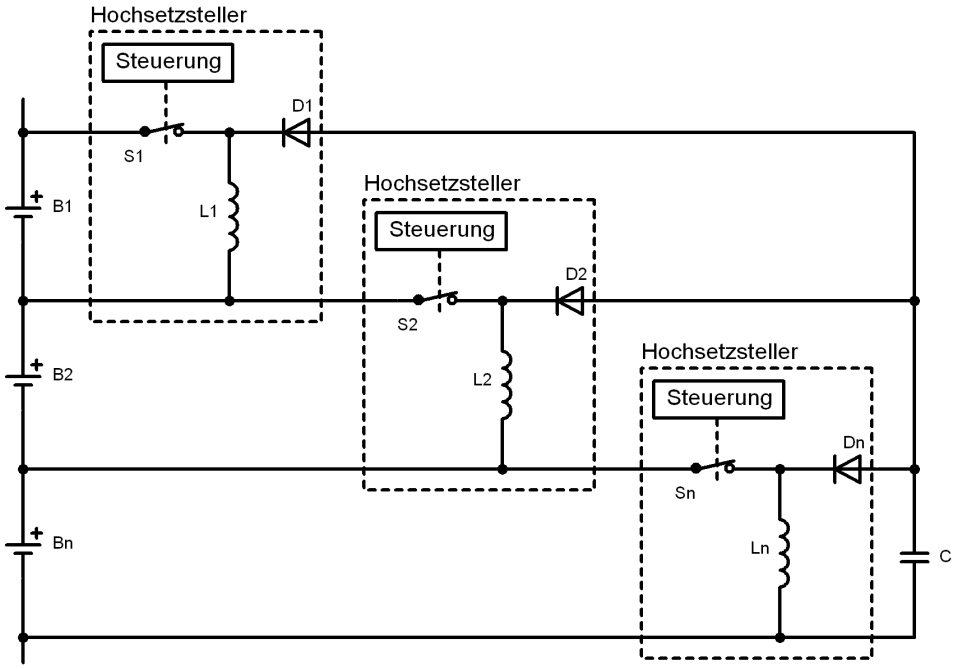


Abbildung 3.9: *Aufbau Boost Shunting*

Die Step-Up-Converter Methode ist jedoch abgeschlossener und unabhängiger, da das Prinzip des Hochsetzstellers nicht von den anderen Komponenten oder der benachbarten Zelle abhängt.

Vollständiges Shunting

Das vollständige Shunting ist die konsequente Umleitung des Stroms an einer Zelle vorbei (siehe Abbildung 3.10). Dies wird mit Schaltern S_{1n} und S_{2n} erreicht. Befindet sich eine Zelle außerhalb ihrer Betriebsparameter, kann sie über Schalter vollständig aus dem Verbund getrennt werden [SHI01].

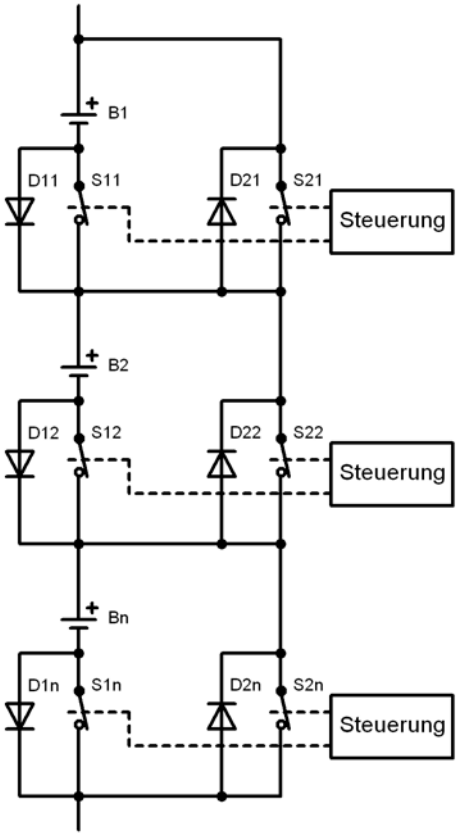


Abbildung 3.10: *Aufbau vollständiges Shunting*

Nachteilig ist, dass in diesem Fall ein hoher Laststrom über die Schaltelemente geführt wird. Somit entstehen ohmsche Verluste, entsprechend der Schaltelemente. Der bedeutende Vorteil ist jedoch, dass sich der Zellverbund in vollständig unabhängige Elemente verteilt. So bleibt beispielsweise auch bei dem Ausfall einer Zelle die weitere Funktion der Batterie gewährleistet.

Kapazitives Shuttling

Beim geschalteten Kondensator, dem kapazitiven Shuttling, wird mit einen Kondensator C Energie von einer Zelle B_1 auf eine andere B_2 übertragen (siehe Abbildung 3.11). Hat beispielsweise B_1 eine höhere Spannung im Vergleich zu B_2, wird

zunächst der Kondensator auf das Potential von B_1 geladen. Nach dem Umschalten des Kondensators auf B_2 gibt er einen Teil seiner Energie ab. Der Vorgang wird mehrmals wiederholt, bis sich die Spannungen der Zellen angeglichen haben.

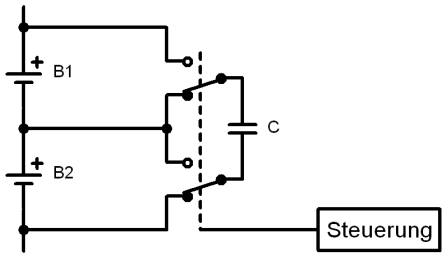


Abbildung 3.11: *Aufbau kapazitives Shuttling*

Die Geschwindigkeit des Ladungsausgleiches hängt von der Kapazität des Kondensators ab. Mit einer höheren Kapazität wird der Ladungsausgleich schneller stattfinden, jedoch ist dies mit hohen transienten Spannungen verbunden, die zu EMV-Problemen führen können.

Für das kapazitive Shuttling werden verschiedene Topologien beschrieben [MOO01], [CAO08]. Ein Beispiel zeigt Abbildung 3.12. Alle verschiedenen Topologien basieren auf dem beschriebenen Prinzip, unterscheiden sich jedoch hinsichtlich der Anzahl und Verschaltung von Kondensatoren auf die Zellen und damit hinsichtlich der Leistungsfähigkeit des Systems. Es ist naheliegend, dass ein System mit einem Kondensator für alle Zellen (geschalteter Einzelkondensator) weniger leistungsfähig ist als eines, welches mehrere Kondensatoren vorsieht. Jedoch nehmen die Komplexität und der Aufwand des Systems mit einer zunehmenden Anzahl an ausgleichenden Kondensatoren stark zu.

Das kapazitive Shuttling basiert auf Spannungsunterschieden, welche besonders bei niedrigem oder hohem SoC auftreten (vgl. Abbildung 3.4). Im mittleren Bereich des SoC ergeben sich nur niedrige Potentialunterschiede und die übertragbare

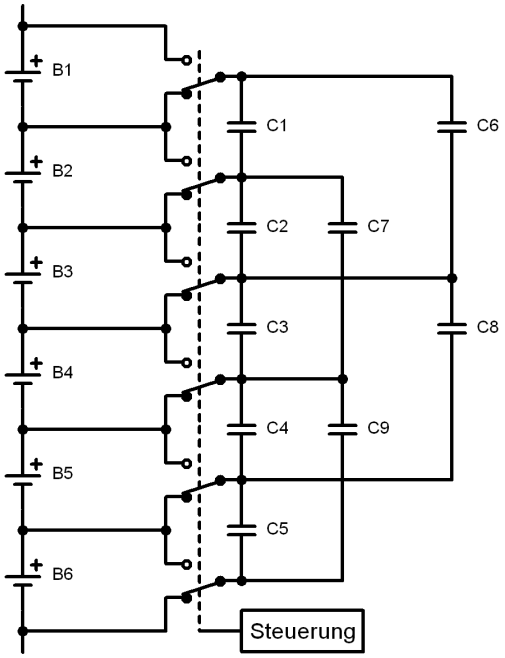


Abbildung 3.12: *Beispiel für eine Ausführung des kapazitiven Shuttlings*

Energie pro Schaltvorgang sinkt daher. Somit ist das System in diesem Bereich ineffizient und ein völliger Ausgleich kann nicht stattfinden.

Vernachlässigt man die Spannungsänderung der Zellen durch Energieaus- beziehungsweise Energieeintrag, gilt für die übertragene Energie W_{SW}:

$$W_{sw} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot \left(U_{B1}^2 - U_{B2}^2\right) \tag{3.4}$$

Wird demnach der Spannungsunterschied zwischen den Zellen kleiner, verringert sich die übertragene Energie pro Schaltvorgang. Die Spannungen der Zellen nähern sich über einen langen Zeitraum nur asymptotisch aneinander an. Ein weiterer Nachteil ergibt sich aus dem hohen Aufwand für die Schaltung und Schaltungslogik. Darüber hinaus ist das System durch die zellübergreifende Kapazität nicht unabhängig modularisierbar.

Step-Up Converter

Bei dieser Methode, wie sie auch in [MOO01] beschrieben wird, verfügt jede Zelle über einen Step-Up Converter (Hochsetzsteller). Hat eine Zelle einen vergleichsweise hohen SoC, kann sie über den Hochsetzsteller Energie an den gesamten Zellverbund abgeben. Eine schematische Darstellung zeigt Abbildung 3.13.

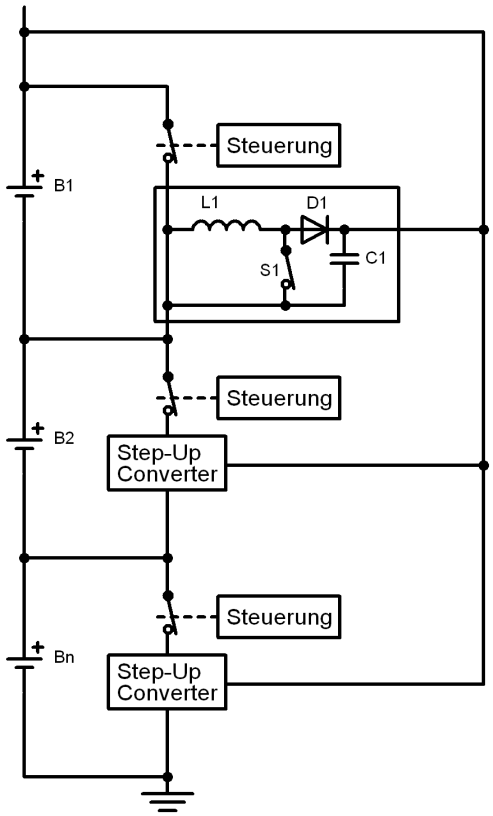


Abbildung 3.13: *Aufbau des Balancing mithilfe von Hochsetzstellern*

Die Schaltung ist sehr effektiv und kann bei richtiger Auslegung einen sehr hohen Wirkungsgrad haben. Nachteilig ist jedoch, dass ein hoher Schaltungsaufwand für den Hochsetzsteller notwendig ist. Der Hochsetzsteller kann außerdem EMV-Probleme verursachen.

Geteilter Transformator

Bei dieser Technik wird ein Transformatorkern mit einer Primärwicklung und jeweils einer Sekundärwicklung für jede Batteriezelle verwendet (siehe Abbildung 3.14) [KUT99]. Aus der Reihenschaltung der Zellen werden durch den Schalter S Stromimpulse durch die Primärseite geleitet. Dadurch wird auf den Sekundärwindungen wiederum ein Strom induziert. Dieser Strom folgt der Reaktanz der Sekundärwicklung. Dadurch, dass die Reaktanz von der Spannung im Sekundärkreis abhängig ist, stellt sich bei einer vergleichsweise niedrigen Zellspannung ein höherer Sekundärstrom ein. Somit kann bei ausreichend vielen Schaltvorgängen der SoC aller Zellen ausgeglichen werden. Die Diode D_n verhindert das Entladen der Zelle über die Wicklung des Transformators.

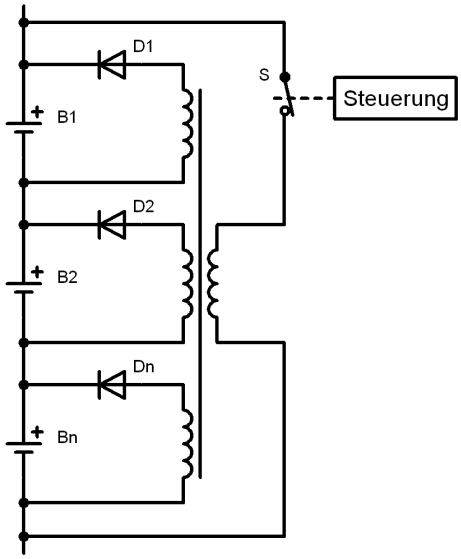


Abbildung 3.14: *Aufbau des Balancing mithilfe eines geteilten Transformators*

Ein Vorteil dieser Methode ist, dass sie ohne weitere Logik eine Angleichung des SoC schaffen kann. Nachteilig wirkt sich die Installation eines schweren und teuren Transformators und der hohe Verkabelungsaufwand aus.

Dieses System ist prinzipbedingt nicht modularisierbar, da der Transformator hier durch die feste Anzahl an Sekundärwicklungen ein statisches Element ist.

Vielfachtransformator

Anstatt, wie bei der Methode des geteilten Transformators (siehe Abbildung 3.14), eine gegenseitige magnetisches Kopplung herzustellen, können auch einzelne Transformatoren mit einer parallelgeschalteten Primärseite verwendet werden (siehe Abbildung 3.15). Es wird eine einfache Modularisierbarkeit erreicht, ohne das System zu ändern. Wird hier der Strom sehr gering gewählt (weniger als 100 mA pro Ah Kapazität der Zelle), kann die Schaltung dauerhaft mit einem höheren Wirkungsgrad, als es alle anderen aktiven Methoden erlauben, betrieben werden [MOO01]. Nachteilig wirkt sich bei dieser Methode das zusätzliche Gewicht und der erhöhte Verkablungsaufwand aus.

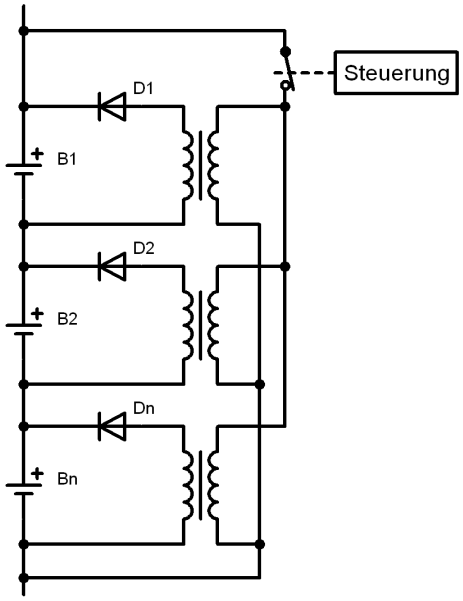


Abbildung 3.15: *Aufbau des Balancing mithilfe einzelner Transformatoren*

Geschalteter Transformator

Diese Methode ist vom Aufbau das Pendant zum geschalteten Einzelkondensator. Es wird aus dem Verbund Energie durch den Strom I entzogen und selektiv einer Batteriezelle über eine Schaltmatrix zugeführt. Diese Methode ist sehr komplex

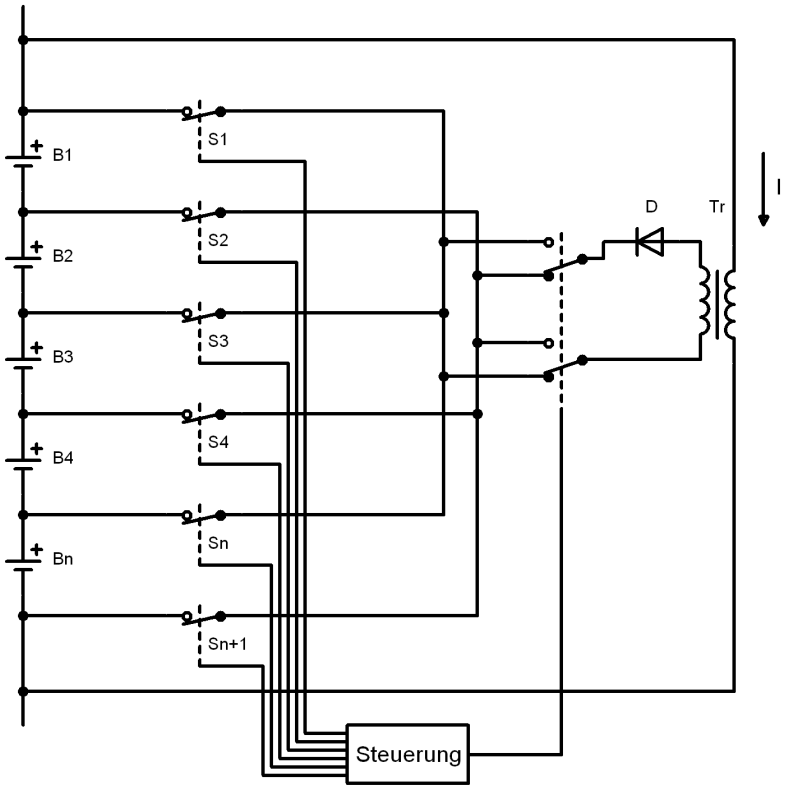


Abbildung 3.16: *Aufbau des Balancing mithilfe eines geschalteten Transformators*

und erfordert einen hohen Bauteilaufwand in Form von Schaltelementen und des Transformators (siehe Abbildung 3.16). Der Wirkungsgrad ist durch magnetische Verluste und Schaltverluste niedrig. Dieses System eignet sich prinzipiell für einen modularen Aufbau, erfordert dazu aber einen erhöhten Aufwand an Verkabelung und Schaltelementen.

Resonanzkonverter

Der Resonanzkonverter [LEE06] stellt eine Weiterentwicklung des PWM Shunting dar. Neben der Spule wird ein Resonanzkonverter, bestehend aus einer Kapazität C_{r1} und einer zusätzlichen in Reihe geschalteten Induktivität L_{r1} verwendet. C_{r1} und L_{r1} stellen den Schwingkreis dar, welcher durch eine Startschaltung angeregt wird. L_{r1} kann dabei auch als Ansteuerung für die beiden Schaltelemente fungieren. Bei positiver Spannung über L_{r1} wird Q_{12} geschaltet. Durch die Umkehr der Spannung wird Q_{11} geschaltet. Ist die Spannung der Zelle B_1 größer als die von B_2, ist der mittlere Strom durch L_1 bei leitendem Q_{11} höher als bei leitendem Q_{12}.

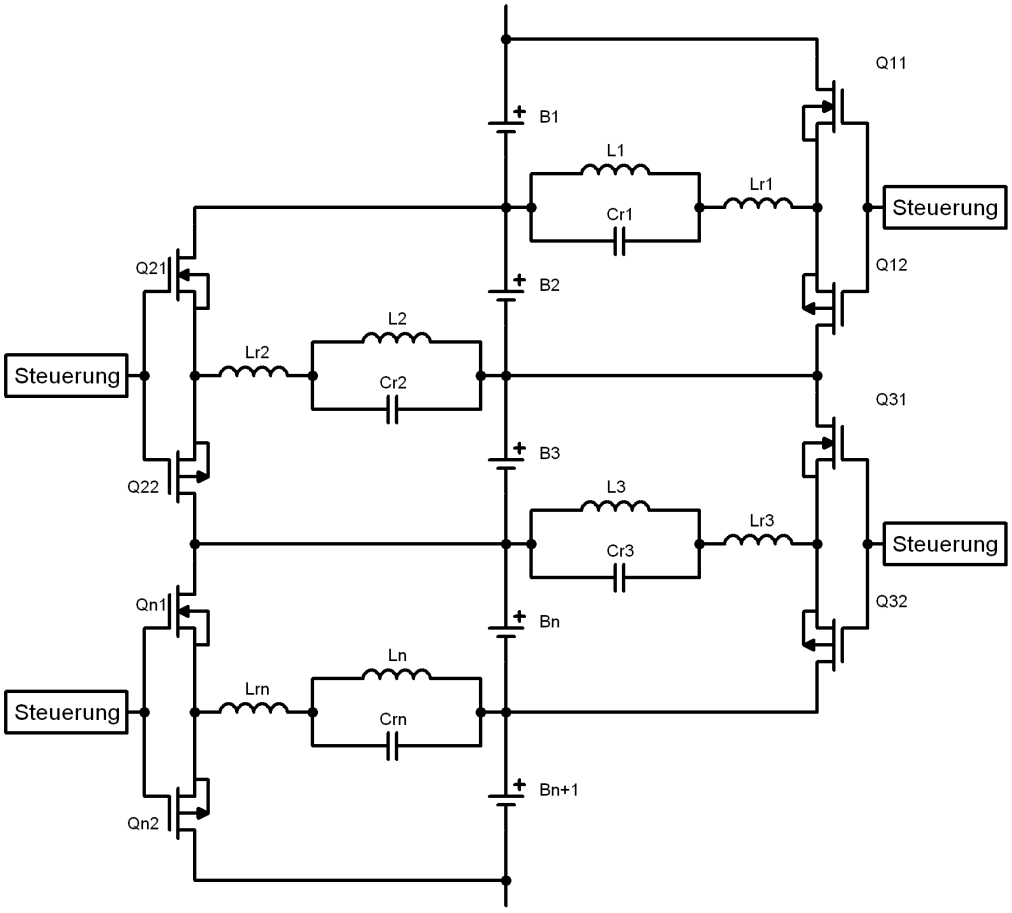


Abbildung 3.17: *Aufbau des Balancing mittels eines Resonanzkonverters*

Die Energie wird bei der Umkehr auf B_2 abgegeben. Abbildung 3.17 zeigt den Aufbau der Schaltung.

Die Schaltung verbessert im Vergleich zum PWM-Shunting die Effizenz, verringert Schaltverluste und minimiert elektromagnetische Abstrahlungen. Dennoch ist sie nur durch erhöhten Verkabelungsaufwand vollständig modularisierbar.

Bewertung verschiedener Balancing Systeme

In Tabelle 3.1 werden die vorgestellten Methoden nochmals übersichtlich zusammengefasst und hinsichtlich ihrer Effizienz, ihres Aufwands und der Eignung zum modularen Aufbau bewertet.

Es ist leicht ersichtlich, dass eine gute Effizienz (✓) direkt mit einem erhöhten Aufwand (0 oder ✗) verbunden ist. Dabei ist zu diskutieren, wo Aufwand dem Nutzen gerecht wird. Ein erhöhter Aufwand ist gleichzusetzen mit erhöhten Bauteilkosten oder einem erhöhten Montageaufwand. Die Erhöhung der Kosten ist nur schwer abzuschätzen und hängt auch stark von der produzierten Stückzahl ab. Somit muss ein vergleichsweise komplexes System massenproduziert nicht zwangsweise mit hohen Mehrkosten verbunden sein. Die Montagekosten werden jedoch nicht durch eine höhere Stückzahl gesenkt, weswegen ein erhöhter Montageaufwand vermieden werden sollte.

Für ein Balancing System, das eine einfache Modularisierung zulässt, kommen vor allem passive Systeme (verlustbehafteter Widerstand, analoges Shunting) oder komplexe Systeme (vollständiges Shunting, Boost-Converter) in Frage.

Name	Vorteile	Nachteile	Effizienz	Aufwand	Modularisierbarkeit
Verlustbehafteter Widerstand	Einfache Schaltung, billig	Wenig wirksam, ineffizient, Schaltlogik notwendig	✗	✓	✓
Analoges Shunting	Einfache Schaltung, keine Logik notwendig	Ineffizient	✗	✓	✓
PWM Shunting	Einfach und effektiv	Logik notwendig	✓	0	0
Boost Shunting	Effektiv	Hoher Schaltungsaufwand	✓	0	0
Vollständiges Shunting	Effektiv	Laststrom über Schaltelemente	✓	0	✓
Geschalteter Kondensator	Nicht verlustbehaftet	Wenig wirksam, hoher Schaltaufwand	0	✗	0
Step-Up Converter	Hoher Wirkungsgrad	Sehr hoher Schaltungsaufwand	✓	✗	✓
Geteilter Transformator	Hoher Wirkungsgrad	Sehr hoher Schaltungsaufwand	✓	✗	0
Vielfachtransformator	Hoher Wirkungsgrad	Hoher Bauteilaufwand	✓	0	0
Geschalteter Transformator	Hoher Wirkungsgrad	Hoher Bauteilaufwand, hoher Schaltaufwand	✓	✗	0
Resonanzkonverter	Verbessertes PWM Shunting	Logik notwendig, erhöhter Bauteilaufwand	✓	0	0
		Legende:	✓: gut 0: mäßig ✗: schlecht	✓: gering 0: erhöht ✗: hoch	✓: gut 0: bedingt möglich ✗: schlecht bzw. nicht möglich

Tabelle 3.1: *Übersicht und Bewertung verschiedener Balancing-Methoden*

3.1.7 Architektur von Batteriemanagementsystemen

Unter der Architektur eines Batteriemanagementsystems wird in dieser Arbeit die konzeptionelle Umsetzung des BMS im Batteriesystem verstanden. Dabei kann grundsätzlich zwischen hierarchischen Architekturen, den sogenannten Master-Slave-Systemen (siehe Abbildung 3.18) in einer Sternanordnung und nicht-hierarchischen Architekturen, wie den Bus-Systemen (siehe Abbildung 3.19) in einer Ringanordnung, unterschieden werden.

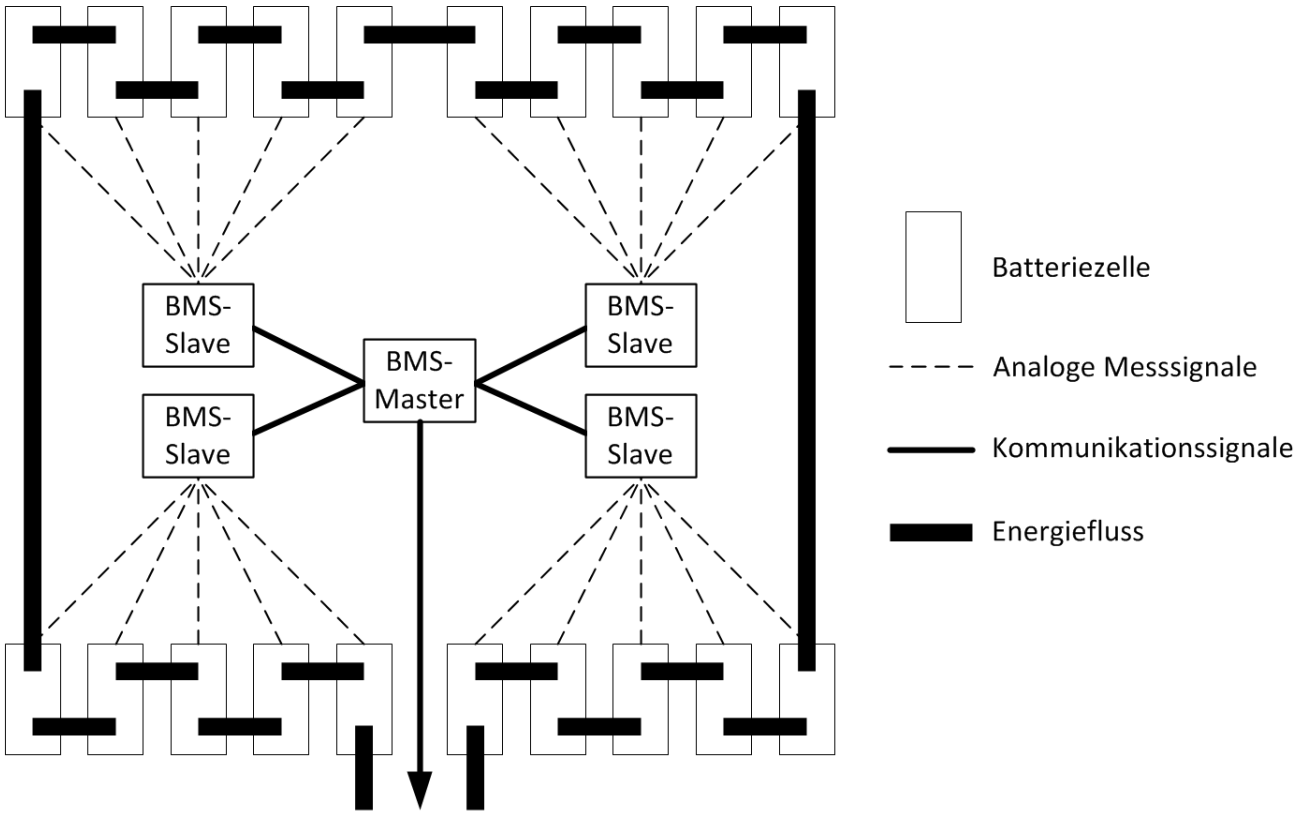


Abbildung 3.18: *Master-Slave-Architektur eines Batteriemanagementsystems*

Das Master-Slave-System sieht die analoge Erfassung der relevanten Messdaten, meist Spannung und Temperatur, von mehreren Zellen in einem Slave vor. Die Informationen werden aufbereitet und digital an eine weitere Zwischenebene oder den Master kommuniziert, welcher die eigentliche Funktionalität des BMS besitzt

und als Bindeglied zum Fahrzeug fungiert. Das System hat im einfachsten Fall drei Hierarchieebenen (Master, Slave und Zelle). Es sind jedoch auch mehr Ebenen denkbar.

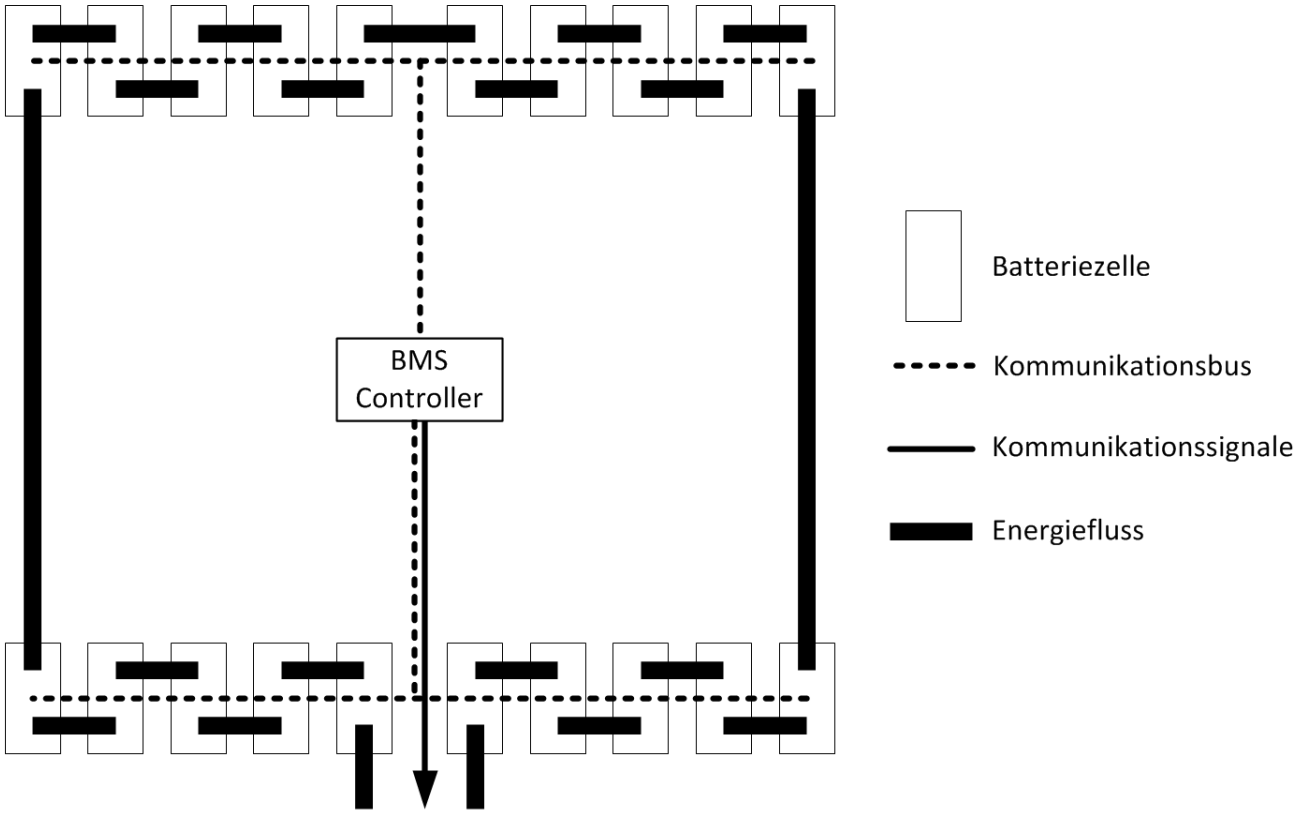


Abbildung 3.19: *Bus-Architektur eines Batteriemanagementsystems*

Das Bus-System sieht an jeder Zelle eine Hardware vor, die relevante Informationen direkt auf einem Bus bereitstellen kann. Ein BMS-Controller fragt die Zellen zyklisch ab, um BMS-Funktionen bereitstellen zu können. Genau genommen besitzt das Bus-System damit auch zwei Hierarchieebenen: die der erfassenden Hardware und die des BMS-Controllers.

Grundsätzlich wird die Funktionalität eines BMS durch eine zentrale Einheit abgebildet, die sowohl Steuerungs- als auch Regelungsfunktionen übernimmt. Beide Systeme haben dabei Vor- und Nachteile.

Das Master-Slave-System verzichtet auf Hardware in jeder Zelle. Jedoch erfordert diese Architektur einen erhöhten Verdrahtungsaufwand der einzelnen meist analalogen und damit störanfälligen Sensoren zu den Slave-Einheiten und von den Slave-Einheiten zur Master-Einheit.

Dieser Verdrahtungsaufwand fällt durch das Bus-System praktisch weg, jedoch ist für jede Zelle eine eigene Hardware vorgesehen. Problematisch ist die hohe Spannungsdifferenz zwischen Kommunikationsleitung und Leistungsverkablung. Definiert man das Nullpotential genau in der Mitte der Nennspannung U_{Bat} der Batterie, muss die Hardware eine Isolationsfestigkeit von mindestens $\frac{U_{Bat}}{2}$ aufweisen. Dies macht eine galvanische Entkopplung zwischen Erfassungselektronik und Kommunikationselektronik auf der Platine notwendig. Beim Master-Slave-System ist die Spannung zwischen Kommunikationssystem und Erfassungssystem U_{Slave} durch die Anzahl der zu verwaltenden Zellen mit der Spannung U_B deutlich geringer. Hier gilt für n Zellen in m Slaves:

$$U_{Slave} = \sum_{1}^{\frac{n}{m}} U_B \leq \frac{U_{Bat}}{2} \qquad \text{für } n > 1, m > 1 \tag{3.5}$$

Die Tabelle 3.2 bildet die Unterschiede in den Eigenschaften der Architekturen nochmals übersichtlich ab.

Eigenschaft	Master-Slave-System	Bus-System
Zentraler Controller	✓	✓
Geringer Verkablungsaufwand	✗	✓
Geringer Hardwareaufwand	✓	✗
Spannungsunempfindlich	✓	✗
Skalierbar	(✓)	✓
Legende:	✓: zutreffend	✗: nicht zutreffend

Tabelle 3.2: *Eigenschaften von BMS-Architekturen*

3.2 Kommunikation

Die Kommunikation bezeichnet den Austausch oder die Übertragung von Informationen. Technisch wird mit Kommunikation meist die Übertragung von Daten gemeint. Unter der Datenkommunikation versteht man alle Methoden, die Informationen von einer Informationsquelle zu einer Informationssenke übermitteln [HUF06]. Die Information ist die zu übermittelnde Botschaft. Das Medium der Datenkommunikation kann analog (beispielsweise Sprache) oder digital (digitale Zeichen) sein. Die Informationen können dabei leitungsgebunden oder leitungslos übertragen werden.

3.2.1 Kanalzugriffsverfahren

Das Kanalzugriffsverfahren regelt den Zugriff mehrerer Teilnehmer auf ein gemeinsames Übertragungsmedium. Kanalzugriffsverfahren lassen sich anhand der Zuteilung des Kanals unterscheiden. Eine Zuteilung kann zentral sein, das heißt ein Master teilt Slaves den Kanal zu, oder dezentral sein, wobei alle Teilnehmer gleichberechtigt sind. Darüber hinaus kann die Zuteilung deterministisch sein, das heißt es existiert für jeden Teilnehmer eine maximale Zeit bis zum nächsten Zugriff, während bei der nichtdeterministischen Zuteilung dieses Maximum nicht definiert ist [KUP07].
Wichtigstes Ziel beim Kanalzugriffsverfahren ist, dass die Wahrscheinlichkeit, dass zwei Teilnehmer gleichzeitig auf den Kanal zugreifen, minimal ist. Dies wird meist durch eine Kanalüberwachung, Listen-Before-Talk (LBT), beziehungsweise mit einem gemeinsamen Kanalzugriff als Carrier Sense Multiple Access (CSMA), erreicht. In der Literatur werden die Technologien beschrieben (zum Beispiel [GER94]).

3.2.2 Kommunikationsprotokoll

Ein Kommunikationsprotokoll legt fest, wie die Kommunikation zwischen zwei Punkten abläuft. Sie ist wie folgt definiert: „Ein Protokoll ist eine (syntaktische und prozedurale) Spezifikation der Vorschriften und Regeln zum Informationsaustausch zwischen zwei Partnern auf der derselben Stufe (hinsichtlich Dienstelementen) eines Kommunikationssystems“ [PRO02]. Protokolle unterschieden sich stark untereinander. Sie enthalten Aussagen über logische Datenobjekte (Syntax), das virtuelle Kommunikationsmedium, die Kommunikations-Konvention (Prozedurales) und die Auswirkung der Nachricht (Semantik) [PRO02].

3.3 Zusammenfassung des Standes der Technik

Im Stand der Technik wurden die Funktionalitäten eines BMS dargestellt und auf mögliche Architekturen eingegangen. Bekannte Architekturen sehen dabei immer eine zentrale Einheit vor, welche die Funktionalitäten eines BMS in sich vereint.
Im Weiteren wurde aufgezeigt, dass sich die Leistungsfähigkeit eines BMS vor allem durch die Möglichkeit definiert, Ladungsungleichgewichte zwischen einzelnen Zellen auszugleichen und dadurch die Alterung der Zellen zu verlangsamen, weswegen besonders auf Balancing Systeme eingegangen wurde. Es zeigte sich bei der Analyse verschiedener Balancing-Methoden, dass nur wenige für eine modulare Bauweise geeignet sind. Die Bauweisen, welche eine Modularisierung erlauben, erfordern gegenwärtig einen erhöhten Verkablungsaufwand.

Darüber hinaus wurde auf die Grundlagen der Kommunikation eingegangen. Es wurde erklärt, dass für eine zufriedenstellende Kommunikation ein Kanalzugriffsverfahren sowie ein geeignetes Kommunikationsprotokoll notwendig ist.

Der Stand der Technik kennt kein modulares, dezentrales Batteriemanagementsystem. Demzufolge sind hier weitere Untersuchungen notwendig.

4 Lösungsansatz

In diesem Kapitel wird die Intelligente Zelle eingeführt. Sie stellt den Ansatz für ein verteiltes BMS dar, welcher aus dem Stand der Technik in dieser Form noch nicht bekannt ist.

4.1 Ansatz zur Entwicklung eines verteilten BMS - Intelligente Zelle

In Abschnitt 3.1 wurden die Anforderungen an ein Batteriemanagement-System, wie es auch für den Einsatz in reinen Elektroautos eingesetzt wird, aufgezeigt. Bei den am Markt erhältlichen Fahrzeugen ist die Traktionsbatterie fest integriert (siehe Abschnitt 1.2) und verbleibt während ihres gesamten Lebenszyklus im Fahrzeug. Eine Standardisierung der Batterie - auch in Teilen - verspricht durch einen möglich werdenden Wettbewerb und höhere Stückzahlen, aufgrund der reduzierten Produktpalette, Kosteneinsparungen [BHAG13], [REE93].

Es wurde ein Batteriewechselsystem von den Unternehmen Betterplace und Renault entwickelt, das es dem Nutzer erlaubt, statt dem zeitaufwändigen Laden eines Fahrzeugs, einen Austausch der ganzen Batterie vorzunehmen.

Dies ist eine Möglichkeit der schnellen Reichweitenverlängerung. Weitere Möglichkeiten sind das Schnellladen, die anhängerbasierte Reichweitenverlängerung oder Nutzung eines beispielsweise benzinbetriebenen Generators als Range-Extender. Die Lösung von Betterplace setzt jedoch eine standardisierte Batterie beziehungsweise eine standardisierte Schnittstelle zum Fahrzeug voraus. Die Normungsaktivitäten der CENELEC sehen eine mechanische Schnittstelle des Hebewerkzeugs für den Wechsel sowie eine elektrische Schnittstelle der Batterie zum Fahrzeug vor.

Man kann das System von Betterplace und Renault auch kritisch sehen. Setzt man voraus, dass Elektrofahrzeuge vorzugsweise im urbanen Umfeld eingesetzt werden, ist die Reichweite zwischen 80 km und 120 km ausreichend und stellt keine Einschränkung im täglichen Gebrauch dar [DEF12]. Der Vorteil durch die Batteriewechseltechnik ist, dass das Fahrzeug als Erstfahrzeug genutzt werden kann, da die vergleichsweise wenigen Fahrten im Jahr über größere Distanzen möglich gemacht werden. Es ist jedoch festzustellen, dass ein vollständig standardisiertes Batteriemodul die Gestaltung des Fahrzeugs einschränken kann. Ein solches konnte selbst innerhalb des als Beispiel zitierten Herstellers Renault nicht eingeführt werden.

Hier zeigt sich die Schwierigkeit Normungsaktivitäten, innerhalb oder gar zwischen unterschiedlichen Unternehmen, zu etablieren. Dennoch streben Automobilhersteller nach flexiblen, kostengünstigen Lösungen. Sogenannte Modulbaukastensysteme, bei denen Teile für mehrere Fahrzeugtypen verwendet werden können, versprechen Einsparungspotential.

Das Prinzip des Lösungsansatzes verfolgt einen Standardisierungsansatz, jedoch ohne das Design, die Philosophie und Marktplatzierung der Automobilkonzerne beziehungsweise Fahrzeugtypen einzuschränken, wie es beim Projekt von Better-

place der Fall ist. Ziel ist die Verbesserung des Dialogs zwischen unterschiedlichen Automobilkonzernen, Zellherstellern, Batterieherstellern und Zulieferern untereinander.

4.2 Grundgedanke

Der Aufbau der Batterie soll modular aus einzelnen, intelligenten, standardisierten Einzelzellen erfolgen. Ein aufgesetztes zellbasiertes BMS bildet eine standardisierte Schnittstelle. Der Akkublock stellt dabei mechanisch keine feste Einheit mehr dar, sondern wird durch die Einzelzellen, je nach gewünschten Anforderungen wie Form, Leistung oder Energiegehalt, zusammengesetzt. Die elektrischen Eigenschaften ändern sich dabei durch das aufgesetzte BMS nicht.

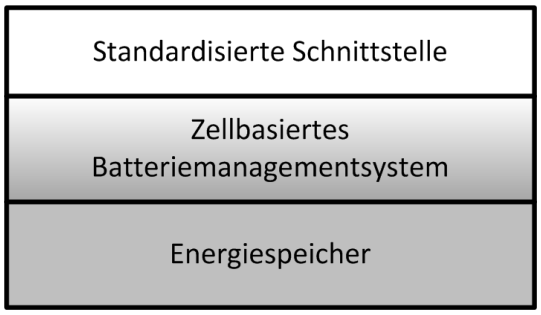


Abbildung 4.1: *Aufbau der Intelligenten Zelle*

Das BMS bietet nach außen eine Schnittstelle, um Daten an ein übergeordnetes System weitergeben zu können. Somit hat die „Intelligente Zelle“ eine standardisierte Schnittstelle zum umliegenden System (siehe Abbildung 4.1).

4.3 Anforderung

Zunächst definieren die Anforderungen an ein BMS (siehe Abschnitt 3.1) die grundlegenden Funktionalitäten an die Elektronik der Intelligenten Zelle. Dazu gehören die Überwachung der Zellspannung, des Entlade- und Ladestroms und der Zelltemperatur. Da der vorliegende Ansatz keine zusätzlichen elektrischen Sicherheits- oder Kontrollelemente vorsieht, muss die Intelligente Zelle über zusätzliche Funktionalitäten verfügen.

Anforderungen an die Intelligente Zelle sind:

- **Sicherheitsschalter:** Die Schaltung muss über einen Schutz verfügen, welcher den Energiefluss derart beeinflussen kann, dass ein Über- beziehungsweise Unterschreiten des zulässigen Bereiches, zum Beispiel im Kurzschlussfall, verhindert wird.

- **Ereignisspeicher:** Die Zelle soll ihren Lade- und Gesundheitszustand laufend ermitteln und wichtige Ereignisse, welche die Leistungsfähigkeit oder Sicherheit der Zelle, auch zu einem späteren Zeitpunkt, beeinträchtigen können, abspeichern.

- **Ladeelektronik:** Das fest installierte System soll die Zelle laden können. Idealerweise ist der Ladevorgang frei definierbar und ermöglicht so zum Beispiel ein vom Alterungszustand abhängiges Ladeprogramm.

- **Balancing:** Das System soll über einen möglichst verlustfreien Mechanismus verfügen, einen Ladungsausgleich innerhalb des Verbunds zu ermöglichen,

um die Energieausbeute des Verbundes zu maximieren. Dieser soll nach Möglichkeit keine zusätzliche Verkabelung erfordern.

- **Geringe Leistungsaufnahme der Hardware:** Die Leistungsaufnahme der Elektronik soll möglichst gering sein, damit der Großteil der gespeicherten Energie dem Verbraucher zur Verfügung steht.

- **Kommunikation:** Jede Zelle muss über eine Kommunikationsschnittstelle verfügen, die möglichst ohne zusätzlichen Verkabelungsaufwand und den damit verbundenen Einschränkungen zu implementieren ist. Benachbarte Zellen sollen miteinander oder mit einer anderen Einheit, wie der Bordelektronik, kommunizieren, um Batterieinformationen für Nutzer und Fahrzeug bereit stellen zu können.

- **Arbitrierung:** Die Zellen sollen sich softwareseitig selbst organisieren und konfigurieren, wofür eine Arbitrierung notwendig ist.

4.4 Konzept

In Abbildung 4.2 ist das Konzept der Intelligenten Zelle dargestellt. Es unterscheidet zwischen Energieelementen (rot) und Kommunikations- beziehungsweise Analyseelementen (grün).

Der Energiespeicher wird über Leistungsschalter mit der Leistungsverkabelung verbunden. Die Schalter sind als Vollbrücke (H-Brücke) geschaltet und realisieren so ein erweitertes vollständiges Shunting, wie es in Abschnitt 3.1.6 beschrieben wird.

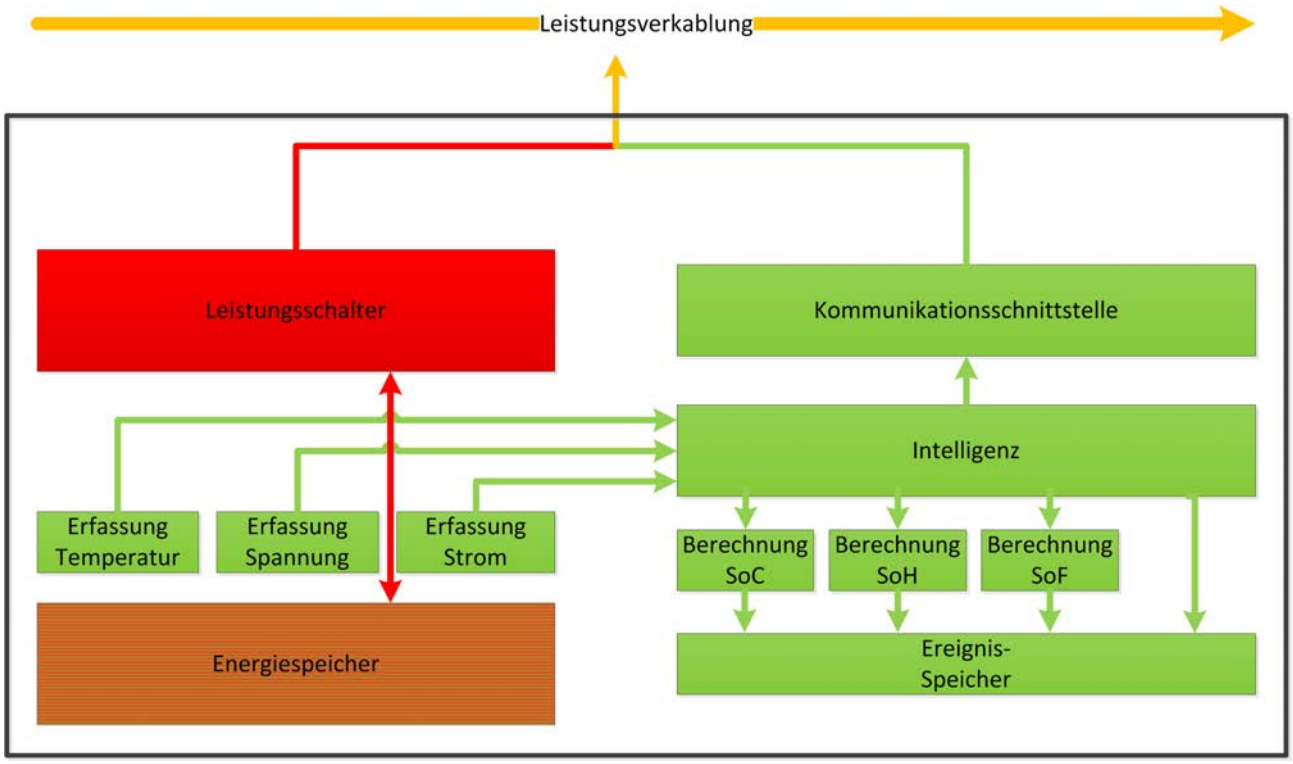


Abbildung 4.2: *Darstellung des Energie- und Informationsflusses innerhalb der Intelligenten Zelle*

Es vereint mehrere Funktionen. Zum einen wirkt es als Balancer für den Verbund und sorgt so für einen optimal verteilten Lastfluss. Zum anderen ist die Polarität der Außenkontakte der Intelligenten Zelle wechselbar um eine größtmögliche Flexibilität und Sicherheit bei der mechanischen Verschaltung zu erreichen. Gleichzeitig dient es als Sicherheitsschalter, welcher die galvanische Zelle von der Leistungsverkablung trennen kann. Im Gegensatz zu Abbildung 3.10 sind beide Außenkontakte über ein Schaltelement vom Energiespeicher getrennt.

Die Erfassung der Temperatur, der Spannung und des Stromes findet direkt an der galvanischen Zelle über entsprechende Sensoren statt, die unmittelbar mit einem Mikrocontroller (Intelligenz) verbunden sind. Dieser kann auf Basis der erfassten Größen den SoC (siehe Abschnitt 3.1.2), den SoH (siehe Abschnitt 3.1.3) und den SoF (siehe Abschnitt 3.1.4) berechnen. Die Daten werden zusammen mit Fehler-

meldungen, wie beispielsweise Übertemperatur, in einem Speicher (Ereignisspeicher) abgelegt. Die Kommunikation erfolgt aus dem Mikrocontroller über einen Modulator direkt auf die Leistungsverkabelung.

4.4.1 Architektur

Die vorliegende Architektur ähnelt augenscheinlich sehr der Bus-Architektur (siehe Abschnitt 3.1.7). Der entscheidende Unterschied ist jedoch, dass die Funktionalität des BMS auf Zellebene autark sichergestellt ist, das heißt, dass kein übergeordnetes System oder Teilsystem die einzelnen Zellen zyklisch überprüfen und gegebenenfalls Maßnahmen ergreifen muss (siehe Abbildung 4.3).

Vielmehr stellt die Elektronik der Intelligenten Zelle selbst einen sicheren Betrieb her. Außerdem zeichnet die Elektronik die Verwendung der Batteriezelle auf und erstellt eine Art Fehlerspeicher. Hier sind neben dem SoH auch Ereignisse, die einen Spontanausfall der Zelle begünstigen können (beispielsweise Unfall) enthalten. Die Diagnose und Wartung der Batterie wird vereinfacht und ein Einzelzellentausch ermöglicht. Außerdem sind die Daten bei der Abwicklung von Gewährleistungsansprüchen hilfreich. Darüber hinaus ist mit diesen Daten eine Positionierung der Zelle in einem Second Life Markt (siehe Abschnitt 2.2.3) optimal möglich.

Für diesen Ansatz ist es unerheblich, welche Anzahl und Bauform von den mit der zusätzlichen Hardware versehenen Batteriezellen im Fahrzeug verbaut werden und ob sie fest oder austauschbar integriert sind.

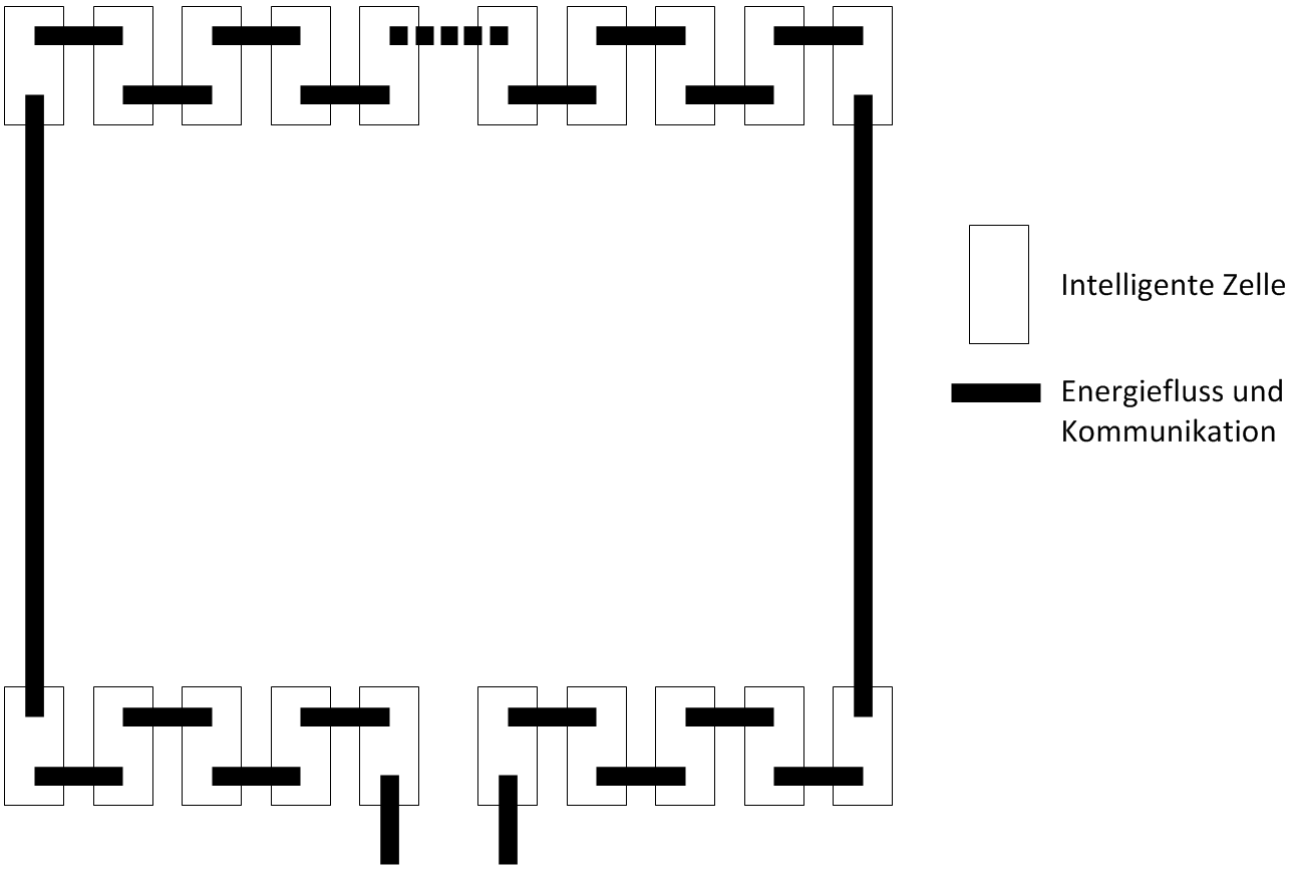


Abbildung 4.3: *Architektur des BMS mit der Intelligenten Zelle*

Somit besteht jede Intelligente Zelle aus einem Energiespeicher und einer Elektronik für die Intelligenz. Es sind als Energiespeicher neben der klassischen Batteriezelle auch andere Gleichspannungsquellen wie beispielsweise Supercaps, Solarzellen, Brennstoffzellen und Kombinationen aus diesen denkbar. Eine Menge an Intelligenten Zellen bildet ein verteiltes Batteriemanagementsystem, mit anderen Energiespeichern oder Gleichspannungsquellen ein verteiltes Energiemanagementsystem.

4.4.2 Kommunikation

Im Folgenden wird der Lösungsansatz für die Kommunikation der Intelligenten Zellen, unter Berücksichtigung der Randbedingungen, vorgestellt.

Hardware

Für die Kommunikation der Intelligenten Zellen untereinander, aber auch zu einem übergeordneten System, kommen grundsätzlich verschiedene Möglichkeiten in Betracht (siehe Tabelle 4.1).

Art	Vorteile	Nachteile
Drahtgebunden (eigene Verdrahtung)	Wenig Schaltungsaufwand, sicher, schnell	Potentialtrennung, Zusätzlicher Verkablungsaufwand
Drahtgebunden (aufmoduliert)	Keine zusätzliche Verkablung, Potentialtrennung	Schaltungsaufwand, eingeschränkte Geschwindigkeit, EMV
Drahtlos	Keine zusätzliche Verkablung, Potentialtrennung	Schaltungsaufwand, eingeschränkte Geschwindigkeit, EMV, Störanfälligkeit

Tabelle 4.1: *Möglichkeiten der Kommunikation von Intelligenten Zellen untereinander*

Es ist naheliegend, die vorhandene Leistungsverkablung zu nutzen und ein hochfrequentes Signal auf die Leitung aufzumodulieren. Dieses Verfahren wird Powerline-Kommunikation (PLC) genannt. Diese Technik findet vor allem Einsatz bei der Hausvernetzung von Computern oder Hausautomatisierung. Dort werden auf das häusliche 230 V Stromnetz Daten aufmoduliert. PLC bietet Vorteile gegenüber anderen Übertragungstechnologien (siehe Tabelle 4.2).

Vorteil	Folge
Deutliche Reduzierung der Verkabelung	Kostenminderung
Reduktion der Systemkomplexität	Kostenminderung
Einfache nachträgliche Erweiterung um Systemkomponenten	Modularisierung möglich
Senkung der Fehleranfälligkeit durch defekte Leitungen	Höhere Sicherheit
Verringerte Anzahl an Verbindungsstellen (z. B. Steckverbinder)	Weniger Fehlerquellen
Vergrößerter Schutz vor Störungen durch digitale Übertragungsverfahren	Höhere Sicherheit
Geringerer Projektierungs- und Montageaufwand	Kosten- und Zeitminderung
Weniger Platzbedarf und geringeres Gewicht	Höhere Flexibilität

Tabelle 4.2: *Vorteile der Powerline-Kommunikation (angelehnt an [VERL10])*

Besonders kritisch sind die Sicherheit und Störungsanfälligkeit zu bewerten, die in direktem Zusammenhang stehen. Die PLC Kommunikation erfolgt über einen Halbduplexkanal, was bedeutet, dass auf dem Kanal eine wechselseitige Kommunikation, jedoch nicht zum gleichen Zeitpunkt, erfolgt. Eine Kollisionsvermeidung kann mittels eines Kommunikationsprotokolls softwareseitig sichergestellt werden. Gerade im automotiven Umfeld muss ein solches System gegenüber der Umwelt (Störemission), gegenüber dem System selbst (Eigenstörfestigkeit) und gegenüber externen Störern (Fremdstörfestigkeit) sicher sein. Die Eliminierung der Störung erfolgt durch geeignete Hardwaremaßnahmen. In diesem umfangreichen Feld gibt es verschiedene Untersuchungen und Aktivitäten (zum Beispiel [KIST06]). Diese Arbeit konzentriert sich auf die Aspekte des verteilten Systems, daher wird hier nicht näher auf die physikalischen Eigenschaften der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) von PLC-Systemen eingegangen.

Die Anforderungen an ein PLC-System für die Intelligente Zelle sind:

- sicher
- robust
- leistungsfähig
- energiesparend
- reihenschaltungstauglich

Weniger wichtig ist die Geschwindigkeit, da keine zeitkritischen Prozesse gesteuert werden müssen und das Datenaufkommen, durch die in jeder Zelle vorhandene Intelligenz (Eigensicherheit), gering ist.

Auf dem Markt sind wenige integrierte Schaltkreise für die sichere Gleichspannungs-PLC verfügbar. PLC-Systeme aus der Heimnetzwerktechnik scheiden wegen ihrer Empfindlichkeit und fehlenden Fähigkeit viele Kommunikationseinheiten an einem Übertragungskanal zu verwalten aus. Andere verfügbare PLC-Systeme, die für einen parallelen Betrieb ausgelegt sind, können für die in Reihe geschaltete Intelligente Zelle ebenfalls nicht verwendet werden.

Abbildung 4.4 zeigt die Anordnungen, bei der Impedanzen, zum Beispiel eine Batterie Z_B und eine Last Z_L, verschaltet sind. Über der Impedanz Z_B wird eine Spannung U_{mod} aufmoduliert. Während bei der Parallelschaltung der Modulationspegel $U_{mod_{ZB}}$ an allen Teilnehmern gleich ist, teilt sich die Spannung bei der Reihenschaltung anteilig auf.

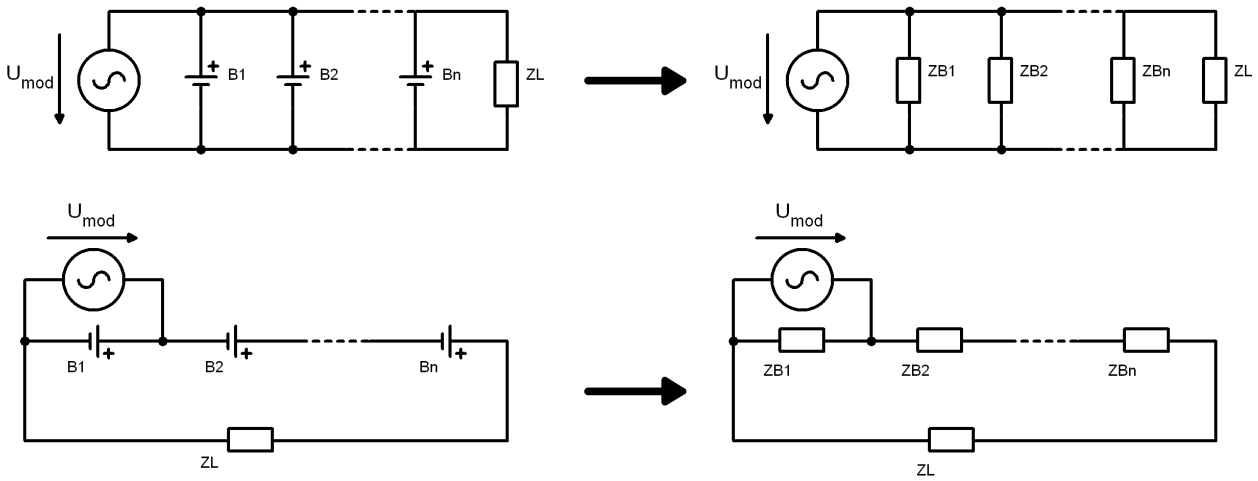


Abbildung 4.4: *Ersatzschaltbild der Parallelschaltung und Reihenschaltung*

Es gilt für den Modulationspegel $U_{mod_{ZB}}$ an den einzelnen Teilnehmern Z_B für die Reihenschaltung mit n Elementen:

$$U_{mod_{ZB}} = \frac{Z_B}{(n-1) \cdot Z_B + Z_L} \cdot U_{mod} \tag{4.1}$$

Der ausgekoppelte Pegel ist für große n um die Anzahl der Einheiten verringert, vernachlässigt man die Impedanz Z_L der Last.

$$\frac{U_{mod_{ZB}}}{U_{mod}} = \frac{Z_B}{(n-1) \cdot Z_B + Z_L} \approx \frac{1}{n} \tag{4.2}$$

Dies ist zum Beispiel möglich, indem die Ausgangsklemmen der Batterie im modulierten Frequenzbereich niederohmig, beispielsweise kapazitiv, verbunden werden.

Software

Die Kommunikation der Intelligenten Zellen untereinander ist über ein PLC-System realisiert (siehe Abschnitt 4.4.2). Dieses System verhält sich wie ein Bus-System. Jedoch ist bei der Intelligenten Zelle kein übergordnetes System vordefiniert, das eine Kanalzugriffsteuerung auf dem Halbduplex-Kanal vornehmen kann um Datenkollisionen zu vermeiden. Daher besteht die Notwendigkeit ein neues Kanalzugriffsverfahren, eine Arbitrierung, zu implementieren, die besonders unter Berücksichtigung der Eigenschaften des schmalbandigen Kommunikationskanals agiert.

PLC-Netzwerke ähneln drahtlosen Netzwerken, wie WLAN, Bluetooth oder ZigBee. Die Standardprotokolle dieser Technologien sehen vor allem die Kollisionsvermeidung auf dem Kanal und die dynamische Rekonfigurierbarkeit des Netzes vor. Die Standards basieren auf eindeutigen statischen Netzwerkadressen und spezifischen Kollisionsvermeidungsprotokollen wie beispielsweise CSMA/CA, die bei WLAN-Verbindungen genutzt werden.

Um die Technik für die Intelligente Zelle möglichst einfach und schlank zu halten wird auf eine eindeutige Adressierung verzichtet. Dadurch wird das System herstellerunabhängig und benötigt keine zentrale Koordination, welche eindeutige Adressen für Batterien vergeben müsste. Nachteilig ist, dass hierfür eine neue Methode der Adressierung beziehungsweise Adresszuweisung entwickelt werden muss.

4.4.3 Leistungsstellglied

Die Intelligente Zelle soll über ein leistungsfähiges Ladungsausgleichskonzept verfügen. Darüber hinaus soll sie die Sicherheit auf Zellebene sicherstellen. Basierend auf der Analyse der verschiedenen Balancing-Technologien (siehe Abschnitt 3.1.6) erscheint das vollständige Shunting am geeignetsten. Mit dem Verfahren ist es möglich, ein verlustfreies Balancing zu erreichen und die Zelle vom Stromkreis zu trennen, um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten.
Das vollständige Shunting soll für die Intelligente Zelle versuchsweise mit fünf Schaltern realisiert werden. Der Stand der Technik beinhaltet nur eine Umsetzung mit zwei Schaltern - dabei entfällt jedoch die Möglichkeit die Batteriezelle zu den Außenkontakten umzupolen. Vier Schalter sind als H-Brücke ausgeführt, ein Schalter Q_1 steuert den Ladestrom. Dieser Aufbau ermöglicht es, die Ausgangsklemmen der Intelligenten Zelle beliebig gepolt auf die Batteriezelle zu schalten.

Die Schalter Q_n sollen durch Leistungs-MOSFETs ausgeführt werden. Abbildung 4.5 zeigt die Verschaltung der Elemente.

Es sind vier Betriebsmodi der Intelligenten Zelle vorgesehen:

- Energieabgabe
- Laden
- Shunting
- Stand-By

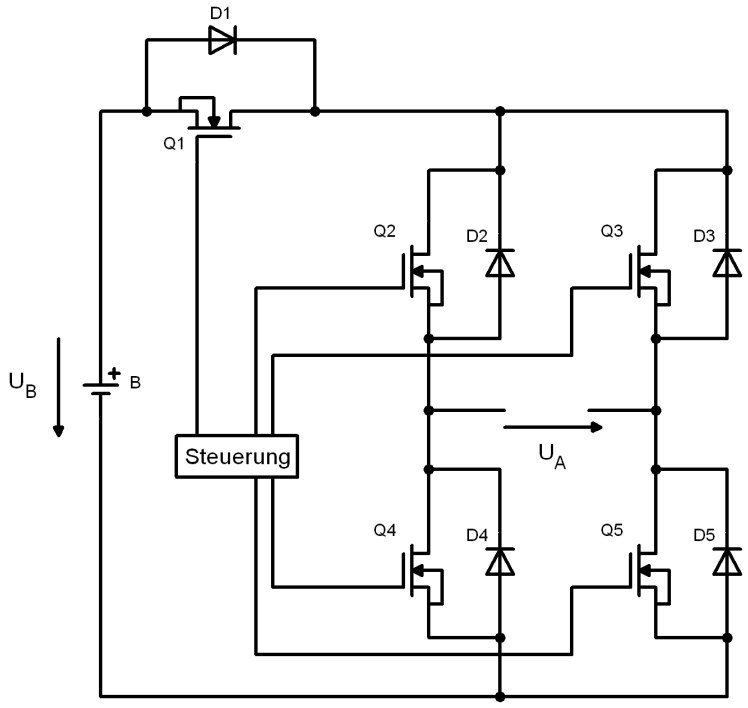


Abbildung 4.5: *Leistungsstellglied*

Es ist darauf zu achten, dass niemals Q_2 und Q_4 beziehungsweise Q_3 und Q_5 gleichzeitig geschaltet werden. Um diesen Kurzschluss, der beim dynamischen Schalten auch nur kurz auftreten kann, zu verhindern, sind entsprechende Verzögerungszeiten einzuhalten.

Für die Energieabgabe oder das Rekuperieren von Energie im Betrieb sind entweder Q_2 und Q_5 oder Q_3 und Q_4 geschaltet. Durch unterschiedliches Schalten vertauscht sich an den Anschlussklemmen die Polarität (siehe Abbildung 4.6). Um den Leistungsfluss auch beim Rekuperieren zu ermöglichen muss Q_1 ständig geöffnet sein.

Soll die Intelligente Zelle in das Shunting, das heißt ohne Energieabgabe, niederohmig geschaltet werden, sind entweder Q_2 und Q_3 oder Q_4 und Q_5 zu schalten (siehe Abbildung 4.7).

Dies repräsentiert ein Herausschalten der Zelle aus der Batterie, ohne den Laststrom zu unterbrechen.

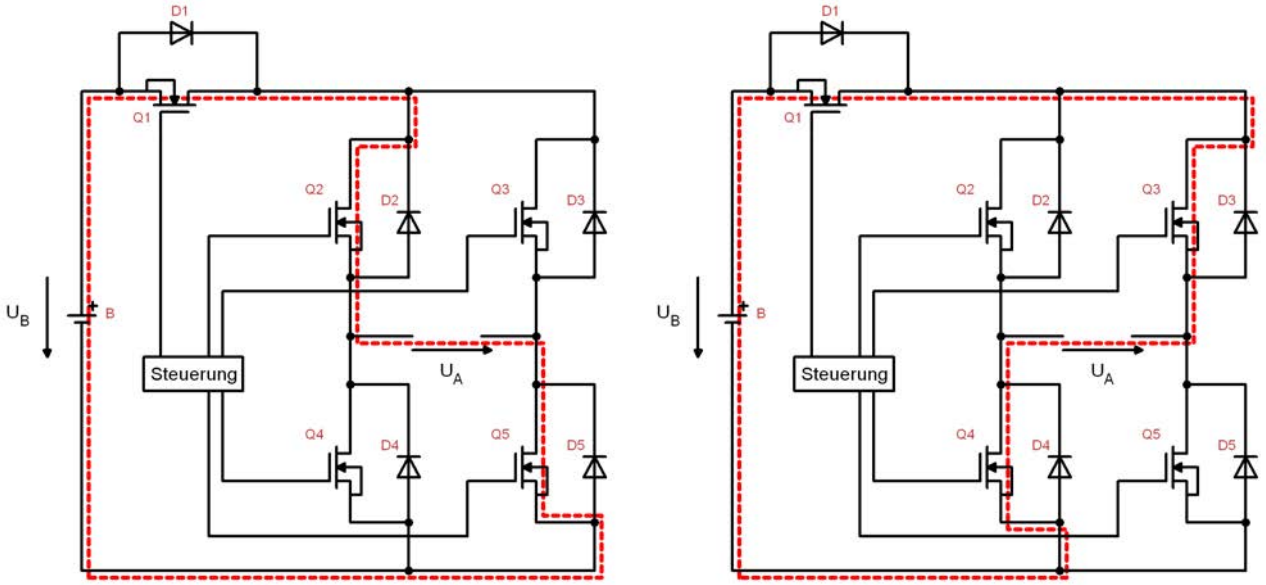


Abbildung 4.6: *Leistungsstellglied bei Energieabgabe*

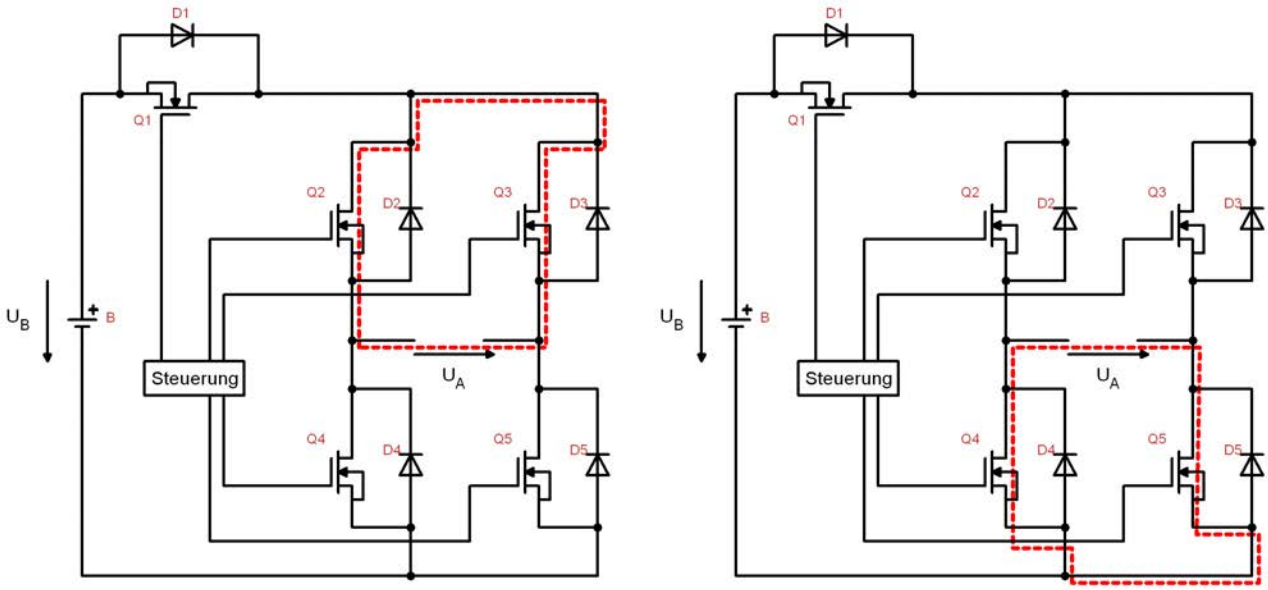


Abbildung 4.7: *Leistungsstellglied bei niederohmigen Anschlussklemmen*

Soll die Intelligente Zelle hochohmig, also in den Stand-By-Modus, geschaltet werden, wird kein MOSFET geschaltet. Beispielsweise in einem Fehlerfall ist weder Energiefluss aus noch durch die Intelligente Zelle möglich. Auch bei einem Ausfall der Ansteuerung ist die Intelligente Zelle hochohmig und sicher, da die Transistoren ohne Ansteuerung sperren.

Das Laden soll je nach SoH der Zelle individuell gesteuert werden, daher unterbricht beim Laden der Schalter Q_1 den Fluss in die Zelle. Ein separater Hardwareteil übernimmt den kontrollierten Energiefluss in die Zelle.

Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Funktion	Potenzial U_A
1	1	0	0	1	Leistungsabgabe	U_B
1	0	1	1	0	Leistungsabgabe	$-U_B$
0	1	0	0	1	Laden	U_B
0	0	1	1	0	Laden	$-U_B$
X	1	1	0	0	Niederohmig	0
X	0	0	1	1	Niederohmig	0
X	0	0	0	0	Hochohmig	nicht. def.
Rest					Verboten	-

Tabelle 4.3: *Wertetafel des Leistungsstellglieds*

Tabelle 4.3 zeigt die Wertetafel für die vorgestellten Betriebsmodi und das an den Außenklemmen der Intelligenten Zelle vorhandene Potenzial U_A.

4.5 Vergleich zwischen herkömmlichen und verteilten Batteriemanagementsystem

Ein herkömmliches Batteriemanagementsystem wird eigens für jeden Zellverbund entwickelt und ist fest in den Verbund integriert. Dieser Verbund ist eine nicht trennbare Einheit, dessen Größe, Kapazität und Leistung durch den Aufbau definiert ist.

Bei dem verteilten Ansatz besitzt der Akkublock jedoch keine feste Größe. Diese wird erst durch das Zusammenfügen der einzelnen Intelligenten Zellen bestimmt. Die Größe, Kapazität und Leistung sind variabel skalierbar und können je nach gewünschten Anforderungen gewählt werden. Dadurch wird eine höhere Flexibilität erreicht.

Durch den verteilten Aufbau des Akkublocks aus standardisierten Einzelzellen ergeben sich unter anderem folgende neue Möglichkeiten:

- **Effektivität und Skalierbarkeit**: Batteriemanagementsysteme müssen bei der Konstruktion des Fahrzeugs nicht neu dimensioniert und validiert werden. Allein die Verbindung der Zellen ist ausreichend. Selbst im selben Fahrzeugtyp sind kundenindividuelle Batteriekapazitäten möglich.

- **Flexibilität**: Die vielfältige dezentrale Unterbringung im Fahrzeug ermöglicht eine hohe Flexibilität bei der Gestaltung des Fahrzeugdesigns. Die Möglichkeit unterschiedliche Zellen oder andere Technologien einzusetzen, wirkt sich ebenfalls positiv auf die Flexibilität aus.

- **Robustheit**: Defekte Zellen haben keine Auswirkung auf die Funktionalität des Batteriesystems. Es entfällt eine aufwändige und teure Reparatur der ganzen Batterie beim Versagen einzelner Zellen. Defekte Zellen können schnell und einfach bei der nächsten Wartung gegen neue ersetzt werden.

- **Sicherheit**: Die Sicherheit kann auf Zellebene hergestellt werden, wodurch ein Teilausfall der Batterie, beispielsweise einer Zelle, die Sicherheit und Funktionalität des Gesamtsystems nicht beeinträchtigt.

- **Optimierung**: Da jede Zelle über eine eigene Elektronik verfügt, die auch den Leistungsfluss steuern kann, ist eine Optimierung des Lade- beziehungsweise Entladevorgangs vorstellbar. Dies kann zum Beispiel durch dynamisches Zu- und Abschalten einzelner Intelligenter Zellen, je nach Anforderung und deren Eigenschaft, erfolgen. Dadurch können beispielsweise energiedichte Lithium-Ionen-Zellen effektiv mit leistungsdichten Supercaps verbunden werden.

- **Life-Cycle**: Die Überführung der Zellen in ein Second Life wird durch das Bereitstellen der Historie der Zellen vereinfacht. In Abschnitt 2.2.3 ist dargestellt, dass durch die unterschiedlichen Konstruktionen von Batterien Probleme entstehen. Eine standardisierte Hardware kann den Recyclingprozess vereinfachen, da eine Automatisierung einfacher umsetzbar ist.

In Tabelle 4.4 sind die Eigenschaften nochmals übersichtlich dargestellt.

Der Ansatz zur Konzeption der Intelligenten Zelle wurde in Form eines Patentes angemeldet und bereits im Juli 2013 erteilt [BRIX13].

Merkmal	Zentralisiertes BMS	Verteiltes BMS
Einfache Skalierbarkeit des BMS	✗	✓
Individuelle Behandlung des Energiespeichers	✗	✓
Zellbasierter Ereignisspeicher	✗	✓
Erhöhte Sicherheit	✗	✓
Vereinfachtes Recycling	✗	✓
Legende:	✓: zutreffend	✗: nicht zutreffend

Tabelle 4.4: *Vergleich zwischen einem zentralisierten BMS und einem verteilten BMS*

5 Realisierung

Die wesentlichen Implementierungsschritte der Intelligenten Zelle sind zum einen die elektrische Schaltung (Hardware) und zum anderen die Programmierung des BMS beziehungsweise des Mikrocontrollers (Software). Im folgenden Abschnitt wird der Lösungsansatz (siehe Abschnitt 4) in die entsprechenden funktionalen Einheiten überführt.

Es ist zu beachten, dass dieser Aufbau einen Laboraufbau darstellt, mit dem Ziel die prinzipielle Machbarkeit des Ansatzes und dessen Funktionalität nachzuweisen. Alle Bauelemente sind daher ohne die Berücksichtigung von Kosten und in ausreichend dimensionierter Leistungsfähigkeit ausgewählt worden.

5.1 Elektrische Schaltung

Die Überführung des Konzeptes in einen Aufbau lässt sich in unterschiedliche Funktionsblöcke aufteilen, welche im Folgenden beschrieben werden:

- **Logik und Datenerfassung**, bestehend aus Mikrocontroller, Polungserkennung, Spannungs- und Stromerkennung

- **Leistungsstellglied**, bestehend aus einer MOSFET Vollbrücke mit zugehöriger Treiberschaltung
- **Kommunikation**, bestehend aus einem PLC-Schaltkreis und Einkopplungschaltung

Darüber hinaus verfügt der Laboraufbau über die folgenden weiteren Elemente:

- Spannungsaufbereitung
- Datenspeicher
- Funktionsanzeige (LEDs)
- Ladeschaltung

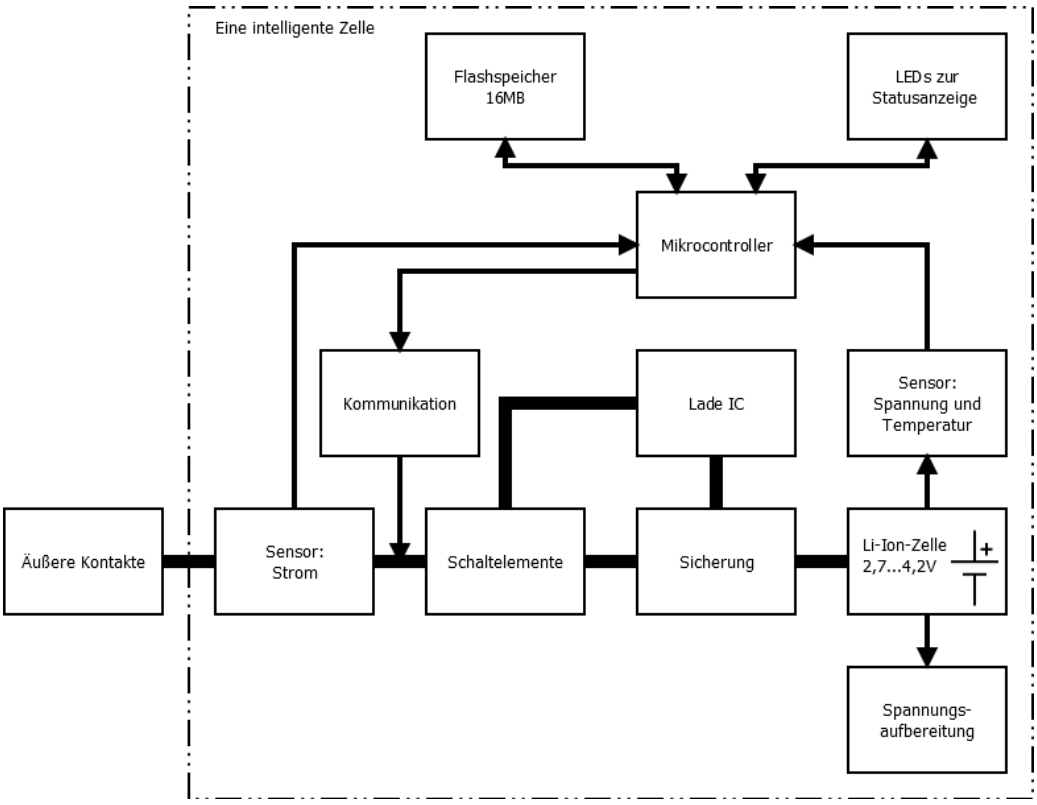


Abbildung 5.1: *Blockschaltbild des Laboraufbaus*

Abbildung 5.1 zeigt das Blockschaltbild der Laborhardware.

5.1.1 Logik- und Datenerfassung

Die Logik- und Datenerfassung stellt mit dem Mikrocontroller das Kernstück der Schaltung dar. Um den Anforderungen eines BMS gerecht zu werden, führt er unter anderem folgende Aufgaben aus:

- Initialisierung und Überwachung aller Hardwarekomponenten
- Steuerung des Betriebsablaufs in:
  - Laden
  - Entladen
  - Stand-By
- Ausführen der Kommunikation
- Auswerten der Sensordaten
  - Batteriestrom
  - Batteriespannung
  - Batterietemperatur
- Aufzeichnen der Messgrößen
- Überwachung und Steuern des Ladevorgangs
- Überwachung des Entladevorgangs

Der Mikrocontroller verfügt über interne Analog/Digital-Wandler (A/D-Wandler), die für die Sensorerfassung genutzt werden sowie interne Timer, die im Betriebsablauf verwendet werden. Darüber hinaus verfügt der Controller über alle gängigen Schnittstellen wie SPI, I²C, USART und USB, die für den benötigten Datenaustausch genutzt werden.

Die Ladeschaltung, der Speicher und die Kommunikation sind über unterschiedliche Busse an den Mikrocontroller angebunden. Die Auswertung der Spannungs- und Strommessung erfolgt über die internen 12-Bit A/D-Wandler. Als Referenzspannung dient die aufbereitete Versorgungsspannung des Systems. Die Batterietemperatur wird zunächst über den im Mikrocontroller integrierten Temperatursensor erfasst. Eine Erweiterung der Temperaturerfassung kann über externe Temperaturfühler leicht durchgeführt werden. Die Sensoren, das Kommunikationsmodul, der Ladecontroller und der Speicher lassen einen Sleep-Modus mit minimaler Energieaufnahme zu, welcher ebenfalls durch den Mikrocontroller gesteuert wird.

5.1.2 Speicher

Die Speicherung von Messdaten ist über einen Flashspeicher realisiert. Im Speicher befindet sich die Historie der Zelle. Diese besteht im Versuchsaufbau aus Zeitstempel, Spannung, Strom und Temperatur, welche mit einer Abtastrate von 10 Hz abgelegt werden.
Aus den erfassten Daten können weitere abgeleitete Daten, wie beispielsweise SoC oder SoH, berechnet werden.

5.1.3 Statusanzeige

Für ein einfaches Auswerten von Funktionen und Fehlern sind verschiedenfarbige LEDs, die die korrekte Funktion, einen Fehler und die aktive Kommunikation anzeigen, auf der Platine vorgesehen. Sie verbessern die Evaluierung des Versuchsaufbaus.

5.1.4 Leistungsstellglied

Das Leistungsstellglied stellt eine wichtige funktionale Komponente der Hardware dar. Sie schaltet die Batteriezelle in den Verbund oder kann sie aus dem Verbund trennen.

Die Schalter Q_n sind durch Leistungs-MOSFETs mit einem niedrigen Durchgangswiderstand $R_{DS(on)}$ und internen Dioden ausgeführt. Die im Aufbau verwendeten MOSFETs haben ein $R_{DS(on)}$ von 1,7 mΩ bei einer Gate-Source-Spannung U_{GS} von 4,5 V.

Die Schaltung wird, wie in Abschnitt 4.4.3 beschrieben, aufgebaut.

5.1.5 Kommunikation

Für den Laboraufbau wurde zunächst ein kommerziell verfügbarer Halbleiter für die Modulation und Demodulation verwendet. Dieser wird direkt an das USART-Interface des Mikrocontrollers angeschlossen und verfügt über verschiedene Trägerfrequenzen von 1,75 MHz bis 13 MHz. Im Laboraufbau wird eine Trägerfrequenz von 6 MHz verwendet. Die zugehörige Wellenlänge λ ist 50 m. Bei den Abmaßen einer Traktionsbatterie von ca. 1 m ist die elektromagnetische Abstrahlung zu vernachlässigen. Der Halbleiter zeichnet sich laut Datenblatt auch bei geringen Signalpegeln durch eine sehr robuste Kommunikation aus.

5.2 Software

Alle Anforderungen, die vom BMS bereitgestellt werden, müssen durch die Software gesteuert und verwaltet werden. Dies beinhaltet auch die laufende Berechnung des aktuellen Zustands der Batterie (SoC, SoH und SoF). Besonders wichtig sind jedoch die Sicherheitsfunktionen, welche durch die Software gesteuert werden. Auf die Implementierung der grundlegenden Funktionen eines BMS (siehe auch Abschnitt 3.1.1) soll hier nicht näher eingegangen werden. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf den Besonderheiten der Software, die sich durch die verteilte Architektur ergeben.

Funktion	Beschreibung
Strom	Messung des Stroms über einen Hall-Sensor
Batteriespannung	Messung der Batteriespannung
Klemmenspannung	Messung der an den Außenklemmen anliegenden Spannung
Temperatur	Ermittlung der Temperatur der Zelle mittels des im Mikrocontroller verbauten Temperatursensors
Systemzeit	Lesen und Schreiben der Systemzeit über die Kommunikationsschnittstelle
Senden/Empfangen	Versenden und Empfangen von Nachrichten über das PLC-Modul
Schalten	Schalten und Statusabfrage der Schaltelemente
LED	Ansteuerung der LEDs

Tabelle 5.1: *Grundlegende Softwarefunktionen*

Tabelle 5.1 zeigt die implementierten Softwarefunktionen.

5.2.1 Sicherheitsfunktionen

Hauptsicherheitsfunktion ist das Herausschalten der Intelligenten Zelle aus dem Verbund bei Über- oder Unterspannung des Energiespeichers. Hierfür wird auf dem Mikrocontroller in einer Schleife laufend geprüft, ob eine gefährliche Spannung

anliegt und entsprechend das Leistungsstellglied (siehe Abschnitt 5.1.4) geschaltet. Dazu sind die Transistor-Schalter der Intelligenten Zelle über eine Ansteuerung (Treiber) mit Ein- und Ausgabekanälen des Mikrocontrollers verbunden.
Reale Stromprofile zeigen unter unterschiedlichsten Belastungen häufige Nulldurchgänge des Stroms (siehe Abschnitt 6.2). Diese können genutzt werden, um möglichst unter keiner oder wenig Belastung zu schalten. Im Betrieb wird eine gewisse Zeit, im Laboraufbau eine Minute, auf einen Nulldurchgang beziehungsweise ein Stromminimum von $\pm$ 10 A gewartet. Stellt sich dieser nicht ein, wird die Zelle auch unter Last geschaltet.
Die Software sieht ebenfalls das Herauschalten der Zelle bei einem festgestellten Defekt der Zelle oder Hardware vor. Auch kann durch einen externen Befehl die Funktion erzwungen werden und somit ein Stand-By aller Zellen bei besonders gravierenden Ereignissen erfolgen. Beispielsweise bei einem Unfall, können Kurzschlüsse, Kabelbrände und explodierende Zellen vermieden werden. Ebenfalls treten keine hohen Spannungen mehr auf. Damit bietet die Intelligente Zelle Schutz für Retter und Gerettete.

5.2.2 Kommunikation

Die Realisierung für die Kommunikation ist eine dynamische Master/ Slave Zuweisung, die einzelne Knoten, in diesem Fall Intelligente Zellen, als koordinierenden Master oder als Slave definiert. Dabei ist die Zuweisung der Rollen dynamisch und kann sich durch Änderungen im Netzwerk ebenfalls ändern.

Die Zuweisung des Masters erfolgt nach einem Schema, das auf Zufallszahlen basiert. Der Master bestimmt daraufhin dynamisch die Adressen der Slaves und weist sie diesen zu.

Die weitere Kommunikation erfolgt über den Master, der zyklisch die Slaves abfragt. Ein Teil der Kapazität des Kanals, im Laboraufbau etwa 10 %, wird für besondere Ereignisse, wie eine extern vorgegebene Notabschaltung, reserviert. In diesem Fall können die Slaves auch ohne Anfrage des Master Daten über den Kanal schicken.

Adressierung

Die Kommunikation zwischen den Intelligenten Zellen setzt eine eindeutige Identifizierbarkeit jedes Teilnehmers während einer Netzwerksitzung voraus. Die Adressbreite, das heißt die Menge unterschiedlicher Adressen, muss ausreichend sein, um auch große Systeme adressieren zu können. Dem gegenüber steht, dass eine zu große Adressbreite unnötig Daten auf dem Kanal verursacht. Da die Übermittlung der Daten im prototypischen Aufbau über die USART-Schnittstelle des Mikrocontrollers erfolgt, beträgt die kleinste Datenmengeneinheit 8 Bit. Bei der Verwendung einer Adressbreite von 8 Bit je Adresse kann das System 256 Knoten adressieren, was für große Anwendungen möglicherweise nicht mehr ausreichend ist. Daher erscheint eine Adressbreite von je 12 Bit für Sende- und Empfangsadresse sinnvoll.

Von nun möglichen 4096 Adressen, wird eine Adresse für den Kommunikationsmaster reserviert und 4 Adressen für spezielle Funktionen, wie zum Beispiel eine Broadcastadresse, die sich an alle Einheiten richtet, freigehalten (siehe Tabelle 5.2).

Adresse	Eigenschaft	Anzahl
000000000000_2	Master	1
000000000001_2 ⋮ 111111111011_2	Slave	4091
111111111100_2	Initialisierungsadresse	1
111111111101_2	Temporäre Adresse	1
111111111110_2	Reserviert	1
111111111111_2	Broadcastadresse, an alle Slaves gerichtet	1

Tabelle 5.2: *Adressverteilung unter Verwendung von* 12 Bit *Adressen*

Aufbau der Nachrichten

Eine Nachricht besteht aus dem Nachrichtenkopf sowie einer Prüfsumme am Ende der Nachricht, die zusammen den Nachrichtenrahmen bilden, und den eigentlichen Nutzdaten. Im Nachrichtenkopf sind die Quell- und Zieladresse sowie der Nachrichtentyp und die Möglichkeit für weitere Befehle enthalten. Die Interpretation der Nachricht, enthalten in den Daten des Nachrichtentyps, ist in jeder Zelle hinterlegt und legt auch die Menge der im Datenpaket enthaltenen Informationen fest. Übertragungsfehler können mit der Prüfsumme am Ende der Nachricht erkannt werden. Die Fehlerkorrektur erfolgt nach gängigen Verfahren, daher soll hier nicht näher darauf eingegangen werden.

Abbildung 5.2 zeigt den Aufbau einer Nachricht mit Quell- und Zieladresse, Angabe des Nachrichtentyps, zusätzlichen Daten oder Befehlen, optionalen Daten, abschließend gefolgt von der Prüfsumme.

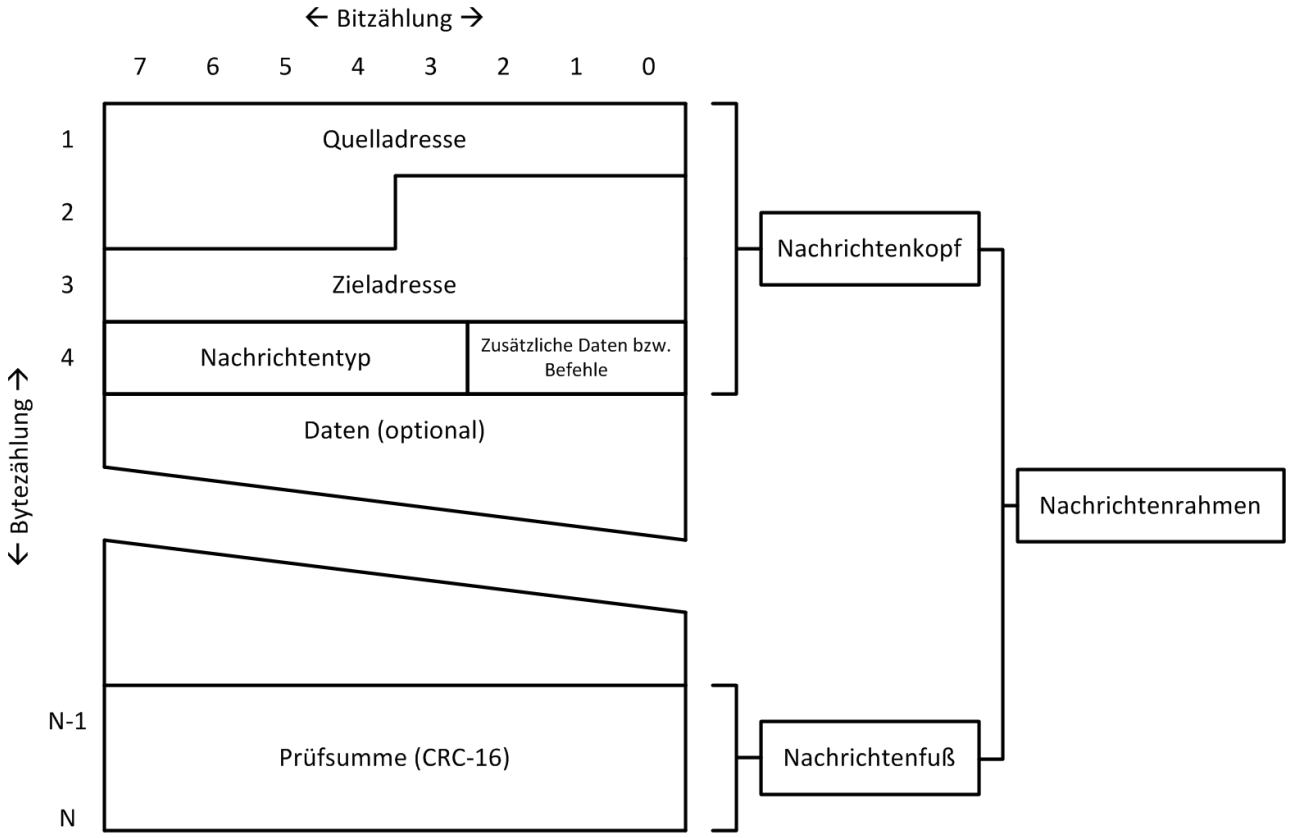


Abbildung 5.2: *Aufbau einer Daten-Nachricht*

Arbitrierung

Die Arbitrierung stellt die Besonderheit der Kommunikation im Protokoll dar. In der Arbitrierungsphase werden eindeutige Adressen vergeben. Bekannte Technologien können mit PLC in der vorliegenden Architektur nicht angewendet werden. Gründe hierfür sind der Halbduplex-Kanal, welcher Senden und Empfangen nur auf demselben Kanal erlaubt und die große Anzahl an Teilnehmern.

Für die Arbitrierung werden feste Zeiträume (siehe Abbildung 5.3) definiert, in denen unangemeldete Zellen eine Adresse erfragen können.

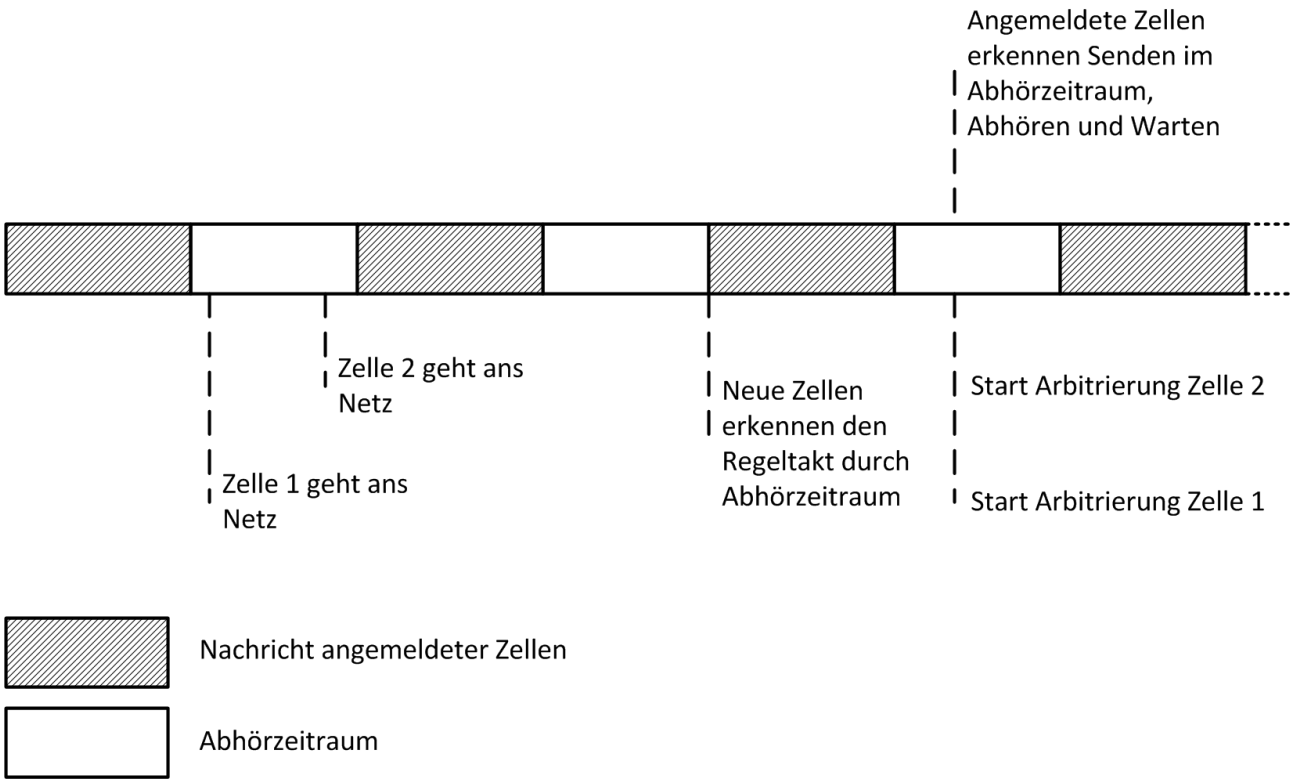


Abbildung 5.3: *Zeitliche Abfolge des Arbitrierungszeitpunktes*

Die Basis für die Arbitrierung ist das Senden und Empfangen unter Zuhilfenahme von Zufallszahlen. Mehrere Zellen senden und empfangen nach einem Zufallsmuster ein Arbitrierungsbyte, welches ein Zufallsregister vorgibt. Wird Datenverkehr auf dem Kanal beim Empfangen detektiert, so wird der Vorgang abgebrochen. Das heißt die Zelle, welche den Arbitrierungszyklus der Länge des Zufallsregisters durchläuft, ohne dass dies durch das Empfangen eines Teils von einem anderen Arbitrierungsbyte abgebrochen wird, erhält eine Adresse. Je nach Größe des Zufallsregisters und Anzahl der Zellen können dennoch Kollisionen entstehen. Die Fehlerhäufigkeit kann durch die zufällig generierte Bitfolge mit der Wahrscheinlichkeit von $\frac{1}{2}$ für jedes Bit berechnet werden.

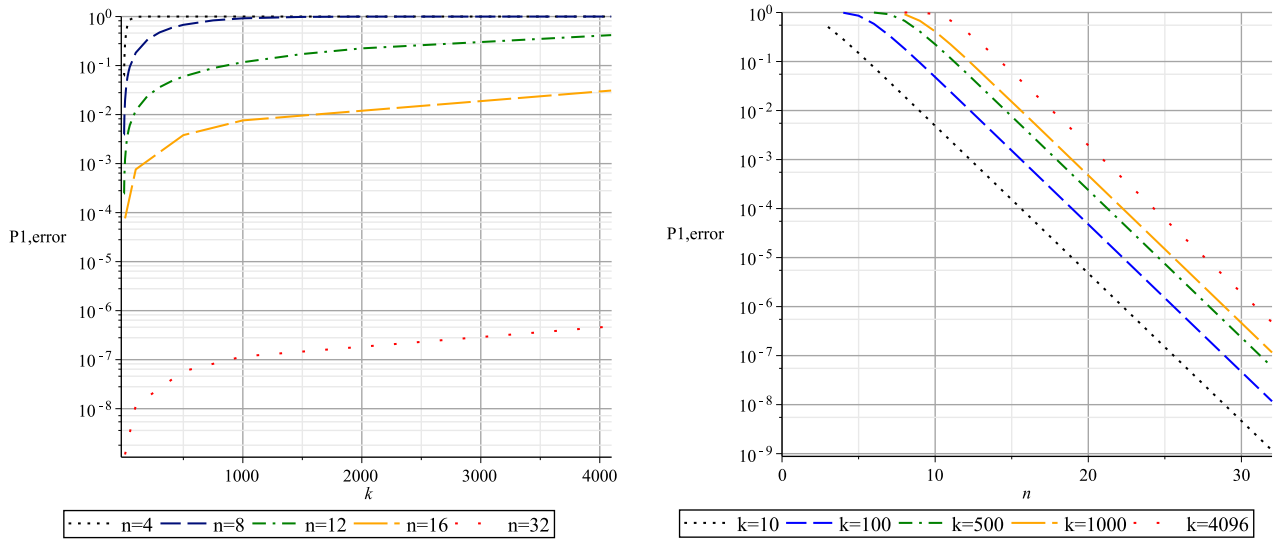
Es ergibt sich für den ersten Arbitrierungsvorgang eine Fehlerwahrscheinlichkeit $P_{1,error}$ abhängig von der Größe n des Zufallsregisters in Bit und Anzahl k der Zellen:

$$P_{1,error} = \begin{cases} 0, & \text{für } k = 1, n \geq 0 \\ 1 - \frac{k}{2^{nk}} \sum_{i=1}^{2^n-1} i^{k-1}, & \text{für } k > 1, n > 0 \end{cases} \tag{5.1}$$

Für die weiteren Arbitrierungsvorgänge ergibt sich das Komplement des Produktes der einzelnen Erfolgswahrscheinlichkeiten:

$$P_{2+,error} = 1 - \prod_{j=0}^{k-1} \frac{k-j}{2^{n(k-j)}} \sum_{i=1}^{2^n-1} i^{k-j-1}, \quad \text{für } k > 1, n > 0 \tag{5.2}$$

Abbildung 5.4 zeigt grafisch die Abhängigkeiten jeweils über der Größe des Zufallsregisters (5.4(a)) und der Anzahl der Zellen (5.4(b)).



(a) Abhängigkeit der Registergröße

(b) Abhängigkeit der Anzahl Zellen

Abbildung 5.4: *Übersicht Fehlerwahrscheinlichkeit*

Die Berechnung zeigt, dass Registergrößen von weniger als 32 Bit für eine große Anzahl Teilnehmer unzureichend sind, wenn man eine Fehlerwahrscheinlichkeit von 10^{-6} bei der maximalen Anzahl von 4091 Knoten zugrunde legt. Für die Implementierung wird daher ein 32 Bit breites Register vorgesehen.

5.3 Aufbau der Hardware

Die Realisierung der Versuchsplatine ist in den Abbildungen 5.5, 5.6 und 5.7 dargestellt.

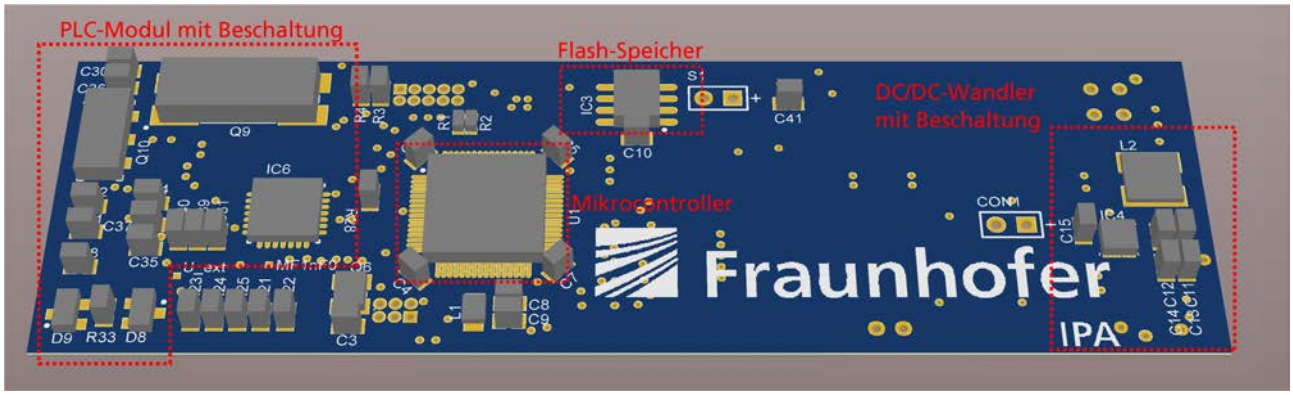


Abbildung 5.5: *Layout der Oberseite der Platine*

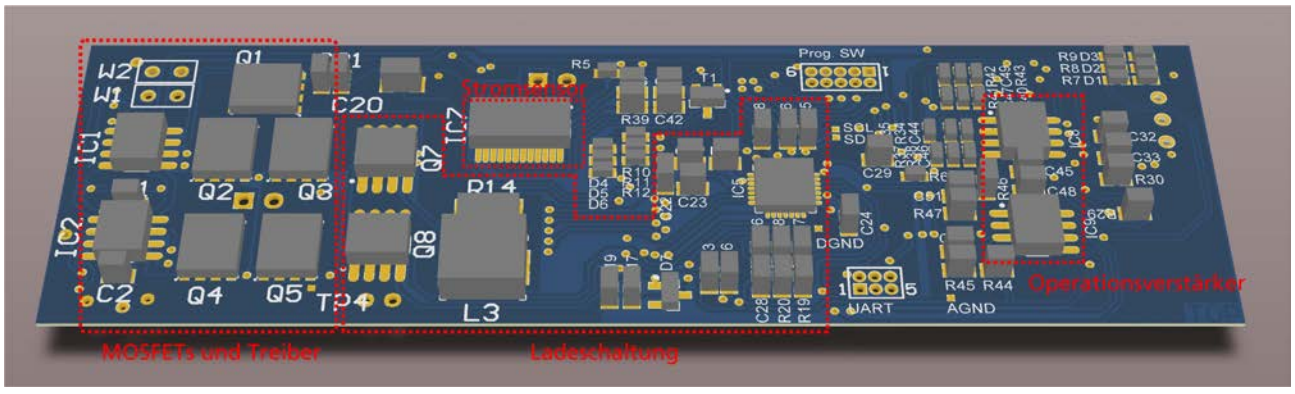


Abbildung 5.6: *Layout der Unterseite der Platine*

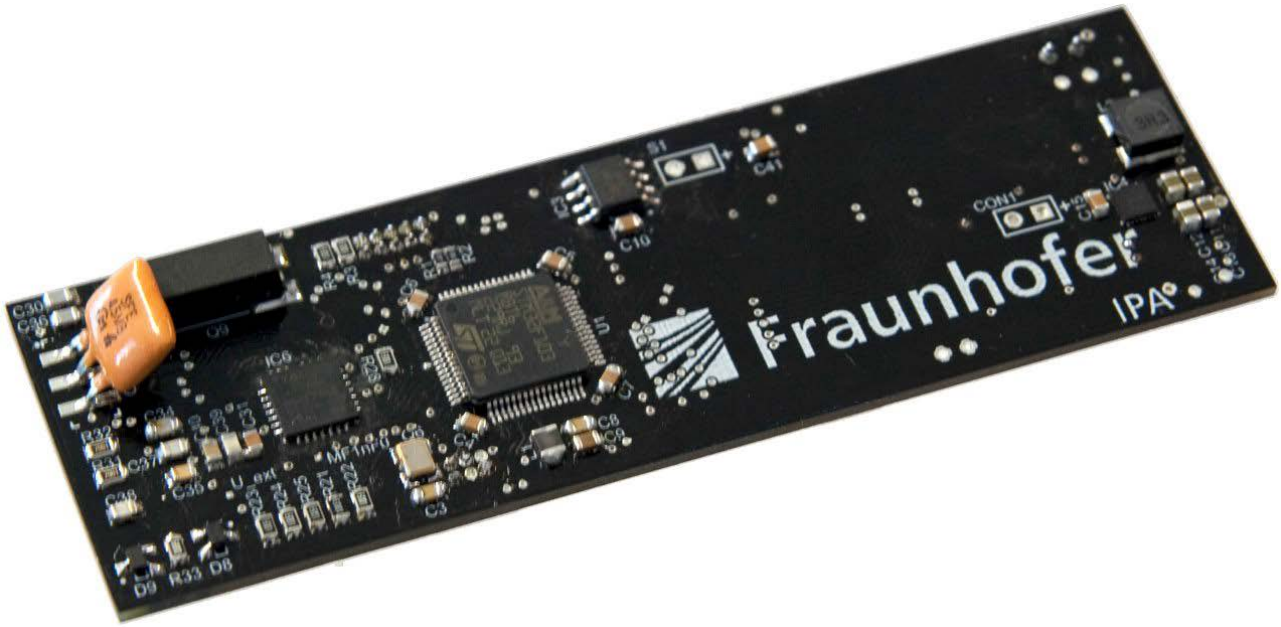


Abbildung 5.7: *Bild der Oberseite der Platine*

Bei der Erstellung des Layouts wurde vor allem Wert auf die räumliche Aufteilung der funktionalen Komponenten mit getrennten Masseflächen gelegt. Die vorliegende Anordnung der Bauteile und die Größe des Layouts bieten Raum für Optimierungen, die jedoch nicht im Fokus dieser Arbeit liegen. Um direkten messtechnischen Kontakt zu allen Verbindungen zu ermöglichen und die Fehlersuche zu erleichtern, ist die Platine zweilagig ausgeführt.

5.4 Prüfsystem zur Messung von realen Fahrzyklen

Nicht nur für die Auslegung der Hardware eines BMS, sondern auch für eine ganzheitliche Betrachtung des Systems sind die tatsächlich auftretenden Belastungswerte ausschlaggebend. Es finden sich in der Literatur keine verwertbaren Verbrauchsdaten von Elektrofahrzeugen, vor allem nicht über den fließenden Strom.

Die Recherche ergab keine Ergebnisse, welche zumindest den Strom mit einer Abtastrate von 10 Hz oder größer in Form von Rohdaten abbildete. Darüber hinaus fehlen bei veröffentlichen Messungen oft zusätzliche Daten wie die Geschwindigkeit und Straßenbedingungen, wie etwa Anstiege oder Gefälle. Diese Angaben können aus den Positionsdaten des Fahrzeugs gewonnen werden.

Das direkte Abgreifen der Fahrdaten über fahrzeuginterne Schnittstellen, zum Beispiel CAN-Bus oder OBD-Schnittstelle, führt nicht zum gewünschten Erfolg. Zunächst kann auf die Daten nicht frei zugegriffen werden, darüber hinaus erfasst das Fahrzeug nicht gleichzeitig seine Position. Um eine synchrone Erfassung aller Messdaten zu erreichen, muss eine eigene Lösung entworfen werden.

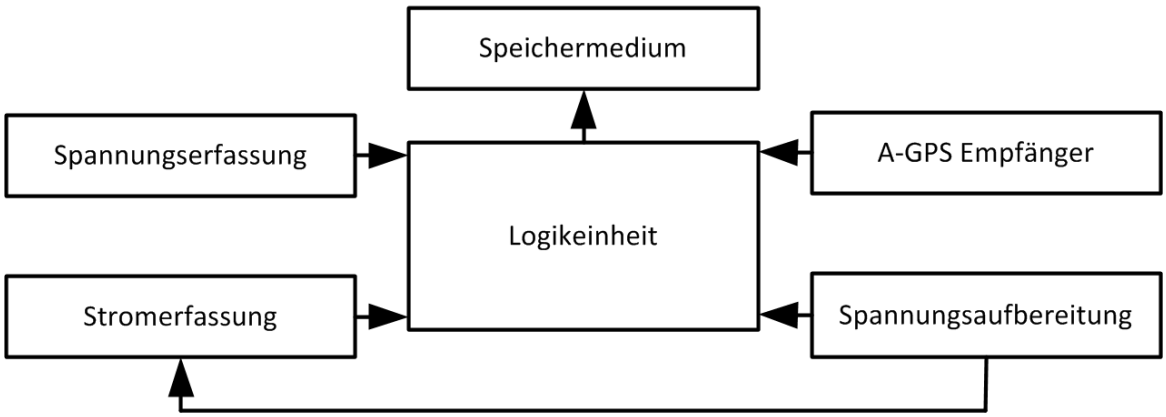


Abbildung 5.8: *Blockschaltbild des Messsystems*

Für die Evaluierung der Intelligenten Zelle wurde zur Aufnahme der realen Werte aller relevanten Größen ein Messsystem entworfen, welches installiert in einem Elektrofahrzeug dessen Ströme und Spannungen sowie seine Position synchron erfassen und speichern kann (siehe Abbildung 5.8).

Aus den Positionsdaten können die Geschwindigkeit und Straßenbedingungen abgeleitet werden. Die Daten, die bei realen Fahrzyklen mit einem Elektrofahrzeug gewonnen werden, sollen Grundlage für die Bewertung des Systems Intelligente Zelle sein.

5.4.1 Logikeinheit

Basis des Messsystems zur Erfassung realer Fahrzyklen eines Elektrofahrzeugs bildet ein kommerziell verfügbarer Datenlogger (in Abbildung 5.8 als Logikeinheit dargestellt). Ein Datenlogger (Akquisition Unit) erfasst Größen in einem bestimmten Rhythmus und legt sie auf einem Speichermedium ab.
Der verwendete Datenlogger kann analoge Spannungen auf bis zu 16 Kanälen mit 1 kHz und Daten über eine serielle Schnittstelle erfassen und auf einer SD-Karte ablegen.

Die zu erfassenden Größen sind:

- Strom
- Spannung
- Position

5.4.2 Spannungserfassung

Die Spannungserfassung erfolgt direkt auf einem der analogen Eingangskanäle der Logikeinheit. Die hohe Batteriespannung erfordert einen Spannungsteiler, der

die anliegende Batteriespannung auf die maximal zulässige Eingangsspanung des Messsystems, in der vorliegenden Konfiguration 1,2 V, verringert. Für die weiteren Messungen hat der Spannungsteiler einen Faktor von 220. Die Auflösung des Kanals beträgt 24 bit. Somit ergibt sich rechnerisch, dass die Spannung in Schritten von 15,74 µV erfasst werden kann.

5.4.3 Stromerfassung

Für die Stromerfassung kommen mehrere Möglichkeiten in Frage. Eine konduktive Messung über einen präzisen Shunt(widerstand) ist einfach und auch bei sehr dynamischen Stromverläufen genau. Ihr gegenüber steht allerdings ein hoher Installationsaufwand und ein direkter Eingriff in den Leistungsstrang im Fahrzeug, was auch zum Erlöschen der Betriebserlaubnis des Fahrzeugs führt. Die Messung mittels eines nichtkonduktiven Sensors, in diesem Fall eines Hall-Sensors, zeichnet sich durch eine sehr einfache Installation durch Anbringung am stromführenden Leiter aus. Da jedoch nur ein kleiner Teil des magnetischen Feldes von dem Hall-Sensor erfasst werden kann, wird für eine genaue Messung kleiner Ströme ein Ferritring zur Bündelung des Feldes um den Leiter eingesetzt. Dieser wiederum begrenzt die Bandbreite. Die Installation gestaltet sich nach wie vor einfach. Der Ferritring wird um den Leiter geklappt oder der Leiter durch den Ring geführt.

Für die Erfassung des Stromes wurde ein sehr präziser aktiver Hall-Sensor ausgewählt. Er hat eine Genauigkeit von 84 ppm bei einem Spitzenstrom von 200 A. Die Dynamik wird mit 100 $\frac{\mathrm{kA}}{\mathrm{ms}}$ angegeben. Messungen am Testfahrzeug ergaben eine maximal auftretende Steilheit des Stromes von nur 0,5 $\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{ms}}$. Somit ist der Sensor für die Messungen gut geeignet.

5.4.4 Positionserfassung

Der Datenlogger erlaubt auch eine Erfassung von Daten, die über eine serielle Schnittstelle bereitgestellt werden. Über diese Verbindung wurde ein kommerziell verfügbarer A-GPS Empfänger an das System angebunden. Der Empfänger erlaubt eine Positionsermittlung mit 10 Hz. Die Feinheit der Positionsermittlung von weniger als 2,5 m ließe sich weiter durch Inertialsensorik verbessern.

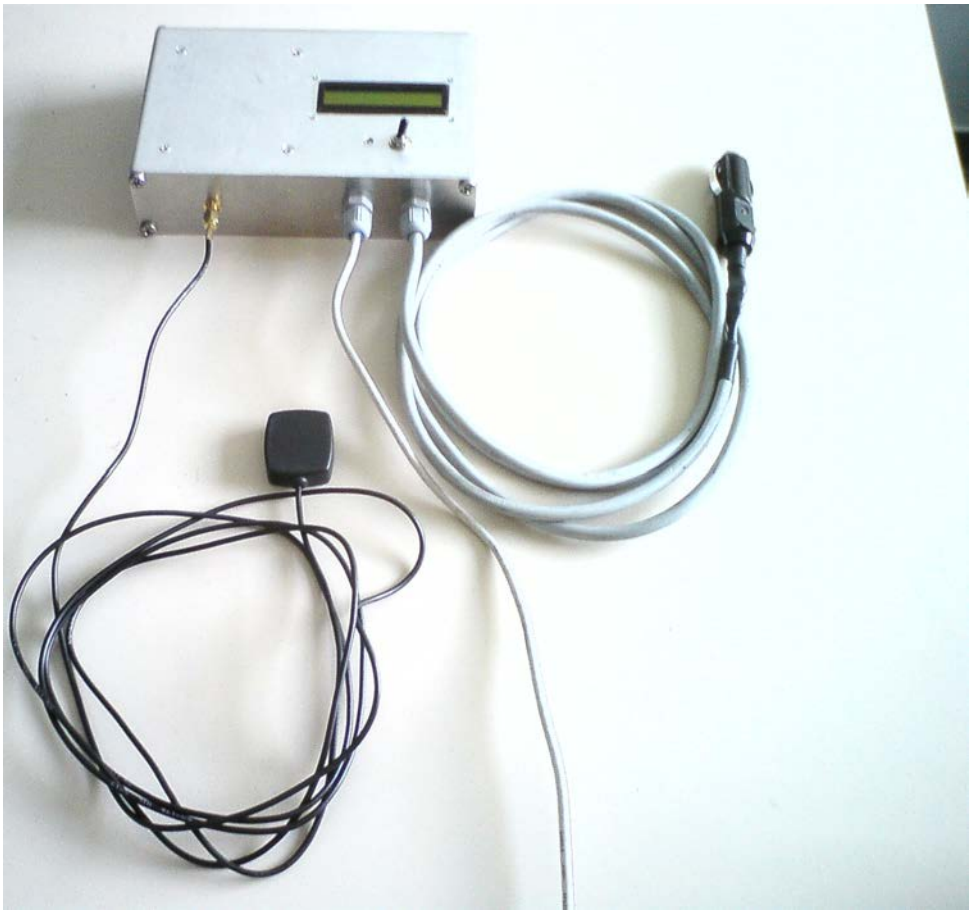


Abbildung 5.9: *Bild des Datenloggers im Gehäuse*

Abbildung 5.9 zeigt das Messsystemgehäuse mit Antenne und Mess- beziehungsweise Versorgungsleitungen.

5.5 Prüfstand zur Messung von Batteriezellen und -systemen

Um die Intelligente Zelle mit den im Fahrzeug gemessenen Daten (siehe Abschnitt 5.4) belasten zu können, muss ein geeigneter Laboraufbau erstellt werden. Da die Sicherheit bei den Messungen jederzeit gewährleistet sein muss, zum Beispiel kein Brand entstehen darf, wurde hierfür ein eigener Prüfstand aufgebaut, der den besonderen Anforderungen sowohl der Intelligenten Zelle (beispielsweise dynamisches Schalten während des Entladevorgangs), als auch den Messungen (beispielsweise die Abtastrate) gerecht wird.

Der erstellte Prüfstand kann ein Fahrzeug simulieren, also ein Lastprofil generieren. Die Software erlaubt darüber hinaus Messungen an Zellen, wie die Bestimmung ihrer Kapazität und kann die Batterie auch mit unterschiedlichen Stromprofilen laden. Durch die Überwachung der Spannungen und Ströme sowie der Temperaturen und die geschlossene Umhausung ist ein sicherer Betrieb gewährleistet.

5.5.1 Hardware des Prüfstands

Abbildung 5.10 zeigt den Aufbau des Prüfstandes. Das Netzteil mit einem maximalen Ausgangsstrom von 63 A und die Last mit einem maximalen Eingangsstrom von 80 A bei 35 V bilden die elektrischen Kernkomponenten.

Geht man von Zellen mit einer maximalen oberen Spannungsgrenze von 4,2 V aus, so sind bis zu acht seriell verschaltete Zellen als Prüfling möglich. Beide Geräte sind über eine GPIB-Schnittstelle mit dem Steuerrechner verbunden. Die jeweiligen

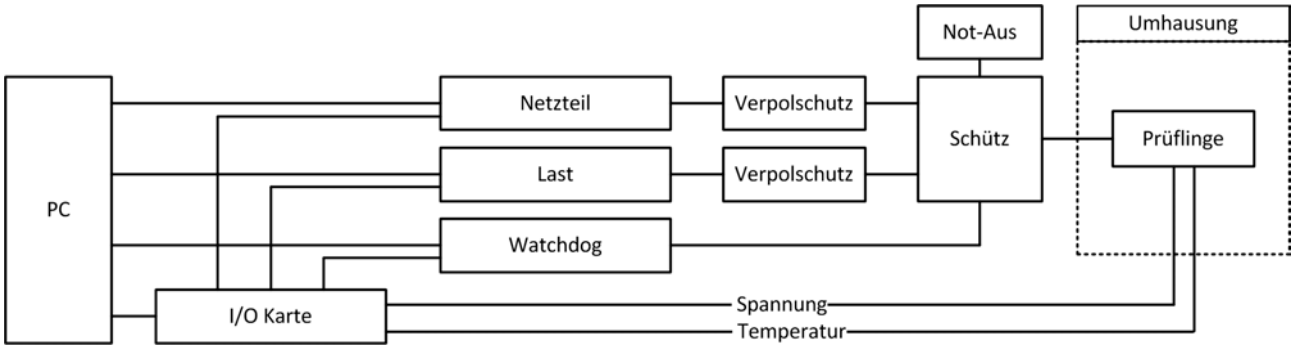


Abbildung 5.10: *Blockschaltbild des Prüfstands*

Ausgangs- beziehungsweise Eingangsklemmen werden über einen Verpolschutz und einen Leistungsschütz in die Umhausung geführt. Die Spannungserfassung erfolgt, neben der Messung im jeweiligen Gerät selbst, direkt am Prüfling beziehungsweise den Prüflingen über eine Wandlerkarte (NI-Karte), die ebenfalls mit dem Steuerrechner verbunden ist.



Abbildung 5.11: *Bild des Prüfstands mit offener Umhausung*

Ein Watchdog prüft ständig die Einsatzbereitschaft des Steuerrechners. Ist die Funktion des Steuerrechners durch einen Softwarefehler gestört, wird dies erkannt und der Leistungsschütz geschaltet. Der Prüfstand ist nach der Neuen Maschinenrichtlinie (NMR) aufgebaut und verfügt über einen Not-Aus-Taster, der ebenfalls den Leistungsschütz auslöst.

Sollte trotz aller Sicherheitsvorkehrungen ein Brand entstehen, wird die Umgebung durch die Umhausung (siehe Abbildung 5.11) geschützt. Eine Grundplatte aus hitzestabiler Keramik verhindert das Durchbrennen des entflammten Prüflings und die Entzündung der Umgebung. Der Brand selbst kann nicht unterdrückt werden.

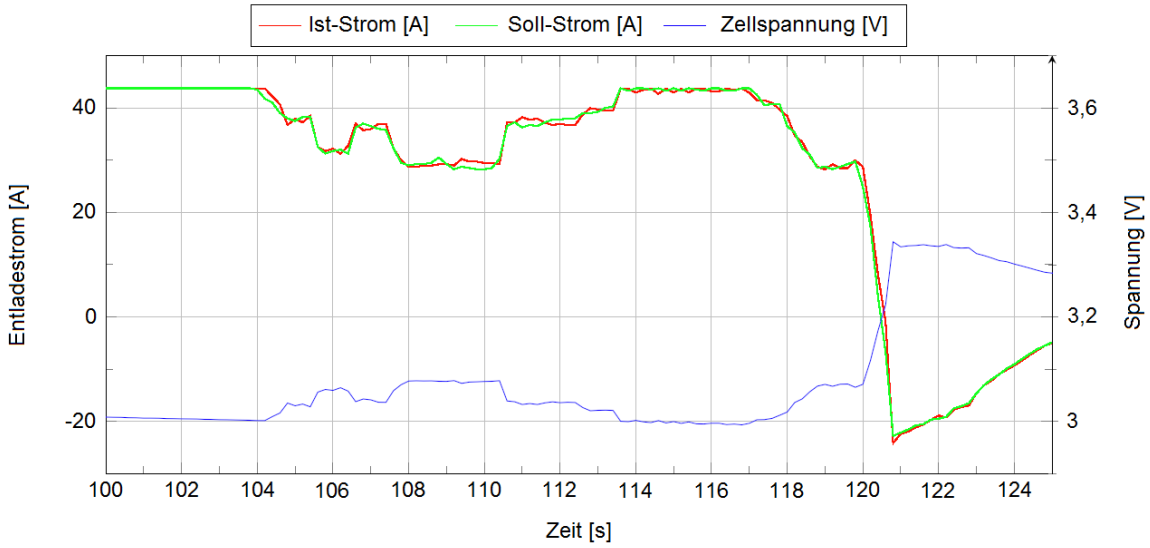


Abbildung 5.12: *Vergleich zwischen Soll- und Ist-Strom des Prüstands bei Belastung einer VB02-Zelle*

Analoge Ausgangskanäle der Wandlerkarte steuern die Ströme des Netzteils und der Last. Durch die analoge Vorgabe regeln sich die Geräte wesentlich schneller auf den Sollwert ein und erreichen dadurch ihre maximale Agilität. Abbildung 5.12 zeigt den Soll- und Ist-Strom des Prüfstandes sowie das Verhalten einer VB02-Zelle der Firma Voltabatterie. Der Laststrom beträgt ein Drittel des im Fahrzeug gemessenen Stromes.

5.5.2 Software des Prüfstands

Zunächst werden in der Software der Prüfling beziehungsweise die Prüflinge nach Verschaltung (Reihenschaltung, Parallelschaltung) und deren technischen Daten (Spannungs-, Strom und Temperaturgrenzen) konfiguriert. Im Hauptfenster kann zwischen Laden, Entladen und Zyklisieren gewählt werden.

Die Ladung kann mit einem konstanten Strom bis zum Erreichen der oberen Spannungsgrenze, mit oder ohne Weiterführung durch Halten dieser Grenze, bis zu einer Stromuntergrenze (CC-CV Methode) erfolgen. Weitere Möglichkeiten sind das Laden mit einem Pulsprofil oder durch Vorgabe der Werte mittels einer externen Datei.

Die Einstellung Entladung enthält die Funktionen Entladen mit konstantem Strom bis zu einer Minimalspannung und Entladen nach einem vorgegebenen Profil durch eine Datei. Negative Stromwerte in der Datei werden als Speiseströme interpretiert und das System speist Energie in den Prüfling, wie es im Fall einer Rekuperation auftritt.

Die Einstellung Zyklisieren ermöglicht das wechselseitige Laden und Entladen bei vorgegebenen Stromstärken. Eine Kapazitätsmessung mit anderen Parametern kann nach einer definierten Anzahl Zyklen erfolgen. Es ist beispielsweise möglich, einen Prüfling mit 5 C Entladerate sowie 2 C Laderate zu beaufschlagen und alle 20 Zyklen eine Kapazitätsmessung mit 1 C Entladerate durchzuführen. Abbildung 5.13 zeigt einen Screenshot der Software in der Einstellung Entladen mit einem Stromprofil.

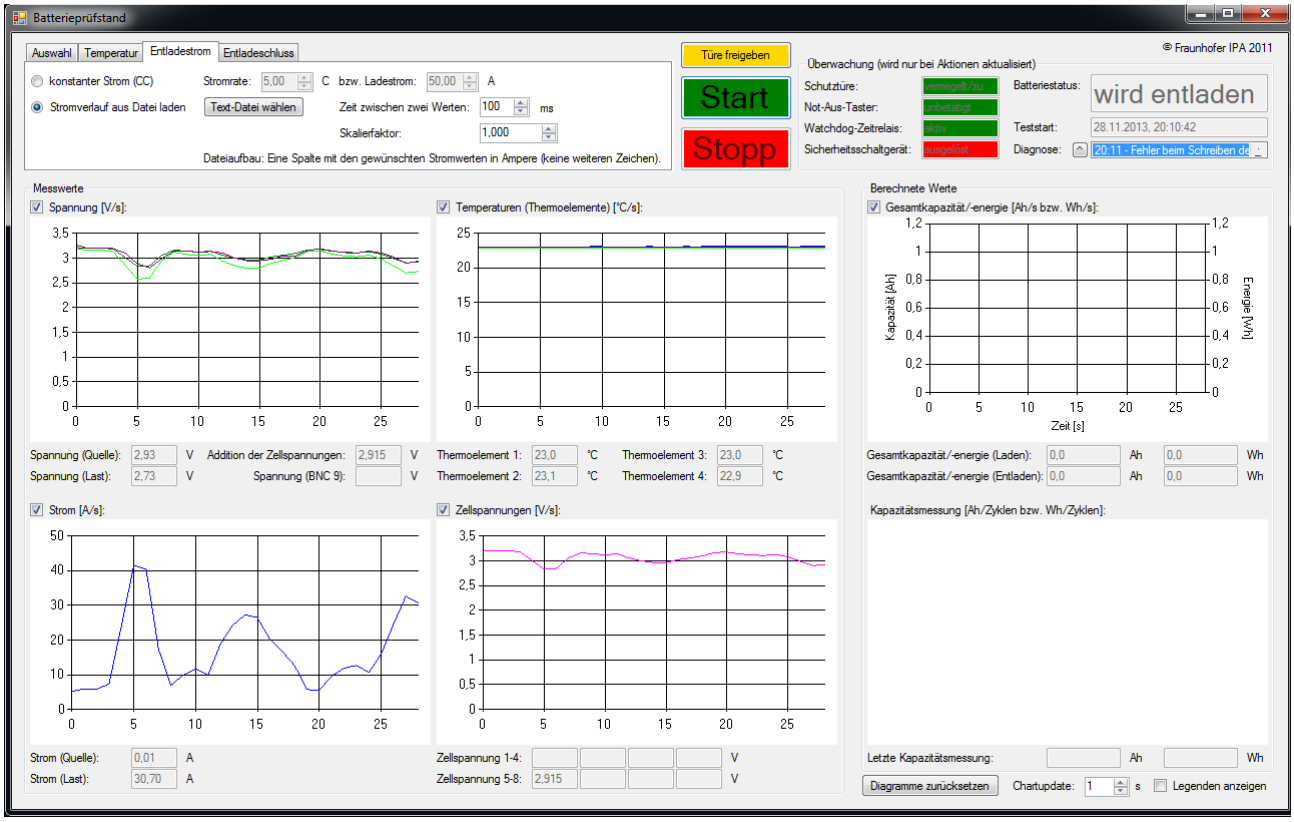


Abbildung 5.13: *Screenshot der Prüfstandssoftware*

Wird die gewählte Einstellung gestartet, erfasst das System alle relevanten Größen und speichert diese auf der Festplatte ab. Die Speicherrate kann dabei bis zu 10 Hz betragen. Eine höhere Abtastrate ist technisch möglich, bietet jedoch keine Verbesserungen, da die Werte in der Software aus Stabilitätsgründen mit 10 Hz verarbeitet werden.

6 Validierung und Bewertung

Um die grundsätzliche Funktionsfähigkeit des Laboraufbaus zu zeigen, wurden verschiedene Experimente durchgeführt. Zunächst wurde die Hardwarefunktionalität getestet. Besonders das Leistungsstellglied wurde vermessen und charakterisiert. Im zweiten Schritt wurde die Kommunikation in Betrieb genommen und die Arbitrierung gestestet. Abschließend wurde die Belastung einer Traktionsbatterie bei einem Elektrofahrzeug des Typs Renault Clio éléctrique bestimmt, um die Intelligente Zelle unter realen Bedingungen auf dem Prüfstand belasten zu können. Hier wurden Funktionalität und das Potential der Intelligenten Zelle aufgezeigt. Die Validierung schließt mit einer Zusammenfassung und Bewertung ab.

6.1 Inbetriebnahme des Laboraufbaus

Die Inbetriebnahme gliedert sich in die Inbetriebnahme der Hardware und der Software.

6.1.1 Inbetriebnahme und Test der Hardware

Um die Funktionalität der Hardware herzustellen, müssen nur geringe Anpassungen erfolgen. Besonders wichtig ist die Abstimmung des Leistungsstellglieds. Die Schaltzeiten der Transistoren müssen vermessen werden, um softwareseitig die Umschaltung zwischen den einzelnen Betriebsmodi der Intelligenten Zelle korrekt ansteuern zu können.

Funktion des Leistungsstellglieds

Für die Überprüfung der Funktion des Leistungsstellglieds wurde eine Intelligente Zelle mit einem Netzgerät versorgt und mit einem 1 Ω Widerstand belastet. Die Spannung über dem Widerstand wurde beim Ein- und Ausschaltvorgang aufgezeichnet. Abbildung 6.1 zeigt den Versuchsaufbau. Abbildung 6.2 zeigt das Einschalt-, Abbildung 6.3 das Ausschaltverhalten. Es wurde jeweils eine Zeitbasis von 50 µs/Zeiteinheit verwendet, die Skalierung von Kanal C2 beträgt 2 V/Zeiteinheit bei einem Offset von 0 V.



Abbildung 6.1: *Versuchsaufbau für Messung der Ein- und Ausschaltzeit*

Die Einschaltzeit beträgt etwa 100 µs, während die Ausschaltzeit bei etwa 30 µs liegt.

Das leichte Unterschwingen beziehungsweise die hohe Einschaltzeit ist durch die Blockinduktivitäten zu erklären, die das PLC Signal von den Transistoren entkoppeln und vor den Außenkontakten der Zelle seriell verschaltet sind.

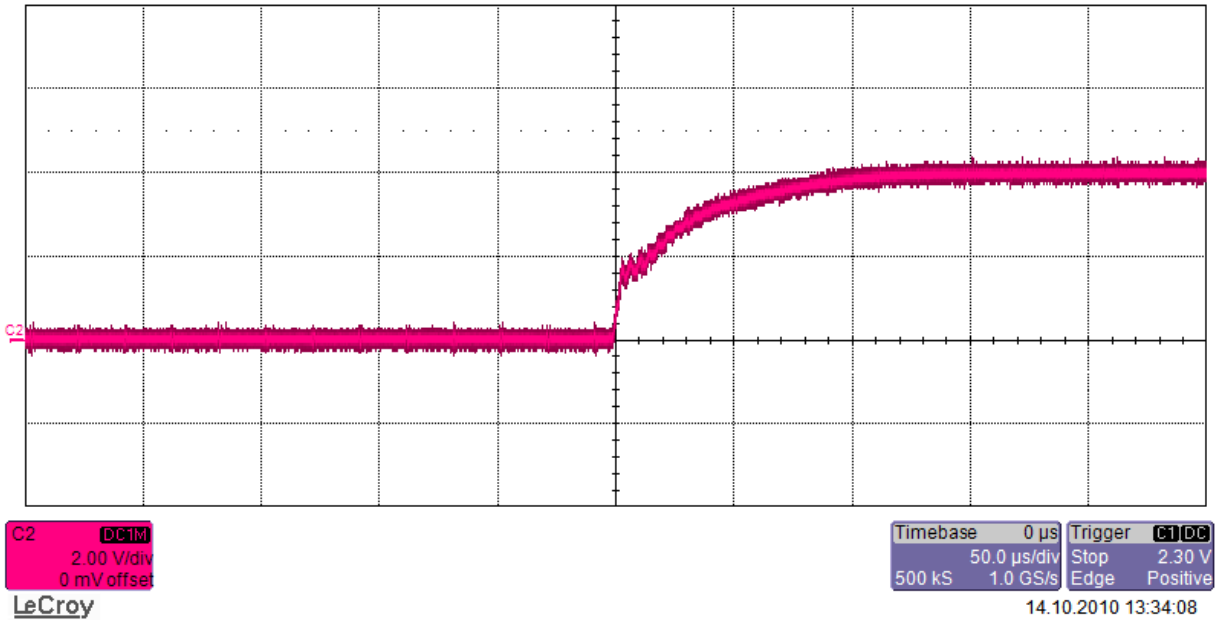


Abbildung 6.2: *Einschaltzeit einer mit* 1 Ω *belasteten Intelligenten Zelle*

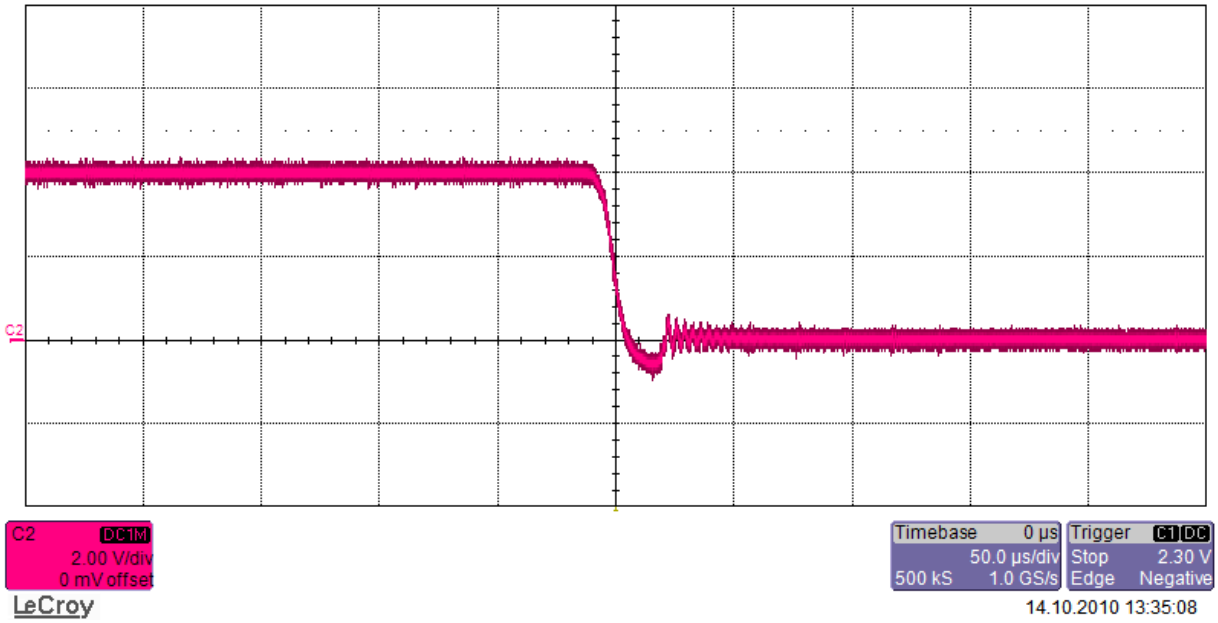


Abbildung 6.3: *Ausschaltzeit einer mit* 1 Ω *belasteten Intelligenten Zelle*

Funktion der Kommunikation

Ein weiterer Test soll eine mögliche Interferenz des PLC Signals mit dem Schaltvorgang der Transistoren bei schneller Schaltfolge zeigen. Dafür wird der Energiefluss einer Intelligente Zelle mit 1 kHz über einem Widerstand an- beziehungsweise abgeschaltet und gleichzeitig Daten über PLC von einer Intelligenten Zelle an eine andere wechselseitig übertragen. Übertragungsfehler werden von der Software aufgezeichnet. Der Aufbau ist auf Abbildung 6.4 dargestellt. Da es sich um einen Dauerversuch handelt, wurde ein 50 Ω Widerstand gewählt, um thermische Probleme zu vermeiden.

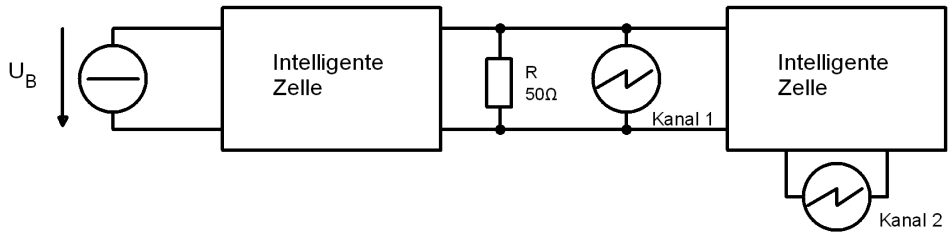


Abbildung 6.4: *Versuchsaufbau zur Messung der Interferenz zwischen PLC-Signal und häufiger Schaltfolge der Intelligenten Zelle*

Abbildung 6.5 zeigt oben die Spannung über dem Lastwiderstand und unten das durch eine weiteren Intelligenten Zelle kapazitiv ausgekoppelte Signal. Die Zeitbasis beträgt 500 µs/Devision, die Skalierung von Kanal C1 beträgt 2 V/Devision bei einem Offset von 2 V, die von Kanal C2 2 V/Devision bei einem Offset von −4 V.

Hier wird ersichtlich, dass Schaltvorgang und Modulation bei den gewählten Einstellungen teilweise zeitgleich auftreten. Sollte ein Fehler durch Interferenz entstehen, so würde er durch die Software aufgezeichnet.

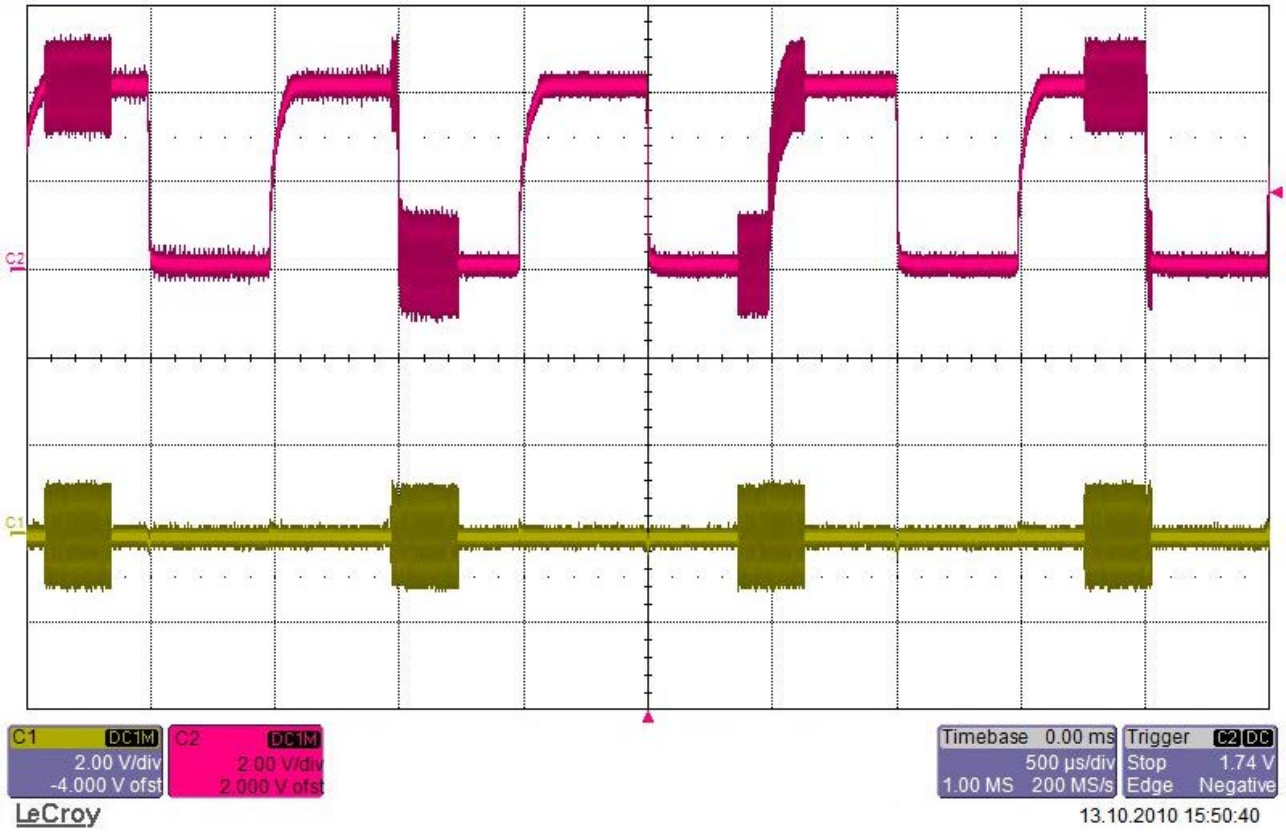


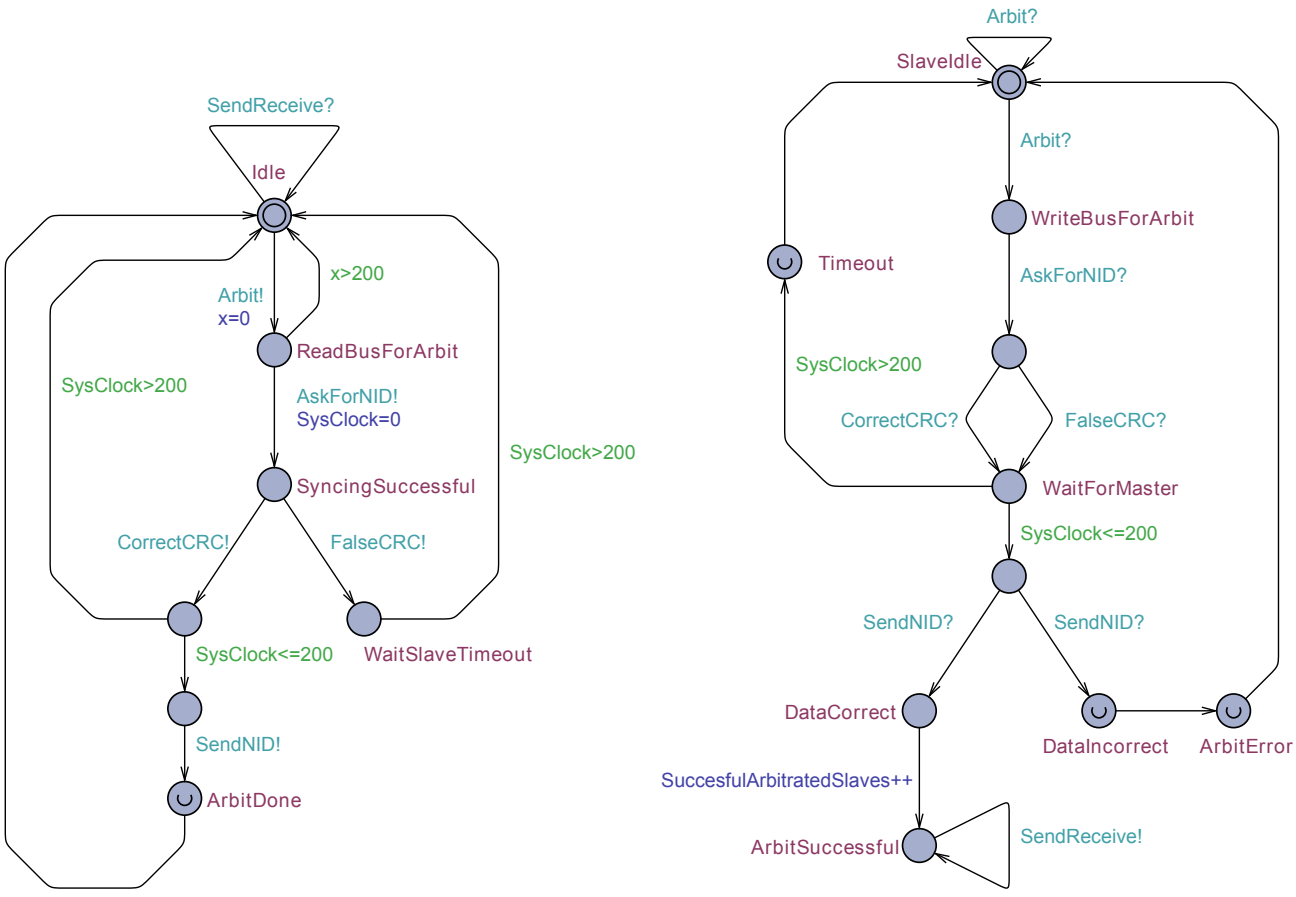
Abbildung 6.5: *Spannungsverhalten von Schaltvorgängen mit aufmoduliertem Kommunikationssignal an einem Lastwiderstand*

Augenscheinlich wird die aufmodulierte Spannung durch das Schalten der Last nicht beeinflusst. Auch die Software verzeichnete innerhalb des Dauerversuchs von etwa 10 Stunden keinen Fehler.

Es ist zu vermuten, dass die Entkopplung durch die hohe Trägerfrequenz von 6 MHz und dem langsamen Anstieg beziehungsweise Abfall der Nutzspannung erreicht wird. Es wird auch ersichtlich, dass die eingekoppelte Spannung des PLC-Moduls in diesem Aufbau bei etwa 2 V_{pp} liegt.

6.1.2 Inbetriebnahme und Test der Software

Ungewollte Abläufe können die Funktionlität des Systems gefährden. Um diese auszuschließen, müssen alle möglichen Kombinationen von Ereignissen zuvor betrachtet werden. Dies wurde für das entwickelte Schema der Arbitrierung in einem Simulationstool durchgeführt, um das Verhalten und die Stabilität zu evaluieren. Als Tool wird eine Umgebung eingesetzt, welche die Modellierung, Validierung und Verifizierung von Echtzeitsystemen erlaubt. Abbildung 6.6 zeigt die Simulationsmodelle für die Arbitrierung des Masters (siehe Abbildung 6.6(a)) und des Slaves (siehe Abbildung 6.6(b)).



(a) Modell des Masters

(b) Modell des Slaves

Abbildung 6.6: *Modellierung der Arbitrierung*

Die Ergebnisse der Simulation zeigen, dass zu keinem Zeitpunkt ein Zustand auftreten kann, in dem verharrt wird, ohne einen weiteren Übergang durchführen zu können (Deadlock).
Ein weiteres Ergebnis der Simulation ist auch, dass die Möglichkeit besteht, dass eine Intelligente Zelle keine Adresse zugewiesen bekommt. Dies basiert auf fehlerhaft gesendeten oder empfangenen Daten. Die Adresszuweisung wird im nächsten Zyklus wiederholt. Somit verringert sich die Wahrscheinlichkeit einer fehlerhaften Zuweisung mit jedem weiteren Durchlauf.
Die Simulation zeigt auch, dass es möglich ist, dass sich zwei Slaves gleichzeitig anmelden. Es ist Aufgabe des Protokolls diese Mehrfachzuweisung zu erkennen und den Arbitrierungsvorgang neu zu starten.

Eine weitere für die Inbetriebnahme notwendige Softwareeinstellung besteht in der Anpassung der Schaltzeiten des Leistungsstellglieds. Die Zeiten wurden basierend auf den Messungen der Hardwareinbetriebnahme angepasst. Da der Ausschaltvorgang wesentlich schneller als der Einschaltvorgang ist, muss beim Wechsel von Zustand Energieabgabe zum Zustand Niederohmig eine kurze Überlappung beider Zustände stattfinden, damit der Stromfluss nicht beeinträchtigt wird. Dieser Zustand bestimmt sich beim vorhandenen Laboraufbau zu maximal 70 µs aus der Differenz von Ein- und Ausschaltzeit.

Abbildung 6.7 bildet grafisch die schematisierte Überlappung der beiden Zustände (0 µs bis 70 µs) ab. Zum Zeitpunkt 0 µs wird der Einschaltvorgang des Zustandes Niederohmig gestartet (zum Beispiel Q_3 eingeschaltet) und zum Zeitpunkt 70 µs der Ausschaltvorgang des Zustandes Energieabgabe gestartet (zum Beispiel Q_5 ausgeschaltet). Zum Zeitpunkt 100 µs ist das System umgeschaltet.

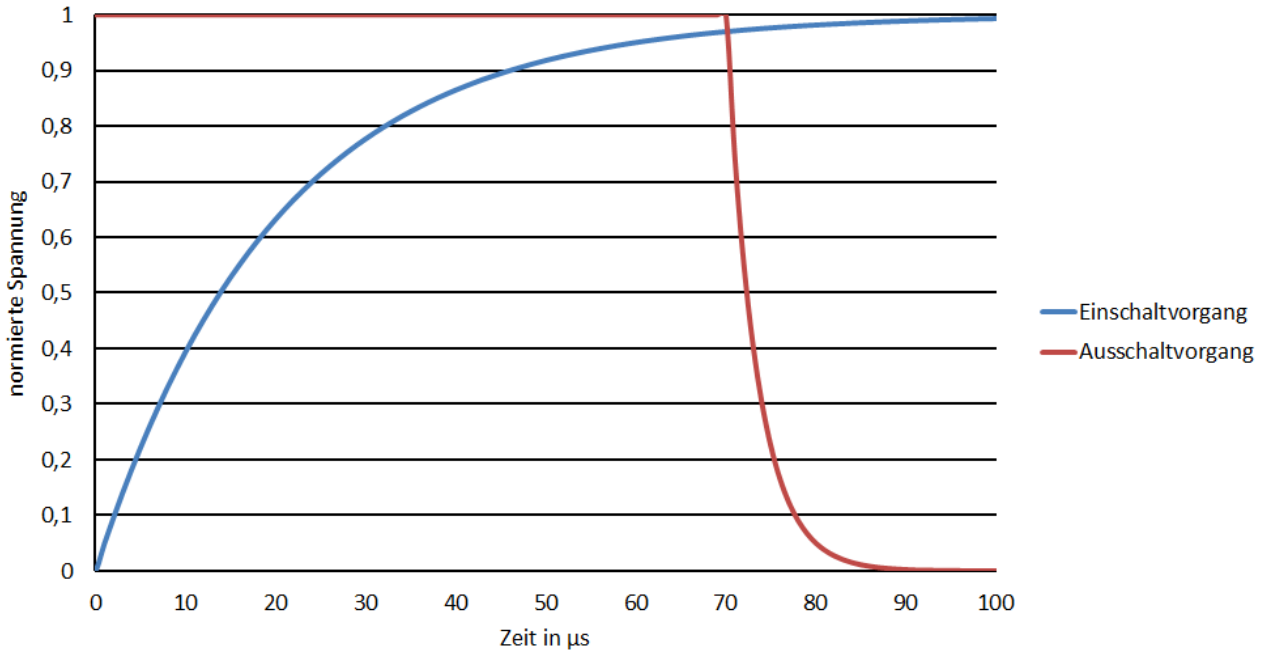


Abbildung 6.7: *Überlappung der beiden Betriebszustände*

6.2 Messung realer Fahrdaten

Das in Abschnitt 5.4 beschriebene Messsystem wurde an einem Renault Clio électrique (siehe Tabelle 6.1) installiert und anschließend verschiedene Testfahrten durchgeführt. Das Fahrzeug entspricht in seiner Technologie hinsichtlich Spitzenleistung nicht den aktuell verfügbaren Fahrzeugen, bietet aber die Möglichkeit, aufgrund der leichten Zugänglichkeit der elektrischen Komponenten unkompliziert Versuche durchführen zu können. Neuere Fahrzeuge verfügen über eine höhere Leistung bei gleichzeitig höherer Boardnetzspannung. Im Folgenden ist der Strom durch die Zelle besonders von Bedeutung, die Erhöhung der Spannung erfolgt durch mehr Speicherelemente in der Reihenschaltung. Vergleicht man nun den rechnerischen Maximalstrom des Versuchsfahrzeuges mit dem von Elektrofahrzeugen neueren Datums, unterscheidet sich der Wert nur wenig. Daher können die Ergebnisse als durchaus aussagekräftig angesehen werden.

Fahrzeugtyp	Nennleistung	Spitzenleistung	Boardnetz-spannung	Berechneter Maximalstrom	Kapazität des Akkumulators
Renault Clio électrique	16 kW	21,7 kW	114 V	190 A	11,4 kW h
Mitsubishi iMiEV	47 kW		330 V	142 A	16,0 kW h
Audi A1 eTron	45 kW		380 V	118 A	15,0 kW h

Tabelle 6.1: *Technische Daten verschiedener Elektrofahrzeuge [LOCH11]*

Die elektrische Beanspruchung eines Elektrofahrzeugs hängt maßgeblich von der Fahrweise und den äußeren Bedingungen wie Steigungen oder häufiges Bremsen und Beschleunigen ab. Daher wird, um Fahrprofile besser charakterisieren und einteilen zu können, im Folgenden zwischen drei Fahrszenarien unterschieden: Autobahnfahrt, Stadtfahrt und Bergfahrt. Die Fahrten werden aufgenommen und mit Matlab sowie einer weiteren Software, welche anhand der Positionsdaten Höhendaten zuweisen kann, analysiert (siehe Abbildung 6.8). Die Fahrten haben keine statistische Relevanz. Sie sind zufällig gewählt, erfolgen mit demselben Fahrer sowie Testfahrzeug und sollen ein gewisses Fahrspektrum abhängig von den geografischen Gegebenheiten real widerspiegeln.

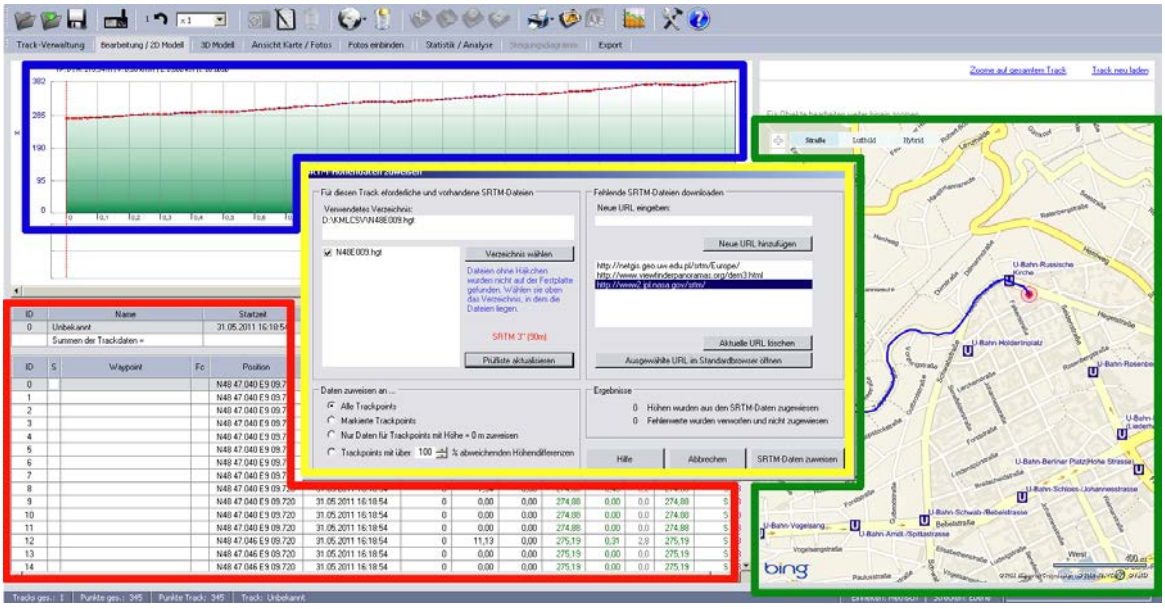


Abbildung 6.8: *Screenshot des Tools zur Zuweisung der Höhendaten*

6.2.1 Fahrdaten einer Autobahnfahrt

Der Fahrzyklus soll die Belastung bei einer Autobahnfahrt widerspiegeln. Dazu wurde das Versuchsfahrzeug auf einem Teilabschnitt der Autobahn auf etwa 10 km einmalig vermessen (siehe Abbildung 6.9). Es wurde auf eine Geschwindigkeit von 90 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ beschleunigt und versucht die Geschwindigkeit zu halten. Die Ergebnisse

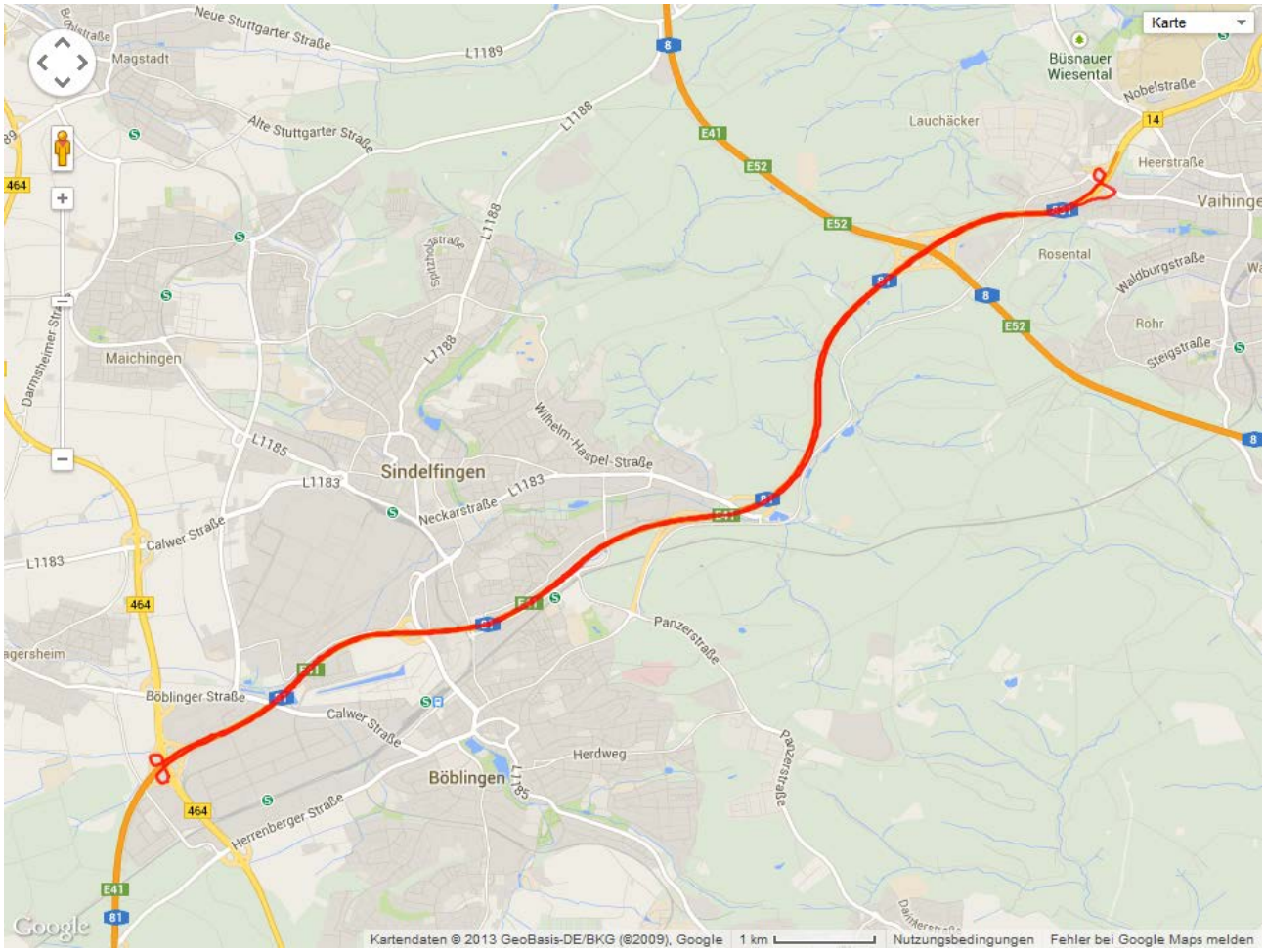


Abbildung 6.9: *Streckenverlauf der Autobahnfahrt (Quelle: Google, Kartendaten GeoBasis-DE/BKG)*

zeigen den Maximalstrom des Fahrzeugs beim Beschleunigen und mittlere Ströme um die Fahrzeuggeschwindigkeit konstant zu halten. Auffällig sind die hohen, aber seltenen Rekuperationsströme.

Durch Verlangsamen des Fahrzeugs geht der Antriebsmotor in den generatorischen Betrieb über und rekuperiert Energie, das heißt speist Energie in die Batterie zurück. Durch die hohe Geschwindigkeit des Fahrzeugs wird bei vermeintlich schon leichtem Rekuperieren schnell ein hoher Rekuperationsstrom erreicht (siehe Abbildung 6.10).

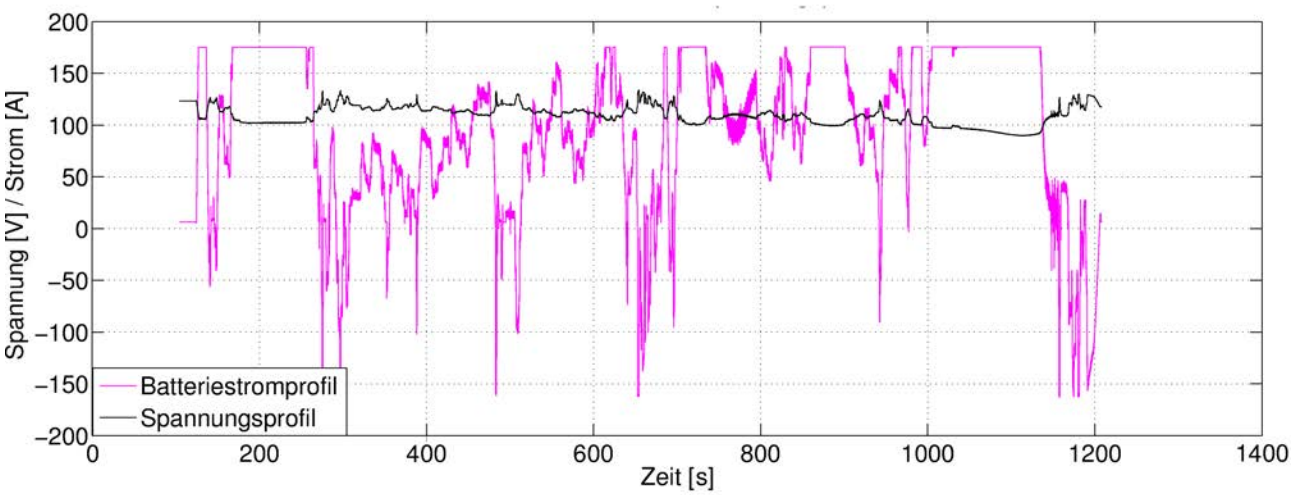


Abbildung 6.10: *Strom- und Spannungsverlauf der Autobahnfahrt*

Abbildung 6.11 bildet die Geschwindigkeit über der gefahrenen Strecke ab. Im Mittel beträgt sie 79,72 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$.



Abbildung 6.11: *Geschwindigkeitsprofil der Autobahnfahrt*

Die Auswertung im Histogramm (siehe Abbildung 6.12), der nach Häufigkeit abgebildeten Stromstärke in 10 % Schritten, zeigt, dass das Fahrzeug überwiegend bei seiner Maximalleistung betrieben wird. Dies ist auf die geringe Leistung des Fahrzeugs zurückzuführen, die für die gefahrene Geschwindigkeit praktisch konstant anliegen muss.

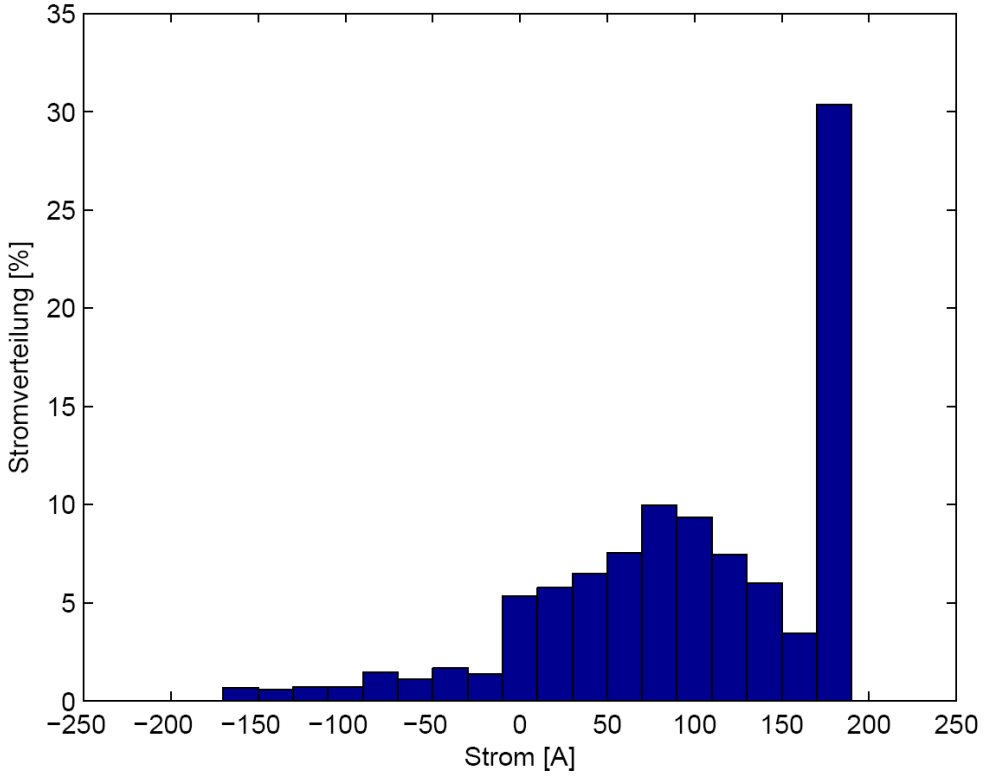


Abbildung 6.12: *Histogramm der Autobahnfahrt*

6.2.2 Fahrdaten einer Bergfahrt

Anstiege und Gefälle wirken sich stark auf den Energieverbrauch und damit die auf Belastung der Batterie aus. Bei der Bergfahrt wurde ein zufällig gewählter möglichst steiler Anstieg (siehe Abbildung 6.13) innerhalb des Großraum Stuttgarts auf etwa 2 km aufgenommen (siehe Abbildung 6.14). Die Welligkeit des Höhenprofils ist auf die topologische Datenbasis zurückzuführen. Die Geschwindigkeit betrug im Fahrbetrieb überwiegend 45 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$.

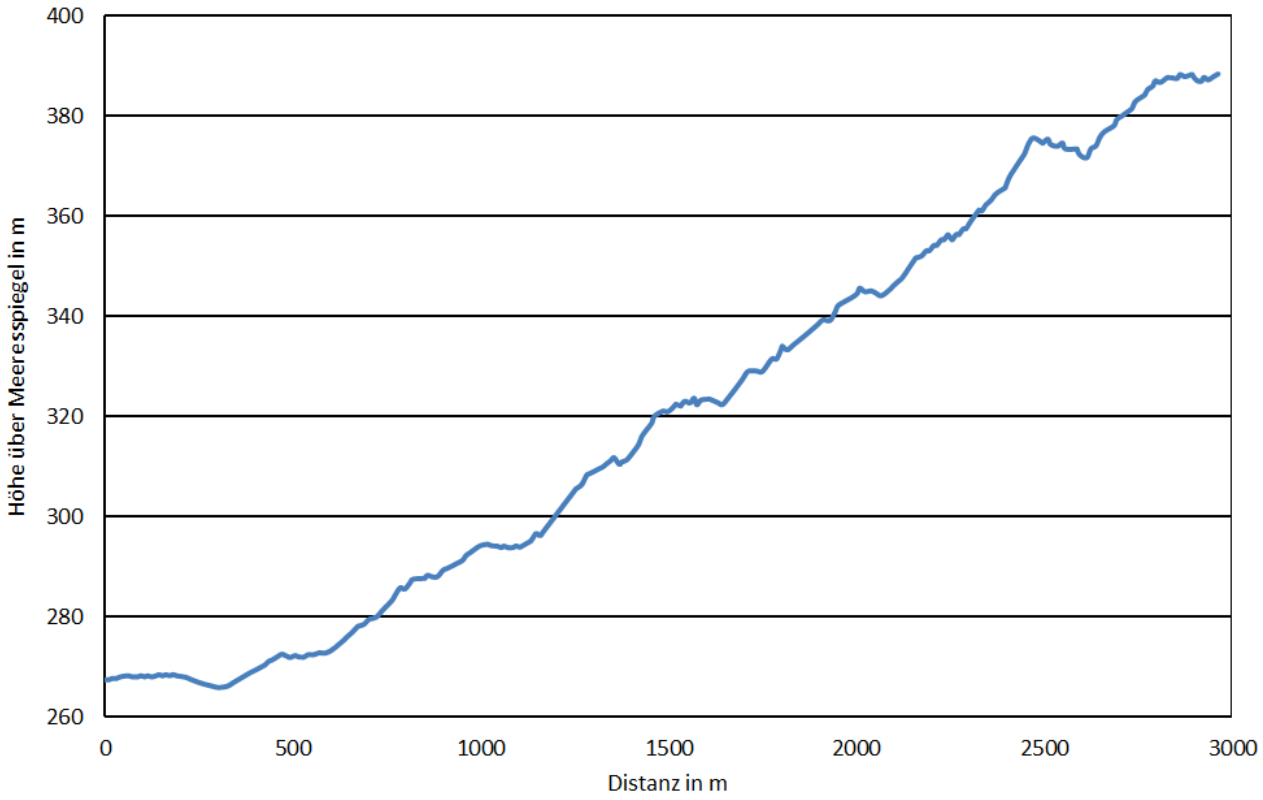


Abbildung 6.13: *Höhenverlauf der Bergfahrt*

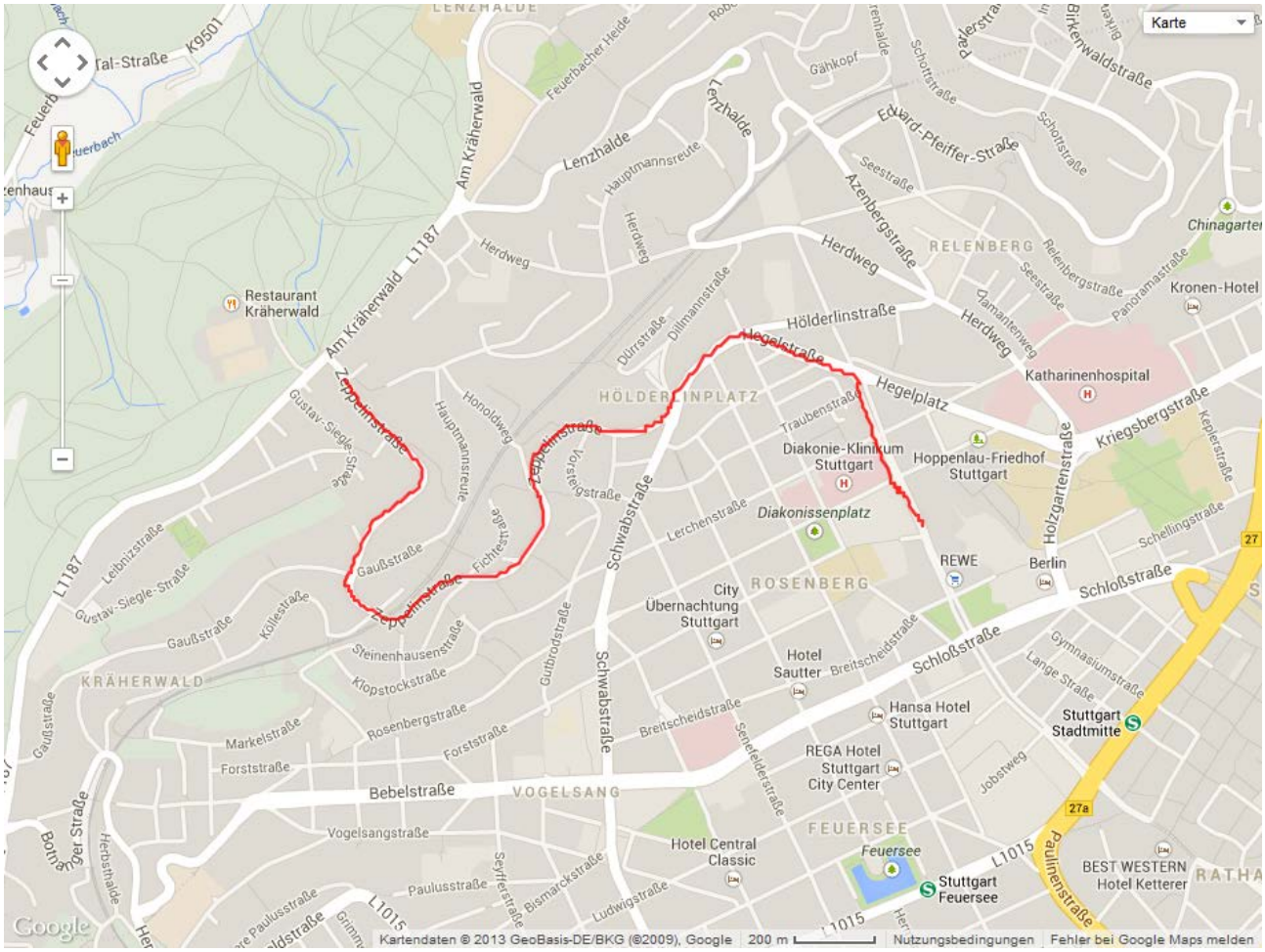


Abbildung 6.14: *Streckenverlauf der Bergfahrt (Quelle: Google, Kartendaten GeoBasis-DE/BKG)*

Bei der kurzen Bergfahrt mit einem längeren Ampelhalt dominiert im Profil der Maximalstrom (siehe Abbildung 6.15).

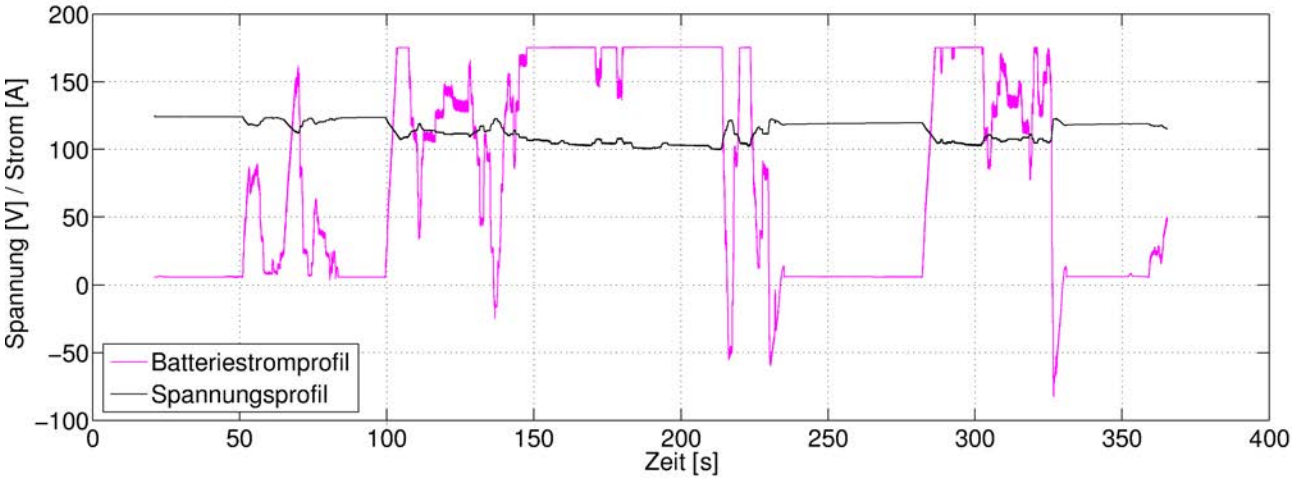


Abbildung 6.15: *Strom- und Spannungsverlauf der Bergfahrt*

Das Geschwindigkeitsprofil der Bergfahrt ist in Abbildung 6.16 dargestellt. Sie beträgt im Mittel des aufgezeichneten Zeitraums 29,79 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$.



Abbildung 6.16: *Geschwindigkeitsprofil der Bergfahrt*

Durch die kurze Aufzeichnung, aufgrund der topologischen Gegebenheiten, schlägt sich die Wartezeit an der Ampel auch deutlich im Histogramm nieder (siehe Abbildung 6.17).

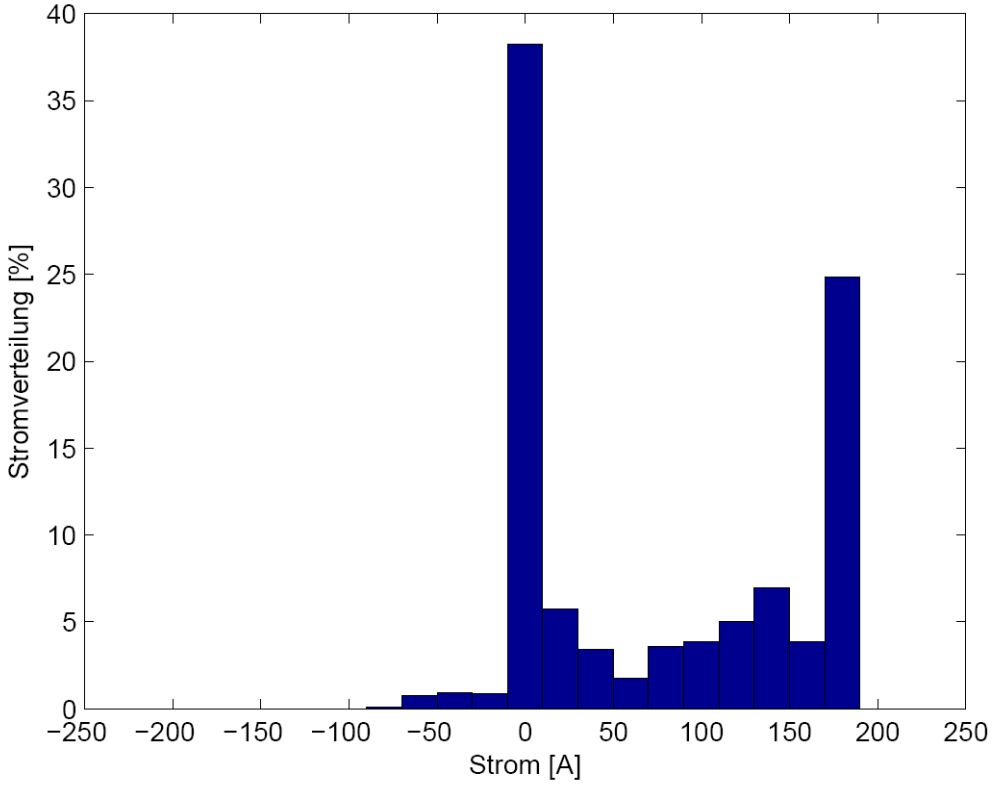


Abbildung 6.17: *Histogramm der Bergfahrt*

6.2.3 Fahrdaten einer Stadtfahrt

Dieser Fahrzyklus soll die Belastung der Batterie durch eine Stadtfahrt wiedergeben. Dazu wurde das Fahrzeug durch einen zufällig gewählten Teil der Stadt Stuttgart von etwa 8 km gefahren (siehe Abbildung 6.18). Es wurde mehrmals auf eine Geschwindigkeit von etwa 50 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ beschleunigt und auf 0 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ abgebremst (Stop and Go).

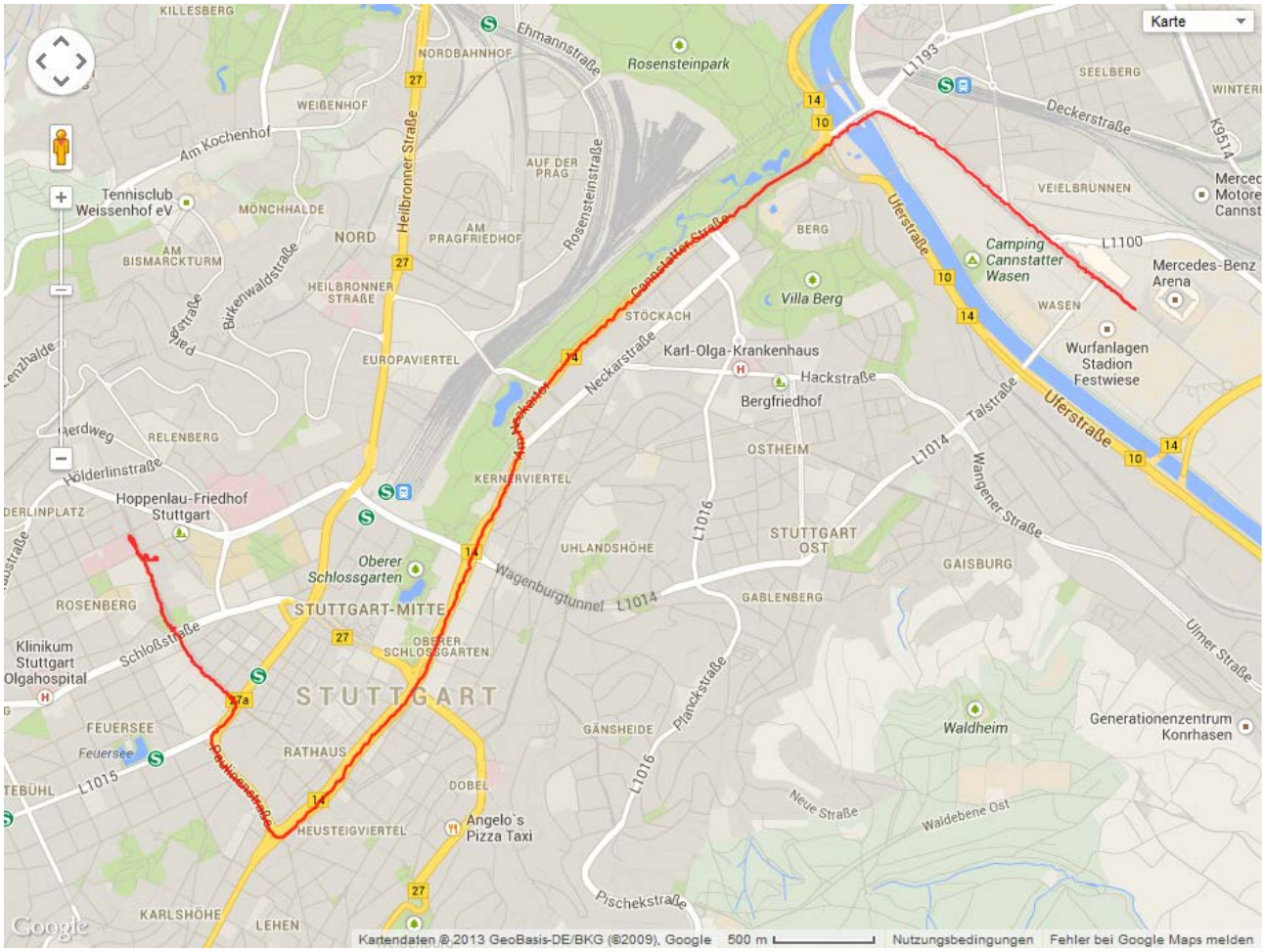


Abbildung 6.18: *Streckenverlauf der Stadtfahrt (Quelle: Google, Kartendaten GeoBasis-DE/BKG)*

Auf dem Stromprofil (siehe Abbildung 6.19) sowie dem Geschwindigkeitsprofil (siehe Abbildung 6.20) ist das häufige Stop and Go, gekennzeichnet durch Strompausen bei etwa 0 A gefolgt von einem Strommaximum, gut erkennbar.

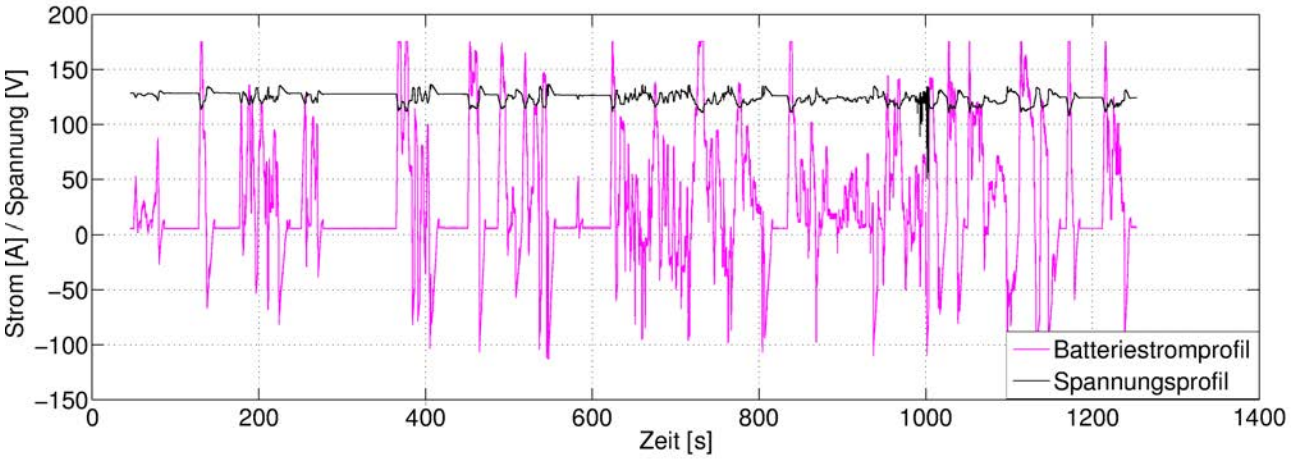


Abbildung 6.19: *Strom- und Spannungsverlauf der Stadtfahrt*

Die Geschwindigkeit beträgt im Mittel 26,05 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$



Abbildung 6.20: *Geschwindigkeitsverlauf der Stadtfahrt*

Die Auswertung im Histogramm zeigt, dass das Fahrzeug überwiegend steht oder bei niedrigen bis mittleren Strömen betrieben wird (siehe Abbildung 6.21).

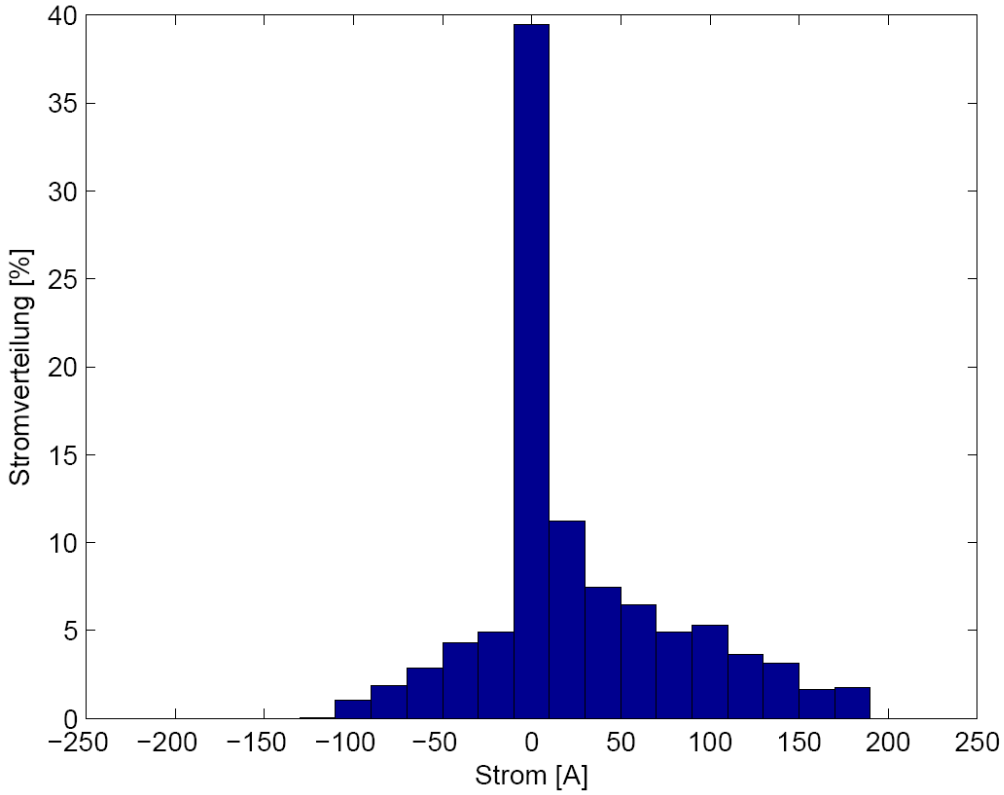


Abbildung 6.21: *Histogramm der Stadtfahrt*

6.3 Vermessung unter simulierten Realbedingungen

Um die Einsetzbarkeit und das Potenzial der Intelligenten Zelle aufzuzeigen, soll eine Zellanordnung deutlich unterschiedlichen Alterungszustandes unter dem Fahrprofil der Stadtfahrt belastet werden. Es wird erwartet, dass sich die Zelle mit dem höheren Alterungszustand frühzeitig beim Erreichen ihrer Grenzspannung aus dem Verbund abschaltet. Dadurch wird erreicht, dass virtuell das Fahrzeug durch diese Zelle in der Reichweite nicht begrenzt wird. Es ist ausreichend, den Versuch mit zwei Intelligenten Zellen durchzuführen, um die Funktionalität nachzuweisen. Für die Verifikation der Messergebnisse wird der Versuch mit einer Simulationsumgebung abgebildet und mit der Messung verglichen. Die gewonnenen Erkenntnisse werden auf ein größeres Modell erweitert und die Vorteile aufgezeigt.

6.3.1 Vermessung von zwei Intelligenten Zellen

Zwei Zellen unterschiedlichen Alterungszustandes werden mit dem Profil der Stadtfahrt (siehe Abbildung 6.19) belastet. Abbildung 6.22 zeigt den zugehörigen Versuchsaufbau.

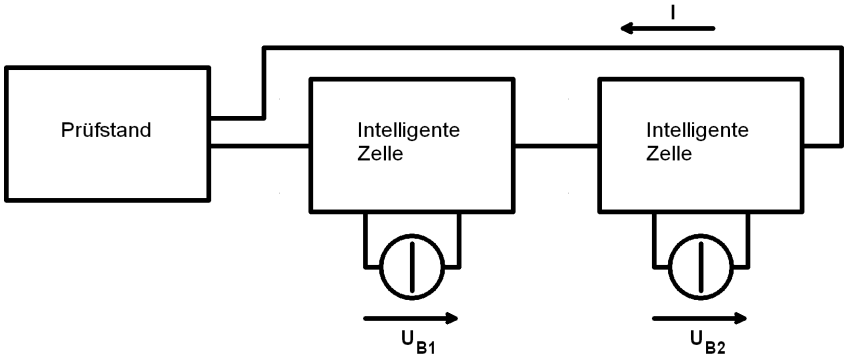


Abbildung 6.22: *Versuchsaufbau mit zwei Intelligenten Zellen*

Die Eigenschaften der eingesetzten Batteriezellen bildet Tabelle 6.2 ab.

	Zelle 1	Zelle 2
Typ	Li-Ion	Li-Ion
Formfaktor	18650	18650
Nominalspannung	3,6 V	3,6 V
Nominalkapazität	2150 mA h	2150 mA h
Restkapazität	1080 mA h	190 mA h
Alter und Nutzung	ca. 4 Jahre, ungenutzt	4 Jahre, stark genutzt

Tabelle 6.2: *Eigenschaften der eingesetzten Batteriezellen*

Um thermische Probleme zu vermeiden wurde das Stromprofil skaliert, so dass sich ein maximaler Strom von etwa 1 C bezogen auf die Nominalkapazität ergibt. Da die Höhe der Rekuperationsströme stark fahrerabhängig sind, werden sie im Folgenden herausgerechnet, um den ungünstigsten anzunehmenden Fall abzubilden.

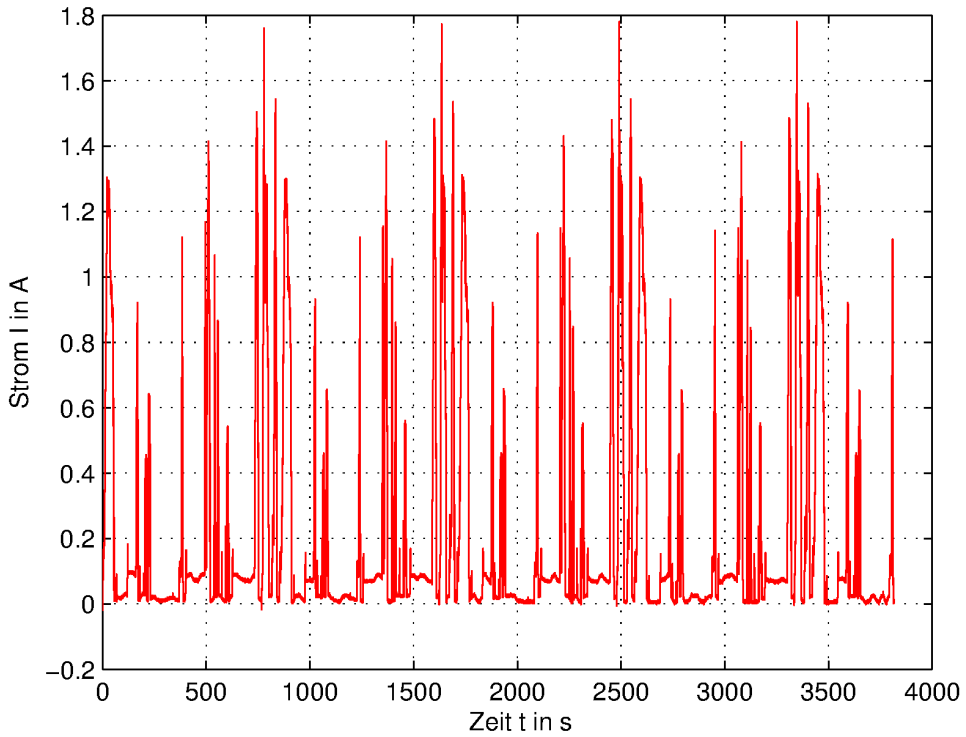


Abbildung 6.23: *Beaufschlagtes Stromprofil*

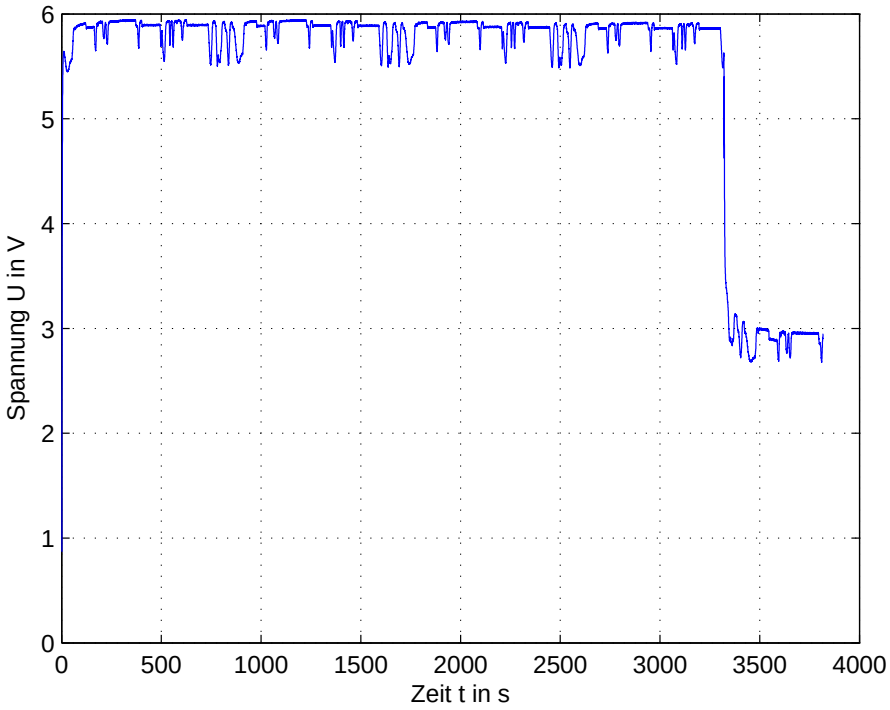


Abbildung 6.24: *Gemessene Gesamtspannung*

Die Abbildung 6.23 zeigt den beaufschlagten Strom auf die Zellen, Abbildung 6.24 die gemessene Gesamtspannung, welche sich aus der Addition von U_{B1} und U_{B2} ergibt.

Die übereinandergelegten Grafiken zeigen, dass sich Zelle 2 zum Zeitpunkt $t_{2,A}$ = 3320 s aus dem Verbund trennt, der Laststrom dabei jedoch nicht unterbrochen wird (siehe Abbildung 6.25).

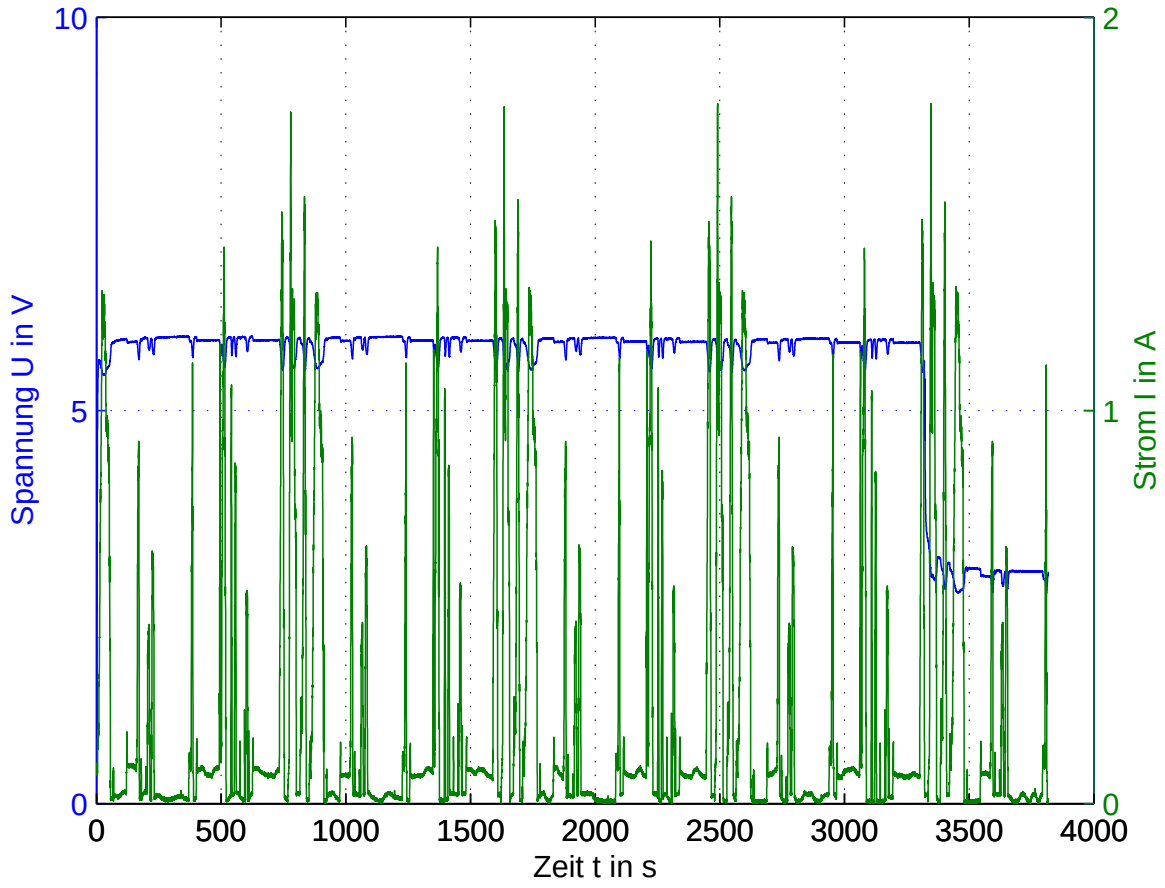


Abbildung 6.25: *Überlagerung aus Stromprofil und Gesamtspannung*

6.3.2 Simulationsmodell von zwei Intelligenten Zellen

Der Versuch der zwei Zellen soll zu besseren Vergleichbarkeit auch rechnerisch abgebildet werden. In einer Simulationsumgebung wird dazu der Strom der modifizierten Stadtfahrt aufintegriert bis als Kriterium die nutzbare Energie C_{Bn} der jeweiligen Zelle n erreicht ist.

Zu diesem Zeitpunkt gilt:

$$C_{Bn} = \int_{0}^{t_{n,A}} I(t)\,dt \tag{6.1}$$

Die Berechnung des Ausschaltzeitpunktes der Zelle 2 ergibt unter Berücksichtigung der Restkapazität den Zeitpunkt $t_{2,A}$ = 3530 s.

6.3.3 Vergleich von Messung und Simulation

Der Vergleich von Messung und Simulation zeigt, dass sich die messtechnisch ermittelte Ausschaltzeit mit der rechnerisch bestimmten Ausschaltzeit der Zelle deckt. Die Abweichung beträgt 5,9 %. Da das Simulationsmodell das tatsächliche Verhalten von zwei Intelligenten Zellen gut abbildet, kann davon ausgegangen werden, dass ein Simulationsmodell mit 200 Intelligenten Zellen den Realfall vergleichbar gut abbildet.

6.3.4 Simulation einer Batterieanordnung von Intelligenten Zellen

In einer simulierten Batterieanordnung von Intelligenten Zellen soll nun gezeigt werden, dass sich die Reichweite eines Fahrzeugs durch den Einsatz von Intelligenten Zellen erhöhen kann. Voraussetzung dafür ist eine ungleichmäßige Alterung beziehungsweise eine ungleich nutzbare Kapazität der Zellen. Hierfür wird ein Verbund aus 200 Zellen angelegt. Als qualitative Streuung der einzelnen Zellen wird die Vermessung einer Charge von 200 neuen Zellen eines vergleichbaren Typs mit einer Nennkapazität von 5400 mA h zugrunde gelegt.

Die Verteilung der gemessenen Kapazitäten ist in Abbildung 6.26 dargestellt.

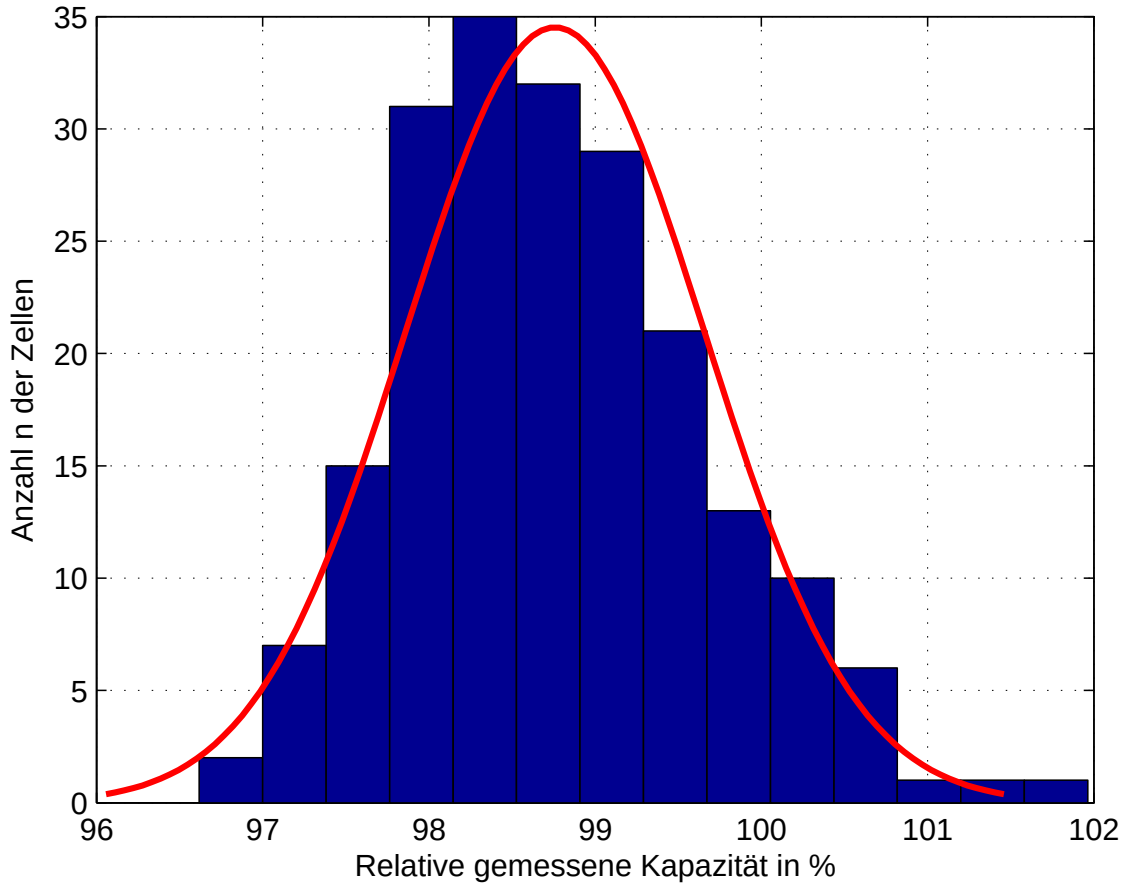


Abbildung 6.26: *Streuung der Kapazität von 200 neuen Zellen*

Die weitere Betrachtung soll relativ erfolgen. Die Höhe der Nennkapazität wie auch der Laststrom bestimmt den Ausschaltpunkt der ersten Zelle. Dieser Zeitpunkt wird im Folgenden als 100 % der Laufzeit definiert, um das Modell allgemein zu halten.

Nun wird der Laststrom einer Stadtfahrt in einer Simulationsumgebung aufintegriert und die Zeitpunkte des Abschaltens markiert. Durch das Abschalten der Zellen verringert sich auch die Gesamtspannung der Batterie, wohingegen sich der Leistungsbedarf nicht ändert.

Deswegen erhöht sich der Lastrom I_{Last} im Verhältnis Gesamtzahl der Zellen k zu aktive Zellen m verglichen mit den Messdaten aus der Stadtfahrt.

Es gilt:

$$I_{Last} = \frac{k}{m} \cdot I(t) \tag{6.2}$$

Abbildung 6.27 zeigt die Abschaltzeitpunkte der einzelnen Zellen.

Es zeigt sich, dass sich Einsetzbarkeit der Batterie bei einer zugrunde gelegten Streuung von neuen Zellen (siehe Abbildung 6.26) um 4,1 % verlängert. Legt man eine Reichweite des Fahrzeugs von 145 km zugrunde, bedeutet dies bei einer linearen Betrachtung eine Reichweitenverlängerung von etwa 5,95 km.

Es ist jedoch nicht realistisch, den Verbund tatsächlich bis auf eine aktive Zelle zu reduzieren. Zum einen vervielfacht sich der Laststrom und die damit einhergehenden Probleme wie beispielsweise Verlustleistung, zum anderen ist die Leistungselektronik zur Ansteuerung des Motors eines Elektrofahrzeugs nur bedingt in der Lage Spannungsschwankungen auf der Primärseite auszugleichen.

Die Leistungsfähigkeit der Intelligenten Zelle ist prinzipbedingt von der Streuung der Zellen abhängig. Eine einzelne fehlerhafte oder stark gealterte Zelle, welche den Verbund in der Leistungsfähigkeit beschränken würde, kann ausgeglichen werden und so die Leistungsfähigkeit des Verbundes signifikant gesteigert werden. Verschieden stark gealterte Zellen können so aus dem Verbund geschaltet werden, um die weitere Alterung zu verlangsamen und diese an das Gesamtsystem anzupassen. Gleichzeitig werden weniger stark gealterte Zellen stärker belastet, so dass sich diese ebenfalls dem durchschnittlichen Alterungszustand anpassen.

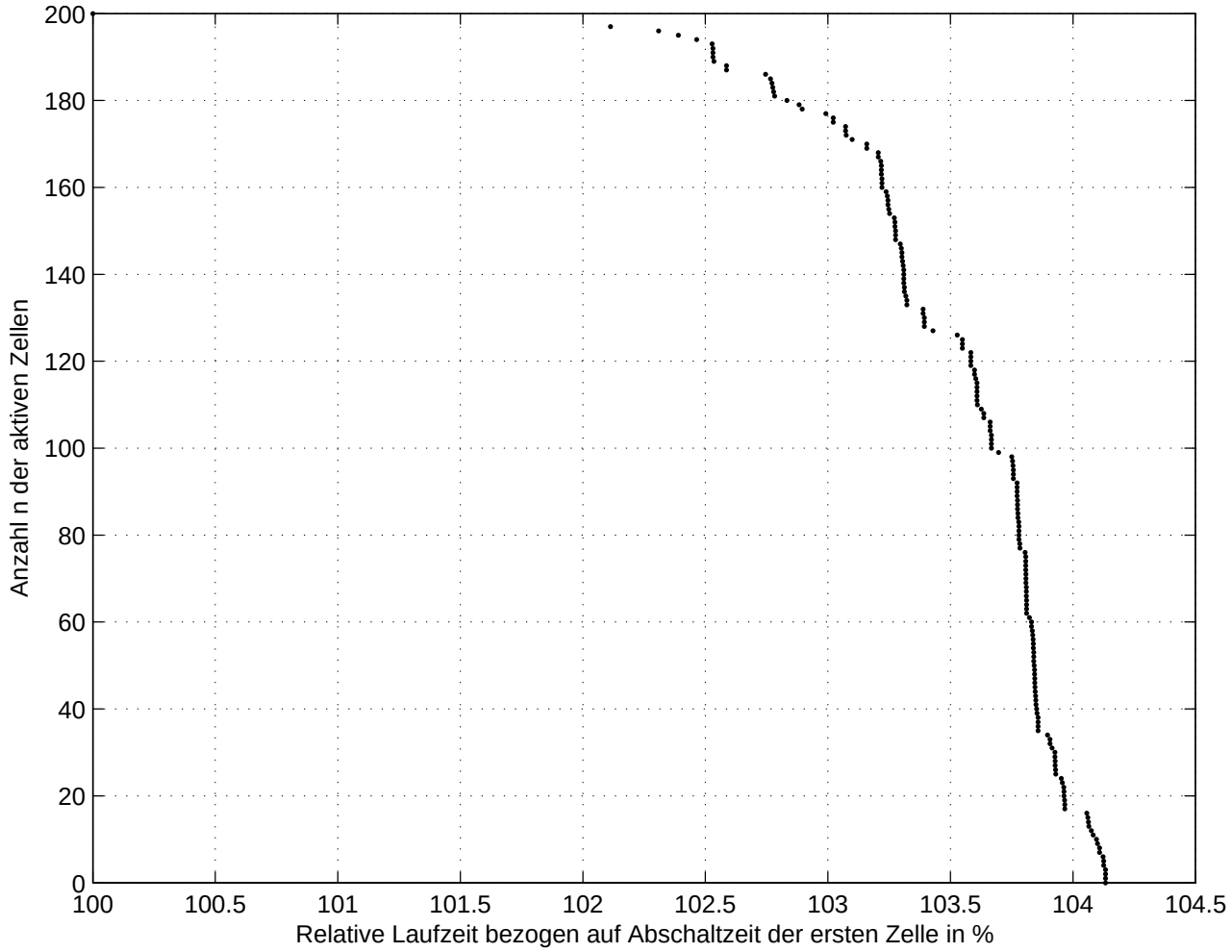


Abbildung 6.27: *Simulierte Abschaltzeitpunkte von 200 neuen Zellen in %, bezogen auf den Abschaltzeitpunkt der ersten Zelle*

6.3.5 Auswirkungen des Fahrprofils

Wie in Abschnitt 6.2 ersichtlich, hat das Fahrszenario und das Terrain maßgeblich Auswirkungen auf den Energieverbrauch des Fahrzeugs. Beispielsweise ist bei einer Bergfahrt im Vergleich zu einer Stadtfahrt bei gleicher mittlerer Geschwindigkeit, unter anderem aufgrund der Änderung der potenziellen Energie, ein deutlich höherer mittlerer Strom zu erwarten. Der mittlere Strom repräsentiert den Energieverbrauch, die mittlere Geschwindigkeit die Reichweite. Um eine vereinfachte Abschätzung der Auswirkung von Fahrszenario und Terrain auf die aufgezeigte Reichweitenverlängerung geben zu können, wird im Folgenden das arithmetische Mittel der Geschwindigkeit und das arithmetische Mittel des Stromes herangezogen und als Faktor der Quotient f aus beiden Werten gebildet.

$$f = \frac{\bar{v}}{\bar{I}} = \frac{1}{t_e} \cdot \int_{t=0}^{t_e} \frac{v(t)}{I(t)} \mathrm{d}t \tag{6.3}$$

In Tabelle 6.3 sind die Werte der Fahrszenarien Autobahnfahrt, Bergfahrt und Stadtfahrt mit dem berechneten Faktor f abgebildet.

Szenario	mittlere Geschwindigkeit	mittlerer Strom	Faktor f
Autobahn	79,72 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$	95,9 A	1,20
Berg	29,79 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$	77,3 A	2,59
Stadt	26,05 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$	27,9 A	1,07

Tabelle 6.3: *Berechnung des Quotienten f für verschiedene Fahrszenarien*

Mit Quotient f kann nun die zu erwartende Reichweitenverlängerung s für die anderen Szenarien abgeschätzt werden. Sie bestimmt sich aus dem Verhältnis der jeweiligen Faktoren f für die Szenarien.

$$f \cdot s = const \Rightarrow s_2 = \frac{f_1}{f_2} \cdot s_1 \tag{6.4}$$

Es ergibt sich damit eine Reichweitenverlängerung für die Bergfahrt von 2,46 km und für die Autobahnfahrt von 5,30 km, legt man eine Reichweitenverlängerung von 5,95 km bei der Stadtfahrt zugrunde.

6.4 Zusammenfassung der Validierung

Die Messungen auf dem Prüfstand ergaben, dass das Prinzip Intelligente Zelle unter Realbedingungen praktikabel ist und Vorteile gegenüber Systemen hat, welche ein Herausschalten einer Zelle nicht ermöglichen (siehe Abschnitt 6.3). Es wurde gezeigt, dass das Schalten aus dem Verbund auch unter realen Belastungen funktioniert und somit neben einer erhöhten Sicherheit durch das BMS ein wirkungsvolles Balancing möglich ist. Es wurde auch aufgezeigt, dass neue Zellen in ihrer Kapazität streuen. Unter Berücksichtigung dieser Daten kann das System Intelligente Zelle die Reichweite der Batterie bis zu 4,1 % verlängern. Ist die Streuung größer oder liegt eine Fehlfunktion einer Zelle, zum Beispiel durch einen Fertigungsfehler vor, ist die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems nur um dieses Element verringert, was einer signifikanten Verlängerung der Reichweite gleichzusetzen ist. Die Reichweitenverlängerung ist auch stark abhängig vom Fahrszenario. Eine Abschätzung zeigt, dass eine Verlängerung zwischen 2,46 km und 5,95 km bei einer zugrunde gelegten Reichweite des Fahrzeugs von 145 km möglich ist.

6.5 Spiegelung an der Zielsetzung

In einem prototypischen Aufbau konnte gezeigt werden, dass die Umsetzung eines dezentralen BMS mit der zusätzlichen Funktion, den Leistungsfluss beeinflussen zu können, realisierbar ist. Es zeigt sich, dass nur bedingt auf eine bereits vorhandene Technologie zurückgegriffen werden kann. So musste beispielsweise das in der Literatur beschriebene vollständige Shunting (siehe Abschnitt 3.1.6) für den Einsatzzweck erweitert werden. Darüber hinaus stellen sich besondere Anforderungen an die Software. Auch hier kann nur bedingt auf bekannte Technologien zurückgegriffen werden, was die Implementierung einer neuen Arbitrierung notwendig macht, welche auf die Besonderheiten des verteilten Systems ausgelegt ist.

Das System Intelligente Zelle vereint unterschiedliche Vorteile gegenüber konventionellen Systemen in sich.

Betrachtet man den gesamten Lebenszyklus, weist die Intelligente Zelle vorteilhafte Eigenschaften auf. Bereits in der Produktion kann die einheitliche Hardware zu einer Kostenreduktion beitragen. Der Transport der Intelligenten Zelle ist zudem weniger gefährlich, da die mechanischen Kontakte vom Energiespeicher getrennt sind. Weiterhin ergeben sich innerhalb der Montage neue Möglichkeiten für die Individualisierung ohne Änderung des Montageprozesses. Darüber hinaus sind keine aufwendigen Verkabelungsarbeiten durchzuführen. Es konnte in der Arbeit gezeigt werden, dass sich die Reichweite eines Fahrzeugs messbar erhöht. Eine mögliche Folge daraus ist eine kleiner dimensionierte Traktionsbatterie. Des Weiteren wurde gezeigt, dass der neue Ansatz die Batterie optimal nutzen kann und somit zu einer gleichmäßigeren und damit verlangsamten Alterung führt, was

das Batteriesystem langlebiger macht. Bei der Überführung der Zelle in ein Second oder Third Life kann der monetäre Wert, welcher stark von der Performanz des Energiespeichers abhängt, wesenlich zuverlässiger und genauer quantifiziert werden. Erreicht der Energiespeicher sein Lebensende, kann durch die einheitliche Gestaltung der BMS-Hardware und der Möglichkeit der Informationsbereitstellung von Restladung, enthaltener Materialien und so weiter, der Recyclingprozess effektiver erfolgen und die Zelle zielgerichteter verwertet werden.

Alle dieser Eigenschaften tragen dazu bei, dass die Komponente Batterie und die Einbettung dieser in das Gesamtsystem durch die Verwendung der Intelligenten Zelle einen finanziellen Vorteil mit sich bringt. Es kann daher abschließend festgestellt werden, dass die Intelligente Zelle hinsichtlich der Problemstellung einen wirksamen Beitrag leistet.

6.6 Weiterer Handlungsbedarf

Bei der vorliegenden Realisierung der Intelligenten Zelle handelt es sich um einen Laboraufbau, der weiter entwickelt und optimiert werden muss. Die Leistungselektronik stellt eine der Kernfunktionen der Intelligenten Zelle dar und bietet viel Raum für Optimierungen und ein Neudesign. Sie sollte bedarfsorientiert und unter Berücksichtigung neuster Technologien auf einen niedrigen Durchgangswiderstand beziehungsweise möglichst geringe Verlustleistung hin optimiert werden. Darüber hinaus ist die Datenübertragung mittels Powerline-Kommunikation in einer solchen Topologie und unter Anwendung von Batteriezellen wenig untersucht. Sie kann hinsichtlich der Übertragungsgeschwindigkeit und Robustheit weiter verbessert werden. Grundlegend dafür ist das Verhalten des Energiespeichers im mo-

dulierten Frequenzbereich, welcher genau untersucht werden sollte. Außerdem sind Störeffekte auf beispielsweise die weitere Fahrzeugelektronik zu betrachten. Das System kann durch die Verwendung anderer Halbleiter zum Beispiel durch die Verwendung eines System-on-a-chip oder eine anwendungsspezifische Integrierte Schaltung (ASIC) deutlicht verschlankt und kostengünstiger gestaltet werden. Natürlich muss der Aufbau auch in einem realitätsnahen Prototyp aufgebaut, getestet und weiter evaluiert werden. Die direkte Zusammenarbeit mit Herstellern aus den betreffenden Branchen ist dabei hilfreich und wünschenswert. In einem solchen Aufbau kann die Leistungsfähigkeit geprüft und beispielsweise der Wechsel einzelner defekter Zellen simuliert werden. Abschließend sollten die Auswirkungen des Einsatzes der Intelligenten Zelle im Bereich der Elektromobilität, aber auch in elektrotechnisch ähnlich gearteten Systemen, wie beispielsweise Photovoltaikanlagen, ganzheitlich betrachtet und bewertet werden.

7 Zusammenfassung

Mit hoher Wahrscheinlichkeit werden Elektrofahrzeuge ein Teil der individuellen Mobilität der Zukunft. Dies gilt vorrangig im urbanen Bereich und ist Ausdruck des politischen Willens wie er beispielsweise im „Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität“ der Bundesregierung beschrieben wird [BR09]. Auch die USA versprechen eine starke staatliche Unterstützung der Elektromobilität mit dem Ziel bis 2015 eine Million Elektrofahrzeuge auf den Straßen Amerikas zu bewegen [DOE11].

Eine Hürde bei der Einführung von Elektrofahrzeugen ist, dass sie vergleichsweise teuer sind. Auf die Batterie entfallen 40 % der Anschaffungskosten. Damit ist sie das Fahrzeugkosten bestimmende Bauelement. Die Kosten des Elektromobils sind entscheidend, ob es sich gegen andere Technologien tatsächlich durchsetzen kann. Daher ist das Ziel dieser Arbeit, einen Ansatz zur Kostenoptimierung der Komponente Batterie zu entwickeln.

In dieser Arbeit wurde gezeigt, dass die Schlüsselkomponente eines Batteriesystems, neben der galvanischen Zelle selbst, das Batteriemanagementsystem (BMS) ist. Es kann die Leistungsfähigkeit der Batteriezelle nicht verbessern, jedoch helfen, sie aufrechtzuerhalten. Es wurde aufgezeigt, dass bestehende BMS zentral aufge-

baut oder von einem zentralen Element abhängig sind und für jeden Fahrzeugtyp individuell angepasst werden. Dies führte zu dem Ansatz, ein verteiltes BMS zu entwerfen, das universell einsetzbar ist, eine einfache Skalierung erlaubt und einen Ausgangspunkt zur Standardisierung für die Komponente Batterie bildet. Dieses System sieht eine leistungsfähige Hardware für jede einzelne Batteriezelle vor, welche zunächst die Überwachung der einzelnen Zelle übernimmt, jedoch auch mit anderen Batteriezellen oder Fahrzeugsystemen kommunizieren kann. In dem Versuchsaufbau wurde die Kommunikation mittels Powerline-Kommunikation realisiert. Besondere Aufmerksamkeit gilt dem Balancer, welcher Ladungsunterschiede zwischen sich unterschiedlich verhaltenden Batteriezellen, beispielsweise verursacht durch Fertigungsunterschiede, ausgleichen soll. Es wurden zunächst verschiedene Systeme aufgezeigt, Vorteile und Nachteile auch hinsichtlich des verteilten Ansatzes diskutiert. Als vielversprechende Methode wurde das vollständige Shunting gewählt, das Leistungsschaltelemente vorsieht, um die Batteriezelle aus oder in den Batterieverbund zu schalten. Dieses Vorgehen erlaubt neben dem reinen Ladungsausgleich ein besonderes Sicherheitskonzept. Defekte Zellen beeinträchtigen nicht die Funktionsfähigkeit der ganzen Batterie. Im Fehlerfall können die Zellen getrennt werden und zum Beispiel Batteriebrände verhindert werden.

In einem Laboraufbau wurden die einzelnen Teile des Ansatzes aufgebaut, getestet und evaluiert. Darüber hinaus wurden reale Verbrauchsdaten eines Elektrofahrzeugs aufgenommen und die Zelle auf einem eigenen Prüfstand unter Realbedingungen belastet, um Aussagen über die Machbarkeit und Funktionalität treffen zu können und um weiteren Handlungsbedarf aufzuzeigen.

Es konnte gezeigt werden, dass ein verteilter Ansatz möglich und sinnvoll ist. Es wurden die Besonderheiten, die sich an die Architektur und Kommunikation eines solchen verteilten Systems stellen, analysiert und getestet. Ebenfalls konn-

te gezeigt werden, dass das eingesetzte vollständige Shunting eine umsetzbare Balancing-Methode ist. Das vorgestellte System kann die Lebensdauer einer Batterie erhöhen. Dies wird durch die optimale Ausnutzung unterschiedlich performanter Zellen erreicht. Des Weiteren bietet die vorgestellte Lösung einen Ansatz zur Standardisierung von Batterien, ohne die Flexibilität oder Skalierungsmöglichkeit einzuschränken. Die Nutzung einer gleichbleibenden Hardware, die ein einfaches Aneinanderreihen der mit ihr ausgestatteten Zellen ohne zusätzliche Verkabelung oder Hardware erlaubt, bietet das Potenzial, die Wertschöpfungskette der Batterie zu verbessern.

Es sollten weitere Untersuchungen angestellt werden, um den verteilten Ansatz weiterhin zu verbessern. Zum einen kann die Leistungsfähigkeit der Kommunikation ausgebaut werden. Hier wäre eine Erhöhung der Datenrate bei gleichzeitiger Reduktion des Energieverbrauchs und der Komplexität der Schaltung anzustreben. Des Weiteren sollte das vollständige Shunting näher betrachtet und hinsichtlich Design, Kosten und Verlustleistung optimiert werden.

8 Summary

It is highly probable that electric vehicles will be part of the individual mobility in the future. This will take place especially in urban areas and is the political will as described for example in the „Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität“ by the german government [BR09]. Also the USA assure strong public support of the e-mobility and aim at one million electric cars on Americas streets by 2015 [DOE11].

Current high prices stifle market entry of e-cars. The battery represents 40 % of the selling price and and is thus a major cost driver. The price of a vehicle majorly determines whether a technology can prevail against others or not. In consequence this thesis adresses the adverse cost structure of e-cars by developing an approach for cost optimisation of the component battery.

First this thesis shows that the key component of a battery system is not only the galvanic cell itself, but also the battery management system (BMS). The BMS can not improve the performance of a battery cell itself but helps to preserve it. Furthermore it was shown that BMS are either build up in a centralized manner, or are dependend on a central controller. Also BMS are currently tailored for each type of vehicle.

All this led to the approach to develop a distributed BMS which is universal, offers easy scaling and can be the basis for standardisation of the component battery. This system includes a powerful hardware for each battery cell. This hardware first monitors the cell but can also communicate with other cells or a vehicle management system. In the laboratory setup the communication is realized by using powerline communication. In this setup the balancing system to compensate irregularities in cell charge is crucial. Subsequently different systems with their advantages and disadvantages are discussed with regard to the distributed approach. The most promising way seems to be the complete shunting method, which employs switching elements to include or exclude a battery cell from the battery arrangement. This approach offers not only balancing, but also a special security concept. Broken cells do not affect the functionality of the whole system. In case of an error defect cells can be excluded from the system and this helps for example to prevent battery fire.

All parts were built up in laboratory setup, tested and evaluated. Moreover, real consumption data was recorded on an electric vehicle. This data was then used in the laboratory setup under real conditions to evaluate the feasability, functionality and to show futher need for action.

In essence this thesis demonstrates that a distributed approach is feasable. The special demands regarding architecture and communication could be analyzed and tested. In addition it could be shown that the complete shunting is a relizable balancing method. The presented system can prolong the life of a battery. This is achieved by the optimal usage of each battery cell according to its individual performance. Moreover, the described solution offers the possibility to standardize the battery system without reducing flexibility or scaleability. Thus it offers the potential to optimize the supply chain of the whole battery system by using a

universal hardware to allow putting battery cells in serial without any additional wiring.

Nonwithstanding, there is need for more action to improve the described approach. First the performance of the communication should be enhanced. Higher speed with lessened energy consumption and a less complex hardware would optimize the system. Second the complete shunting should be analyzed and upgraded in accordance to design, costs and power loss.

Anhang

Experteninterviews

Batteriezellenfertigung

Interviewer: Jonathan Brix
Experte: Dr. rer. nat. Dipl.-Chem. Reinhard Mörtel, Fraunhofer Institut für Siliziumtechnologie
Datum: 26.08.2013 **Uhrzeit:** 10:00 Uhr
Art: Freigegebenes Gedächtnisprotokoll nach Telefonat
Frage: Können Sie mir kurz Ihren fachlichen Hintergrund und Expertise in Bezug auf Batteriezellenfertigung nennen?
Antwort: Mein Name ist Reinhard Mörtel. Ich arbeite seit 4 Jahren am Fraunhofer Institut für Siliziumtechnologie in einer Arbeitsgruppe, die sich mit der Technologie von Lithium-Ionen-Zellen beschäftigt. Vorher war ich in diversen Feldern der Elektrochemie beschäftigt, da ich von Haus aus Elektrochemiker bin und beschäftige mich seit 15 Jahren mit verschiedensten Anwendungen der elektrochemischen Energiespeicherung beziehungsweise -wandlung.
Frage: Wodurch zeichnet sich eine gute Batteriezellenproduktion aus?

Antwort: Generell sollte die Produktion von Batteriezellen unter sauberen Bedingungen stattfinden, es sollte möglichst keine - wenn dann eine kontrollierte - Luftfeuchtigkeit vorhanden sein. Staub- und Metallpartikel sind der Feind der Zelle, wenn sie in die Zelle gelangen, das heißt auch hier sollte darauf geachtet werden. Es ist aber nicht nötig unter Rein- oder Reinstraumbedingungen zu arbeiten. Dies ist ein Geheimnis der Produktion.
Die Produktion sollte zu gleichmäßigen Zellen beziehungsweise gleichen Zellkapazitäten führen, das heißt die Reproduzierbarkeit der einzelnen Arbeitsschritte ist sehr wichtig. Hier tut sich auch ein weites Feld für die Automatisierung auf. Dies ist nicht immer so gegeben, wie es wünschenswert wäre.
Frage: Gibt es einen herausragenden Schritt bei der Produktion, dessen Automatisierung besonders wünschenswert wäre?
Antwort: Die Schritte sind in sich bereits schon automatisiert, aber es gibt in verschiedenen Schritten nach wie vor Unwägbarkeiten oder eine Varianz, die dazu führt, dass die Zelle selbst wiederum ein Individuum ist. Zum einen, ganz zu Beginn der Herstellung, der Elektrodenfolien beziehungsweise des Separators. Diese sind bereits auf einer Skala von einigen Mikrometern nicht homogen. Hier müssen große Anstrengungen unternommen werden um homogene Folien zu bekommen. Wenn hier Schwankungen in der Zusammensetzung beziehungsweise in der Dicke existieren macht sich dies sofort unangenehm bemerkbar. Dies gilt für beide Elektroden und für den Separator, den man meistens bei der Zellfertigung von außen bezieht, also hier der Lieferant beziehungsweise die Qualitätssicherung in der Verantwortung ist.
Frage: Gibt es weitere Schritte bei der Fertigung, die problematisch sind?
Antwort: Im Assembly selbst können nur Fehler gemacht werden. Hier muss sehr darauf geachtet werden, dass keine Fremdpartikel in die Zelle gelangen und dass man unter gleichen Bedingungen arbeitet. Ansonsten sind natürlich jegliche Grate, die beim Schneiden oder Stanzen entstehen zu vermeiden. Das Löten muss gut

durchgeführt werden. Dies sind aber eher grobe Fehler, welche den Ausschuss erhöhen, die man aber letztendlich schnell finden und ausmerzen kann.
Ein weiterer Schritt ist die Elektrolytbefüllung. Hier kämpft man gegen zwei Dinge an. Zunächst möchte man möglichst schnell befüllen, zum anderen ist dies nun mal ein zeitbehafteter Vorgang. Und in diesem Spagat das Optimum zu finden ist relativ problematisch.

Frage: Beim Beschichten wird das Slurry unter Verwendung eines Lösungsmittels verarbeitet. Verschiedene Quellen verweisen auf die Lösungsmittelfreiheit als Ziel. Ist dies noch ein Thema?

Antwort: Das noch ein großes Thema. Denken Sie an ELIBAMA, wo wir einen ganz neuartigen Ansatz verfolgen. Momentan geht der Trend eher dahin, organische Lösungsmittel möglichst durch Wasser zu ersetzen. Aber das ist unter Umständen problematisch, wenn wasserempfindliche Elektrodenmaterialien verwendet werden, was durchaus auftritt. Und dieses Wasser muss natürlich vor der Elektrolytbefüllung restlos bis auf wenige ppm entfernt werden. Dies ist die Problematik daran. Aber dies ist der Weg, der beschritten wird und wo einige schon sehr weit gekommen sind.

Frage: Beim Formieren und Prüfen der Zelle hat sich herausgestellt, dass dies ein langwieriger Prozessschritt ist. Sehen Sie eine Möglichkeit chemisch diese Zeit zu verkürzen?

Antwort: Dies ist ein unabdingbarer Schritt bei der Fertigung der Lithium-Ionen-Zelle. Man kann diesen nicht verändern, weil hier chemische Reaktionen ablaufen, die eine für die Funktion unabdingbare Schutzschicht bilden. Die Zelle selbst ist thermodynamisch instabil. Eigentlich würden die Zellkomponenten sofort spontan miteinander reagieren. Die Zelle funktioniert eigentlich nur, weil man auf dem Kohlenstoff, insbesondere bei Kohlenstoffanoden, intrinsisch eine Schutzschicht bildet. Und diese muss relativ sorgfältig gebildet werden. Die Natur hilft uns an dieser Stelle. Die Schutzschicht bildet sich, aber nicht in Sekundenschnelle, son-

dern sie muss sorgfältig ausgebildet werden und dies geschieht durch relativ langsames Zyklen, also zehn Stunden Laden und zehn Stunden Entladen. Theoretisch in einem Zyklus, praktisch wird man jedoch einen weiteren anschließen. Es gibt nun bei den Herstellern verschiedene Ansätze und verschiedene Glaubensrichtungen, wie das etwas beschleunigt und verbessert werden kann. Aber dies sind geringfügige Verbesserungen, die sich noch nicht einmal in der Zeit der Formierung sondern eventuell in einer etwas besseren Alterungsbeständigkeit beispielsweise niederschlagen. Im Prinzip sehe ich hier keine durchschlagende Möglichkeit diesen Schritt mit den gegenwärtig verwendeten Materialien deutlich zu beschleunigen. Wenn man auf ein System mit Titanat oder Eisenphosphat übergeht, besteht jedoch eventuell die Möglichkeit.

Frage: Welche Zellformen gibt es?

Antwort: An sich gibt es vier Möglichkeiten. Die Zellen können rund gewickelt werden, sie können flach gewickelt werden, dann formt sich die Zelle oval, man kann sie aufeinander stapeln oder man kann sie falten. Einige Zellen werden anschließend laminiert, um einen besseren Zellverbund zu erreichen. Dies ist beispielsweise bei höherwertigen Zellen zum Beispiel in Smartphones der Fall. Diese Zellen müssen gestapelt werden. Klassische Rundzellen, wie sie beispielsweise in Laptops eingesetzt werden, sind straff gewickelt. Die Präzision des Fügeprozesses hat direkten Einfluss auf die Zelle, wobei, wenn man einfach nur straff wickelt, ist dies ein etablierter Prozess.

Frage: Was denken Sie ist aktuell das kritischste Problem bei der Zellfertigung?

Antwort: An sich immer, das was man nicht kann. Wenn man natürlich die Elektrodenfolien sauber herstellen kann, ist man schon einen entscheidenden Schritt weiter und wenn man noch den Elektrolyt unter inerten Bedingungen zugibt. Das ist ein weiterer Knackpunkt - das Befüllen der Zelle. Ab der Zugabe des Elektrolyten darf keine Umgebungsluft mehr hinkommen. Dies sauber hinzubekommen ist, wenn man so will, der zweite Knackpunkt.

Frage: Man hat einen Ausschuss bei der Fertigung und man hat - Sie sagten es bereits - eine Streuung der Zellen. Können Sie eine grobe Schätzung abgeben, wie hoch der Ausschuss beziehungsweise die Streuung der Zellen ist?

Antwort: Was ich weiß darf ich Ihnen nicht sagen. Ganz grob gilt, das man ab 70 % der Produktion, die das erfüllt was man erreichen will, man marktfähig ist. Man muss unter Umständen durch geringe Lohnkosten der Arbeiter den Ausschuss wieder hereinholen, um den Preis niedrig zu halten. 80 % sind anzustreben, ab 90 % kann man sich in der Spitzengruppe fühlen. Ob dies einer erreicht, weiß ich nicht.

Frage: Ab wann ist eine Zelle Ausschuss und ab wann kann ich sie weiterverwenden?

Antwort: Das legt der Hersteller fest. Die Kapazität muss dafür nicht nur das Kriterium sein. Wenn eine Zelle 50 % Nennkapazität hat, wird man sie nicht mehr auf den Markt bringen können. Wenn sie jedoch 80 % bis 90 % ihrer Nennkapazität hat, dann bringt man sie auf den Markt, beispielsweise in einer geringeren Kapazitätsstufe oder als verbilligte Zelle. Vielmehr ist dies jedoch eine Frage der Alterung. Wenn beim Anzyklen schon gemerkt wird, dass die Zelle einige Prozent Verlust pro Zyklus aufweist, kann man davon ausgehen, dass deren Lebensdauer stark reduziert ist. Die Firmen haben auch Richtlinien, wie hoch der Innenwiderstand sein darf oder wie hoch das Fading sein darf.

Frage: Es gibt physikalische Ziele beispielsweise des USABC wie zum Beispiel Zyklenfestigkeit oder Leistungsdichte, insbesondere jedoch bei dem Preis. Denken Sie, dass man diese Ziele mit der heutigen Technologie so umsetzen kann?

Antwort: Man muss feststellen, dass zum Beispiel die Elektrodenmaterialien ihre intrinsische Lebensdauer haben und man wird mit einer handelsüblichen Cobaltoxid gegen Graphit Zelle keine 10 000 Zyklen erreichen. Aber es gibt Systeme mit denen das durchaus möglich ist, beispielsweise wenn Titanat als Anodenmaterial gewählt wird. Man muss hier zwischen den Zellchemien sehr genau unterschei-

den. Ansonsten ist der Preis zurzeit deutlich günstiger, als man dachte, was aber auch an den nicht ausgelasteten Produktionskapazitäten liegt. Was den Preis betrifft, fließt hier mehr ein, als nur die Technologie. Das sind Rohstoff und auch noch die Arbeitskosten, das sind insbesondere auch die Gewinnerwartungen, die man hat. Ein angestrebter definierter Gewinn treibt den Preis in die Höhe.

Frage: Denken Sie, dass man unter Verwendung der heutigen Technologie durch Optimierung viel mehr zum Beispiel 30 % herausholen kann oder ist man bereits an der Grenze von Leistungsdichte und so weiter?

Antwort: Ich kann mir 30 % mit den bekannten Substanzen und dem Spannungsbereich von 4,2 V schwer vorstellen. Wenn man tatsächlich die Energiedichte deutlich erhöhen will, hilft einem die Evolution nur noch bedingt. Einen deutlichen Sprung erreicht man nur unter Verwendung anderer Materialien, sprich andere Kathodenmaterialien und indem man die Spannung noch höher treiben kann. Das ist momentan in der Forschung, man ist jedoch noch weit weg von der Anwendung. Mit den jetzigen Materialien kann man sich durch Evolution vielleicht 10 %, maximal 20 % verbessern.

Frage: Der nächste Schritt können Lithium-Luft-Zellen sein. Wann denken Sie sind diese industriell verfügbar?

Antwort: Der Nächste Schritt ist Lithium-Schwefel. Dieser ist in etwa 2-3 Entwicklungsperioden verfügbar. Wenn ich eine Entwicklungsperiode mit 3-4 Jahren angebe, sind das noch etwa 10 Jahre, wo diese Technologie zur Verfügung steht. Lithium-Luft sowie die ganzen Brennstoffzellen-artigen Systeme sehe ich weit entfernt am Horizont. Da sind einfach die Schwierigkeiten noch zu groß. Ein Prototyp im Labor reicht nicht aus.

Frage: Die Coffeebag Verpackung der Zellen ist eine Art der Umhausung, wo auf eine harte Hülle verzichtet wird. Kann man sagen, dass dies einfach eine kostengünstige Verpackungsform ist?

Antwort: Man hat relativ einfach und günstig eine flexible Art Zellen herzustellen,

das ist richtig. Das ist der große Vorteil. Der Nachteil ist jedoch die Empfindlichkeit, gerade wenn sich die Zelle etwas aufbläht oder sie mechanisch belastet wird. Und was noch ein Nachteil ist, ist die Lebensdauer über die Jahre betrachtet. Ein gut ausgeführtes Hardcase ist langzeitstabiler als eine gut ausgeführte Coffeebag-Verpackung.

Frage: Hat das chemische Gründe zum Beispiel durch den vorhandenen Gegendruck? Der Inhalt der beiden Verpackungsformen ist an sich ja gleich.

Antwort: Der Punkt ist, auch wenn Gegenteiliges behauptet wird, dass diese Verpackungsform nicht zu 100 % die Migration von Luft oder Wasser verhindert. Dies muss aber über Jahre gesehen werden. Einige ppm, hauptsächlich Wasser, können dann eindringen. Dies wurde auch in Untersuchungen nachgewiesen, wo die Qualität nach Jahren betrachtet und dann verglichen wurde. Ich bin mir nicht sicher, ob dies auch veröffentlicht und nicht nur auf Konferenzen präsentiert wurde. Das interessiert den Anwender eines Handys jedoch nicht. Bis dieser Fall auftritt, hat man dann schon das Gerät der nächsten Generation. Aber zum Beispiel die Fahrzeughersteller beschäftigen sich sehr wohl damit.

Frage: Kann die Produktion von Batteriezellen als geschlossener Regelkreislauf gesehen werde, das heißt werden die Ergebnisse der Fertigung mit Fertigungsparametern verknüpft? Wird jeder Schritt als solches betrachtet oder der gesamte Prozess?

Antwort: Ich weiß nicht welche Philosophie bei den einzelnen Herstellern herrscht. Letztendlich hat man bedingt durch die vielen Fertigungsparameter kaum eine andere Chance, als von dem letztendlich entstehenden Produkt auszugehen. Wenn das Produkt passt, werden die Parameter nicht geändert, wenn etwas nicht passt, muss man sich die gesamte Herstellungskette anschauen. Angefangen bei den zugekauften Materialien bis letztendlich zum Aufbringen der Aufkleber auf die Zelle. Da kann immer mal wieder was schief gehen. Man hat zwei Parameter.

Kapazität und Innenwiderstand und dann versucht man die Herstellung so zu trimmen, dass diese passen.

Vielen Dank Herr Dr. Mörtel für das Interview.

Batteriерecycling

Interviewer: Jonathan Brix

Experte: Dipl.-Ing. Marcus Dörr, Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung

Datum: 26.08.2013 **Uhrzeit:** 13:00 Uhr

Art: Freigegebenes Gedächtnisprotokoll nach pers. Gespräch

Frage: Können Sie mir kurz Ihren fachlichen Hintergrund und Expertise in Bezug auf Batteriерecycling nennen?

Antwort: Mein Name ist Marcus Dörr. Ich beschäftige mich mit dem Recycling, insbesondere dem von Lithium-Ionen-Batterien, seit 2009. Sowohl auf abstraktem Niveau, als auch direkt mit dem Prozess. Ich habe auch an dem Antrag zu ELIBAMA mitgewirkt und forsche innerhalb dieses Projektes seit 2011 über das Lebensende von Lithium-Ionen Traktionsbatterien.

Frage: Wie muss man sich die Aufarbeitung von Lithium-Ionen-Batterien vorstellen?

Antwort: Nun zunächst gibt es auf Zellebene keine Aufarbeitung. Es ist mir nur ein Patent bekannt, welches sich damit beschäftigt, aber eine Aufarbeitung gibt es nur auf System- oder Modulebene. Bei einzelnen Zellen muss man von Verwertung sprechen.

Frage: Werden Traktionsbatterien auf Systemebene aufgearbeitet?

Antwort: Was schon gemacht wird, ist die Reparatur von Batteriesystemen. Hier wird nicht auf Modul- oder gar Zellebene gearbeitet, sondern hier betrachtet man das ganze System. Es gibt kritische Bauteile wie Stecker, das BMS oder Widerstände, für die das Gehäuse geöffnet wird und welche repariert werden. Dabei geht man aber nicht an die Verkabelung, Module oder Zellen. Das ist bereits realisiert.

Frage: Gesetzlich ist eine Sammelquote vorgeschrieben. Wird man so zum Recycling gezwungen?

Antwort: Eine 45 % Sammelquote gibt es für Gerätebatterien. Traktionsbatterien fallen in den Bereich Industriebatterien, wo der Hersteller für das Recycling Sorge zu tragen hat, also herrscht hier eigentlich eine 100 % Quote. Für sonstige Industriebatterien ist eine Recyclingquote von 50 % einzuhalten. Bei Bleibatterien ist die Sammelquote etwa 100 %, das wäre auch für Li-Ion-Batterien möglich.

Frage: Wer schreibt das vor?

Antwort: Einmal wird das im BattG geregelt und dann auch in der EU-Direktive 2006/66/EC.

Frage: Welche Arten von Recycling für Lithium-Ionen-Zellen gibt es?

Antwort: Es gibt das pyrometallurgische und das hydrometallurgische Verfahren. Die Pyrometallurgie ist ziemlich weit verbreitet, da sie recht billig ist. Einer der größten Recycler ist hier die Firma umicore. Bei der Hydrometallurgie ist EDI aus der Veolia Gruppe oder SNAM aktiv.

Ökonomisch attraktiv ist auf jeden Fall die Pyrometallurgie. Die Hydrometallurgie besteht aus Batch-Prozessen, kann nicht kontinuierlich ablaufen und ist für kleinere Mengen geeignet.

Frage: Kann man generell sagen, dass die Hydrometallurgie ökologischer ist?

Antwort: Man hat hier eine sehr viel höhere Selektivität. Die Organik der Zelle kann auch rückgewonnen werden. Beispielsweise wird der Elektrolyt bei pyrometallurgischen Prozessen verbrannt, bei hydrometallurgischen könnte er rückgewonnen werden. Wenn man Fertigung und Recycling als einen geschlossenen Kreislauf ansehen will, wo man aus Batteriematerialien wieder Batteriematerialien machen will, kommt man an der Hydrometallurgie nicht vorbei.

Frage: Also ist die Hydrometallurgie schon das sinnvollere Konzept?

Antwort: Das würde ich so nicht sagen. Beide Technologien haben ihre Berechtigung. Der Geschäftsführer eines Recyclingunternehmens sagte mir, dass die Mengen, die prognostiziert sind, momentan mit Hydrometallurgie nicht in den Volumina recyclebar sind.

Frage: Was sind denn die Vor- und Nachteile?

Antwort: Die Pyrometallurgie produziert neben einer Metalllegierung noch Metallschlacke und Flugstäube. Die Flugstäube und Schlacke werden im Straßenbau weiterverwendet. Die Metalllegierung weiterverarbeitet. Die hohe Selektivität, die Rückgewinnung seltener Erden und so weiter wird aber nicht in dem Maße wie bei der Hydrometallurgie erreicht. Hier besteht aber das Problem, dass die Prozesse in einem Batch-Prozess ablaufen und die einzelnen chemischen Prozessschritte auch zeitintensiv sind. Man verwendet auch große Mengen an Chemikalien. Die gewonnen Salze sind meist auch nicht in der Reinheit oder Zusammensetzung, so dass weitere Schritte erforderlich sind, um ein batteriefähiges Produkt zu erhalten.

Frage: Das hört sich sehr kompliziert an. Lohnt sich das?

Antwort: Wenn sich das lohnt wird auch dieser komplizierte Prozess gemacht. Die Hydrometallurgie ist meiner Ansicht nach die bessere Alternative.

Frage: Wodurch zeichnet sich ein gutes Recyclingverfahren denn aus?

Antwort: Durch eine hohe Effizienz. Effizienz ist dokumentiert als Output geteilt durch Input, sozusagen der Wirkungsgrad. Welche Mengen der zugeführten (Roh-)Materialien kann ich verwerten? Hier ist die direkte Wiederverwertung von den Materialien im Batterieproduktionsprozess vorzuziehen, weil sie auf einem höheren Wertschöpfungsniveau ist, wie der Downcycling-Ansatz, wo die aufbereiteten Produkte einem anderen Verwendungszweck wie zum Beispiel der Stahlindustrie zugeführt werden. Je mehr Materialien direkt in den Produktionsprozess überführt werden können, desto - meiner Meinung nach - höherwertiger ist der Recyclingprozess.

Ein anderer Punkt sind die Umweltauswirkungen vom Recyclingprozess selbst. Die betrachte ich als unabhängigen anderen Punkt. Stichwort Life-Cycle-Assessment. Also wie ist der Fußabdruck vom Recyclingprozess hinsichtlich zum Beispiel Bodenübersäuerung, Wassernutzung, CO_2-Ausstoß und so weiter.

Frage: Gibt es Probleme beim Recycling und wie hoch sind diese?

Antwort: Ich würde sagen es gibt große Probleme. Es fängt an mit dem Transport und der Verpackung der Batterien. Batterien sind ja in Gefahrgut Klasse 9 klassifiziert. Davon gibt es Ausnahmen, aber spätestens bei beschädigten Batterien bekommt man ein großes Genehmigungs-, Transport- und Verpackungsproblem. Die EU ist dabei dies zu regeln zum Beispiel im ADR 2013 SV 661. Das ist eine Transportrichtlinie für beschädigte Batterien.

Also die Sicherheits- und Optimierungsproblematik fängt bereits sehr früh an. Dadurch, dass es sich um Gefahrgut handelt, ist es relativ kostenintensiv. Durch die hohen Energiemengen, die in der Batterie gespeichert sind, handelt es sich sozusagen um kleine Bomben, das heißt wenn etwas schief läuft, geht es mächtig schief. In den Batterien sind Schwermetalle und giftige Elektrolyte enthalten. Wenn das austritt, besteht ein Risiko in der Rückführung, in der Lagerung, in der Handhabung und so weiter.

Den Recyclingprozess selbst sehe ich ebenfalls so, dass die gefährlichen Inhaltsstoffe kritisch sind, das heißt es muss alles abgesichert werden. Zellen werden eingefroren, unter Inertatmosphäre verarbeitet, unter Wasser verarbeitet nur um die Sicherheit im Recyclingprozess selbst zu erhöhen. Beim Öffnen der Zelle in einer wasserhaltigen Atmosphäre kann es passieren, dass Wasserstoff entsteht, das heißt eine explosionsgefährdete Atmosphäre entsteht. Dann seien hier auch Kurzschlüsse, Staubexplosionen bei der Zerkleinerung genannt. Ein anderer wesentlicher Punkt ist auch, dass es keine standardisierten Stecker gibt, dass es keine standardisierte Informationsbereitstellung vom BMS für den Recycler gibt. Man hat keine Informationen über den SoC oder SoH der Batterie.

Der Recycler weiß auch nicht was mit der Batterie zuvor passiert ist zum Beispiel ob es sicherheitskritische Ereignisse gab, das heißt ist die Batterie verunfallt, ohne dass dies erkennbar ist. Also bekommt der Recycler eine Black-Box angeliefert, von der er nichts weiß. Er kann natürlich die Restladung über die entsprechenden Kontakte abgreifen, aber das ist nicht standardisierbar. Wenn der Stecker defekt ist, hat er keine Ahnung, ob noch Ladung vorhanden ist und was mit der Batterie geschehen ist, das heißt er öffnet etwas Unbekanntes. Er hat auch keine Option herauszufinden, ob die Zelle es wert ist aufgearbeitet zu werden, ob sie nochmal genutzt werden kann für ein Second Life. Es ist ja als Geschäftsmodell denkbar, dass nicht die Automobilhersteller die Aufarbeitung selbst machen, sondern das dies an einen Recycling oder anderen Dienstleister weitergegeben wird.
Etwas ebenfalls Sicherheitskritisches ist, dass die Batterien nie tiefenentladen zum Recycler kommen, das heißt diese haben immer eine gewisse Restspannung auf ihren Zellen und somit durch die Addition, durch Reihen- und Parallelschaltung ist auch eine enorme Energiemenge vorhanden. Problematisch für den Recycler ist, dass das Batteriesystem unter Hochspannung geöffnet werden muss und unter Hochspannung auf Modul oder Zellebene demontiert werden muss. Ein Vorteil wäre es da, wenn ein Schalter bei Batteriesystemen eingebaut wäre, der einen Stromkreis schließen kann, der die Batterie vor der Demontage tiefenentlädt.
Frage: In welche Schritte würden Sie den hydrometallurgischen Prozess aufteilen?
Antwort: Zunächst die Demontage. Die folgende Entladung wird nur teilweise durchgeführt. Wenn die Zellen nicht entladen sind, gibt es andere absichernde Schritte in dem Prozess, welche die Explosionsgefährdung verhindern. Also wenn die Zellen nicht entladen sind, werden andere absichernde Vorbereitungen für das Recycling (Pretreatment of cells) getroffen. Dann folgt die Zerkleinerung.
Eine folgende Elektrolytrückgewinnung wird derzeit aus ökonomischen Gründen nicht durchgeführt. Hier gibt es Forschungsansätze, die derzeit industriell nicht umgesetzt werden.

In ELIBAMA wird die Elektrolytrückgewinnung beispielsweise durchgeführt. Wir verwenden dort aber ein anderes Leitsalz. Normalerweise ist das Lithiumhexafluorophosphat ($LiPF_6$) und dieses ist reaktiv mit Wasser und temperaturinstabil. Wir in ELIBAMA verwenden ein anderes Leitsalz, welches wesentlich temperaturstabiler und stabiler gegenüber Wasser ist. Dieses ist aber auch wesentlich teurer. Als nächster Schritt folgt eine mechanische Trennung durch Magnete, Wirbelströme, durch Siebe und so weiter. Hier gibt es die komplette Bandbreite.
Auf die Aktivmaterialien, auf das Pulver wird dann die Hydrometallurgie angewendet. Das sind üblicherweise Auflösungs- und Fällungsschritte. Üblicherweise endet der Recyclingprozess nach der Hydrometallurgie, nach der Fällung der seltenen Stoffe. Diese sind nicht besonders rein, werden aber in der Form an einen Aktivmaterialhersteller üblicherweise weiterverkauft. Eine Aktivmaterialsynthese dieser Stoffe ist an sich nicht mehr Bestandteil des Recyclingprozesses beim Recycler. Man kann sich jetzt streiten, ob man diesen Schritt als nachgelagerten Recyclingschritt ansieht oder als vorgelagerten Produktionsschritt.
Also wie gesagt die Elektrolytrückgewinnung wird derzeit nicht praktiziert. Diesen Schritt würde ich klammern, bietet aber Potenzial für zukünftige Recyclingprozesse.

Frage: Also bestehen die größten Probleme vor der Demontage und dem Entladen. Standardisierte Zellenformate und ein standardisiertes BMS würde hier helfen?

Antwort: Mit standardisierten Steckern und der Bereitschaft, der Batterieherstellern die Informationen zu ihren Batteriesystemen zu teilen - ja! Bis jetzt gibt es keine Bereitschaft der einzelnen Hersteller Informationen zu teilen.
Potential gibt es aber in allen Schritten. Bei der mechanischen Trennung weniger als in der Hydrometallurgie oder Aktivmaterialsynthese. Der einzige Schritt, den ich einklammern würde, wäre die Zerkleinerung und bei der mechanischen Trennung sehe ich wenig Potenzial.

Bei allen anderen Schritten würde ich sagen, dass es sich lohnt sich das genauer anzuschauen mit dem Schwerpunkt auf den ersten Schritten.

Frage: Wie hoch schätzen Sie das Potenzial qualitativ und quantitativ ein?

Antwort: Dafür müsste ich mich zu weit aus dem Fenster lehnen. Es gibt unterschiedliche Zellchemien. Je nach Wert, der in einer Batterie steckt, ist es attraktiv oder nicht diese möglichst genau zu recyclen.

Frage: Also ist es eine reine Sache des Geldes?

Antwort: Natürlich. Es wird beispielsweise kein Lithium aus den Batterien wiedergewonnen, weil es ökonomisch nicht darstellbar ist.

Frage: Inwieweit kann politisch dafür gesorgt werden, das Recycling zu erhöhen, beispielsweise durch Verpflichtungen und wie wirkt sich das dann kostenmäßig auf den Preis der Zelle aus? Der Preis ist momentan sehr hoch und soll dramatisch reduziert werden, das alles widerspricht sich doch.

Antwort: Da sprechen Sie tatsächlich etwas Kritisches an. Die Politik hat eine Berechnungsvorlage der Recyclingquoten von Recyclingverfahren herausgegeben. Da wird gesagt, dass der Output aus dem Prozess jedes Produkt ist, das verkauft wird. Also die Schlacke für den Straßenbau ist ein Produkt, die Legierung für einen anderen Hersteller ist ein Produkt. Und somit haben sie praktisch den pyrometallurgischen Prozessen den Rücken gestärkt. Die Mindestrecyclingquote ist 50 % für die Batterien und mit dieser Definition schafft man das natürlich pyrometallurgisch leicht.

Frage: Also gibt es politisch keinen Anreiz in ökologisch, nicht ökonomisch sinnvollere Prozesse einzusteigen?

Antwort: Es geht um den Wert, der in einer Zelle enthalten ist. Wären da ein paar Gramm Gold enthalten, könnte man sich sicher sein, dass diese genau recycelt werden würden. Bei den derzeitigen Gerätebatterien ist Kobalt enthalten. Das bezahlt sich. Bei anderen Materialien lohnt es sich, wenn Nickel und Kobalt enthalten sind.

Bei einer Verbindung wie Lithium-Eisenphosphat ($LiFePO_4$) gibt es ein großes Problem, weil sich dann das Recycling nicht mehr auszahlt. Dann muss die Politik aktiv werden und dafür sorgen, dass die auch entsprechend recycelt wird.

Frage: Kann das nicht strategisch sinnvoll sein. Deutschland hat ja zum Beispiel keine Lithium-Vorkommen?

Antwort: Wie gesagt, das Recycling ist Geld dominiert. Lohnt es sich, wird es gemacht. Lohnt es sich nicht wie momentan das Elektrolytrecycling, wie das Lithiumrecycling, wie die Herstellung von Aktivmaterialien in hydrometallurgische Prozesse, dann nicht. Die Herstellung von Aktivmaterialien in hydrometallurgischen Prozessen sind auch relativ kleine Volumen im Vergleich zu pyrometallurgischen Verfahren, die 100.000 Tonnen im Jahr verarbeiten können. Das wird man in einem hydrometallurgischen Prozess ohne riesige Anlagen nicht hinbekommen. Hier sind die Optionen, dass man wirklich die Montage optimiert, dass man die Batteriesysteme modular mit lösbaren Verbindungen aufbaut, wo man auch einfach einzelne Zellen austauschen kann und somit die Lebensdauer von ganzen Batterien verlängert. Zunächst im Auto und dann in einer weiteren Anwendung im Second Life, damit man das etwas entzerrt. Man wird dadurch kein unendliches Batterieleben ermöglichen, irgendwann wird die Batterie zum Recycling kommen, aber das sind so die Optionen, die die Batteriesysteme billiger machen und die Umweltauswirkungen massiv reduzieren. Am Schluss steht dann das Recycling. Hier muss so viel Wert in der Batterie vorhanden sein, dass es sich lohnt diese möglichst genau aufzuarbeiten oder es müssen über Technologieentwicklung entsprechende Prozesse entwickelt werden um das möglichst gut zu machen.

Frage: Sehen Sie Vorteile in dem Prinzip der Intelligenten Zelle für das Recycling?

Antwort: Ich finde, das ist ein sehr guter Ansatz. Heutzutage ist es so, dass das BMS höchstens bis auf Modulebene heruntergeht. Modul bedeutet für einen französischen Hersteller drei Pouch-Zellen. Wenn hier eine Zelle ausfällt ist das Modul nicht aufarbeitbar.

Momentan wird in einem solchen Fall auch die ganze Batterie verschrottet, weil das arbeitstechnisch und vor allem verkabelungstechnisch nicht machbar ist.
Auch ist es essenziell, dass Recyclern und Aufarbeitern über eine standardisierte Schnittstelle Informationen, wie SoC, SoH und besondere Ereignisse, bereitgestellt werden.

Vielen Dank Herr Dörr für das Interview.

Literaturverzeichnis

[BAR11] Barbey, Kay; 2011. *Begleitforschung zum kabellosen Laden von Elektrofahrzeugen: Chancen und Risiken beim kabellosen Laden von Elektrofahrzeugen, Technologiefolgenabschätzung für eine Schlüsseltechnologie in der Durchbruchphase der Elektromobilität: Abschlussbericht zum Verbundvorhaben; Kurztitel: JustPark; im Rahmen des FuE-Programms „Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich Elektromobilität“; Projektlaufzeit: 01.10.2010 - 30.09.2011*.
Magdeburg, Institut für Automation und Kommunikation e.V., Oktober 2011.
DOI 10.2314/GBV:74521570X (06.12.2013)

[BRO10] Bronner, Oscar und Alexandra Föderl-Schmid, 2010.
Massennutzung von Elektroautos hängt von Batterie-Kosten ab.
derStandard.at, 22 Jänner 2010.
http://derstandard.at/1263705745468/Massennutzung-von-Elektroautos-haengt-von-Batterie-Kosten-ab (28.09.2012)

[BHAG13] Bhagwati, Miriam, 2013.
Standardisierung.
In: *Das Wirtschaftslexikon*. Beirut, Lebanon.
http://www.daswirtschaftslexikon.com/d/standardisierung/standardisierung.htm (08.09.2013)

[BERG02] Bergveld, Henk Jan; Kruijt, Wanda S. und Peter H. L. Notten, 2002.
Battery management systems: Design by modelling.
Dordrecht : Kluwer Academic.
ISBN 9781402008320

[BRIX12] Brix, Jonathan; Merdes, Martin; Schäfer, Armin; Wössner, Rolf und Jan Stallkamp, 2012.
Intelligent battery cells for flexible usage of electric vehicles.
In: Hoff, Carsten und Ottmar Sirch Hrsg.
Elektrik/Elektronik in Hybrid- und Elektrofahrzeugen und elektrisches Energiemanagement: 3. Konferenz, 23. und 24.04.2012, Miesbach.
Renningen-Malmsheim : expert verlag, S. 467-474.
ISBN 9783816931140

[BRIX13] Brix, Jonathan und Kai Pfeiffer, 2013.
EP2532041 B1 Elektrischer Energiespeicher.
https://register.epo.org/application?number=EP11706739 (06.12.2013)

[BRAND12] Brand, Martin; Quinger, Daniel; Walder, Georg; Jossen, Andreas und Markus Lienkamp, 2012.
Ageing inhomogeneity of long-term used BEV-batteries and their reusability for 2nd-life applications.
In: *26th Electric Vehicle Symposium 2012*: Proceedings of a meeting held 6-9 May 2012, Los Angeles, California, USA.
New York : Curran.
ISBN 9781622764211

[BROU07] Broussely, Michel und Gianfranco Pistoia Hrsg., 2007.
Industrial applications of batteries: From cars to aerospace and energy storage.
1. Aufl.
Amsterdam u.a. : Elsevier.
ISBN 9780444521606

[BRUE13] Brünglinghaus, Christiane, 2013.
Zukunft der Akkutechnologien: Lithium-Schwefel-Batterien.
Wiesbaden, 22.01.2013,
http://www.springerprofessional.de/zukunft-der-akkutechnologien-lithium-schwefel-batterien/3753616.html
(14.08.2013)

[BUCH13] Buchmann, Isidor, 2013.
How to Store Batteries.
In: *Battery University.*
Richmond, Kanada, 2013.
http://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_store_batteries (10.03.2013)

[BMWI10] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, 2010.
Rohstoffstrategie der Bundesregierung: Sicherung einer nachhaltigen Rohstoffversorgung Deutschlands mit nicht-energetischen mineralischen Rohstoffen.
Berlin, Oktober 2013.
http://www.bmwi.de/Dateien/BMWi/PDF/rohstoffstrategie-der-bundesregierung (17.03.2013)

[BMU11] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2011.
Der Weg zur Energie der Zukunft - sicher, bezahlbar und umweltfreundlich: Eckpunktepapier der Bundesregierung zur Energiewende.
Berlin, 06.06.2011.
http://www.bmu.de/themen/klima-energie/energiewende/beschluesse-und-massnahmen/der-weg-zur-energie-der-zukunft-sicher-bezahlbar-und-umweltfreundlich/ (24.09.2013)

[CHAS12] Chasserot, Marc Hrsg., 2012.
Battery Cell standardisation: Exclusive interview with the German VDA.
In: *CARS21*, Brüssel, Belgien, 13.04.2011.
http://cars21.com/news/view/558 (27.08.2012)

[CHOI02] Choi, Soo S. und Hong S. Lim, 2002.
Factors that affect cycle-life and possible degradation mechanisms of a Li-ion cell based on LiCoO2.
Journal of Power Sources. **111**(1), S. 130-136.
ISSN 03787753
DOI 10.1016/S03787753(02)003051

[CHA06] Chalk, Steven G. und James F. Miller, 2006.
Key challenges and recent progress in batteries, fuel cells, and hydrogen storage for clean energy systems.
Journal of Power Sources. **159**(1), S. 73-80.
ISSN 03787753
DOI 10.1016/j.jpowsour.2006.04.058

[DAI05] Daimler AG Hrsg., 2005.
smart fortwo: Technische Daten.
Stuttgart, 27.09.2005.
http://www.daimler.de/Projects/c2c/channel/documents/1138817_947233technische_daten_gesamt_deutsch.pdf (14.08.2013)

[DAI12] Daimler AG Hrsg., 2012.
Umweltbroschüre smart fortwo electric drive
Stuttgart, 27.09.2012.
http://www.daimler.com/Projects/c2c/channel/documents/2243138_Umweltbrosch__re_smart_fortwo_electric_drive.pdf (14.08.2013)

[EU06] Das europäische Parlament und der Rat der europäischen Union, 2006.
Richtlinie 206/66/EG des europäischen Parlaments und des Rates über Batterien und Akkumulatoren sowie Altbatterien und Altakkumulatoren und zur Aufhebung der Richtlinie 91/157/EWG.
Straßburg, 06.09.2006.
http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:2006L0066:20060926:DE:PDF (17.03.2013)

[DEF12] Deffner, Jutta; Birzle-Harder, Barbara; Hefter, Tomas und Konrad Götz, 2012.
Elektrofahrzeuge in betrieblichen Fahrzeugflotten - Akzeptanz, Attraktivität und Nutzungsverhalten.
In: Institut für sozial-ökologische Forschung (ISOE) GmbH Hrsg.
ISOE-Studientexte. Bd. 17.
Frankfurt am Main : Institut für sozial-ökologische Forschung.
http://www.isoe.de/fileadmin/redaktion/Downloads/Mobilitaet/st-17-isoe-2012.pdf (08.09.2013)

[DOE11] Department of Energy, 2011.
One Million Electric Vehicles By 2015: February 2011 Status Report.
Washington, 18.02.2011.
http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/1_million_electric_vehicles_rpt.pdf (04.04.2013)

[BR09] Die Bundesregierung, 2009.
Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung.
Berlin, 12.08.2009.
http://www.bmbf.de/pubRD/nationaler_entwicklungsplan_elektromobilitaet.pdf (28.09.2012)

[DIN10] Dinger, Andreas; Martin, Ripley; Mosquet, Xavier; Rabl, Maximilian; Rizoulis, Dimitrios; Russo, Massimo und Georg Sticher, 2010.
Batteries for Electric Cars: Challenges, Opportunities, and the Outlook to 2020.
München : The Boston Consulting Group.
http://www.bcg.com/documents/file36615.pdf (28.09.2012)

[DOR13] Dörr, Marcus Andreas, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung, Nobelstr. 12, Stuttgart, 2013.
Experteninterview zum Recycling von Lithium-Ionen-Batterien.
Stuttgart, 26.08.2013, 13:00 Uhr.

[EE12] Element Energy Limited, 2012.
Cost and performance of EV batteries: Final report for the Comittee on Climate Change.
Cambridge, 21.03.2012.
http://www.element-energy.co.uk/wordpress/wp-content/uploads/2012/04/CCC-battery-cost_-Element-Energy-report_March2012_Public.pdf (28.09.2012)

[FAZ13] Frankfurter Allgemeine, 2013.
Merkel hält an Absatzziel fest: Eine Million Elektroautos bis 2020.
Frankfurt am Main, 27.05.2013.
http://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/wirtschaftspolitik/eine-million-elektroautos-bis-2020-merkel-haelt-an-absatzziel-fest-12196498.html (07.07.2013)

[GER94] Gerdsen, Peter, 1994.
Kommunikationssysteme 1: Theorie, Entwurf, Messtechnik.
1. Aufl.
Berlin u.a.: Springer.
ISBN 9783540570042

[GUT12] Gutsch, Andreas, 2012.
Strategische Ausrichtung von F+E in Baden-Württemberg und Deutschland - Stand und Ausblick.
In: *Wirtschaftsförderung Stuttgart 2012*, Competence e. Stuttgart, 24.05.2012.
http://www.bba-bw.de/files/vortrag_kit_120524.pdf (16.03.2013)

[HUF06] Hufschmid, Markus, 2006.
Information und Kommunikation: Grundlagen und Verfahren der Informationsübertragung.
Wiesbaden : B.G. Teubner.
1. Aufl.
ISBN 9783835101227

[CAO08] Jian, Cao; Schofield, Nigel und Ali Emadi, 2008.
Battery balancing methods: A comprehensive review.
In: *Vehicle Power and Propulsion Conference 2008*, S. 1-6.
http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4677669 (01.10.2013)
DOI 10.1109/VPPC.2008.4677669

[JUA10] Juang, Larry W., 2010.
Online Battery Monitoring for State-of-Charge and Power Capability Prediction.
Madison, Univ. of Wisconsin, Master-Thesis, 2010.
http://minds.wisconsin.edu/bitstream/1793/48298/1/Master_LarryWJuang.pdf (21.08.2013)

[JUNG10] Jung, Max, 2010.
Ladezustandsbestimmung bei Lithium-Ionen-Batterien.
In: *Design & Elektronik Entwicklerforum*, 24.02.2010, München.
http://www.embedded-world.eu/fileadmin/user_upload/pdf/batterie/Jung._Fraunhofer.pdf (28.12.2012)

[JOS06] Jossen, Andreas und Wolfgang Weydanz, 2006.
Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen.
1. Aufl.
Untermeitingen : Reichardt.
ISBN 9783939359111

[PUD12] Katrin Pudenz, 2012.
Neues Kühlmittel hält Batterien von Elektroautos frisch.
Wiesbaden, 04.07.2012.
http://www.springerprofessional.de/neues-kuehlmittel-haelt-batterien-von-elektroautos-frisch-16232/3953090.html (03.04.2013)

[KIST06] Kistner, Timo und Klaus Dostert, 2006.
EMC aspects of power line communications.
In: *XXVIIIth General Assembly of International Union Radio Science (URSI) Proceedings 2005*, Neu Delhi, Indien, 23-29 October 2005.
http://www.ursi.org/Proceedings/ProcGA05/pdf/E06.3%20%280209%29.pdf (01.10.2013)

[KAL07] Kalhammer, Fritz R.; Kopf, Bruce M.; Swan, David H.; Roan, Vernon P. und Michael P. Walsh, 2007.
Status and Prospects for Zero Emissions Vehicle Technology, Report of the ARB Independent Expert Panel, Prepared for State of California Air Resources Board.
Sacramento, California, 2007.
http://www.arb.ca.gov/msprog/zevprog/zevreview/zev_panel_report.pdf (16.03.2013)

[KLE12] Kleine-Möllhoff, Peter; Benad, Holger; Beilard, Frank; Esmail, Mohammed und Martina Knöll, April 2012.
Die Batterie als Schlüsseltechnologie für die Elektromobilität der Zukunft Herausforderungen - Potenziale - Ausblick.
In: Rennhak, Carsten und Gerd Nufer, Hrsg.: *Reutlinger Diskussionsbeiträge zu Marketing & Management*, Bd. 2012-3, S.1-67.
ESB Business School, Hochschule Reutlingen.
http://hdl.handle.net/10419/57925 (09.03.2013)
URN urn:nbn:de:bsz:21-opus-60114
ISSN 1863-0316

[KUP07] Kupris, Gerald und Axel Sikora, 2007.
ZigBee: Datenfunk mit IEEE 802.15.4 und ZigBee.
In: *Elektronik und Elektrotechnik Bibliothek*, Bd. 4.
1. Aufl.
Poing : Franzis.
ISBN 3772341594

[KIL11] Kilimann, Susanne und Marcel Sommer, 2011.
Autotechnik: Warten auf die günstigen Akkus.
In: *ZEIT online*, Hamburg, 02.11.2011.
http://www.zeit.de/auto/2011-11/elektroauto-batterien-preis (28.09.2012)

[KUT99] Kutkut, N. H.; Wiegman, H. L. N.; Divan, D. M. und D. W. Novotny, 1999.
Design considerations for charge equalization of an electric vehicle battery system.
IEEE Transactions on Industry Applications, **35**(1), S. 28-35.
DOI 10.1109/28.740842
ISSN 0093-9994

[LEE06] Lee, Yuang-Shung und Guo-Tian Cheng, 2006.
Quasi-Resonant Zero-Current-Switching Bidirectional Converter for Battery Equalization Applications.
IEEE Transactions on Power Electronics, **21**(5), S. 1213-1224.
DOI 10.1109/TPEL.2006.880349
ISSN 0885-8993

[LUK08] Lukic, Srdjan M.; Jian, Cao; Bansal, Ramesh C.; Rodriguez, Fernando und Ali Emadi, 2008.
Energy Storage Systems for Automotive Applications.
IEEE Transactions on Industrial Electronics, **55**(6), S. 2258-2267.
DOI 10.1109/TIE.2008.918390
ISSN 0278-0046

[LOCH11] Locher, Jens, 2011.
Auslegung eines Prüfstandes zum automatisierten Laden und Entladen eines Akkumulators.
Stuttgart, Univ., Studienarbeit, 2011.

[ENVIA12] Envia Systems Inc., 2012.
Yes, the world record energy density of 400Wh/kg in Li-ion rechargeable batteries has been achieved by Envia.
Newark, CA, 27.02.2012. http://enviasystems.com/announcement/ (28.09.2012)

[BMU09] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2009.
Programm zur Marktaktivierung für Elektrofahrzeuge - 100 Stück bis Ende 2014.
Berlin, 16.09.2009.
http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/marktaktivierung_elektroauto_hintergrund_bf.pdf
(28.09.2012)

[MCK06] McKenna, David, 2006.
What good is an automobile without its battery?
In: *EE Times*, New York, 04.12.2006.
http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1272341
(21.08.2013)

[MOO03] Moo, C. S.; Hsieh, Y. C. und I. S. Tsai, 2003.
Charge equalization for series-connected batteries.
IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, **39**(2), S. 704-710.
DOI 10.1109/TAES.2003.1207276
ISSN 0018-9251

[MO13] Mörtel, Reinhard, Fraunhofer-Institut für Siliziumtechnologie, Fraunhoferstraße 1, Itzehoe, 2013.
Experteninterview zur Produktion von Lithium-Ionen-Batterien Stuttgart, 26.08.2013, 13:00 Uhr.

[MOO01] Moore, Stephen W. und Peter J. Schneider, 2001.
A Review of Cell Equalization Methods for Lithium Ion and Lithium Polymer Battery Systems.
SAE technical Paper Seies, Bd. 2001-01-0959.
http://am.delphi.com/pdf/techpapers/2001-01-0959.pdf (02.01.2013)
ISSN 0148-7191

[NOW13] Nowacki, Christoph, 2013.
Quasi.Bat - Qualitätssicherung in der Produktion von Lithium-Ionen-Batterien für Elektromobilitätsanwendungen.
In: *Brennstoffzellen-Allianz 2013*, 6. Workshop AiF, 24. April 2013, Duisburg.
http://www.zbt-duisburg.de/fileadmin/user_upload/01-aktuell/06-veranstaltungen/Allianz2013/07-QuasiBat_Brennstoffzellenallianz_2013_v02_nwc.pdf (06.12.2013)

[NIS00] Nishijima, K.; Sakamoto, H. und K. Harada, 2003.
A PWM controlled simple and high performance battery balancing system.
31st Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference 2000, Bd. 1, S. 517-520.
DOI 10.1109/PESC.2000.878916
ISBN 0780356926

[ONG11] Ong, Shyue Ping, 2011.
First Principles Design and Investigation of Lithium-Ion Battery Cathodes and Electrolytes.
Cambridge, Univ. of Massachusetts, Diss., 2011.
http://shyue.net/publications/phdthesis.pdf (29.12.2013)

[PARS12] Parspour, Nejila, 2012.
Speicher für elektrische Energie I.
Vorlesung Wintersemester 2012/2013.
Universität Stuttgart, Institut für Elektrische Energiewandlung

[PIST09] Pistoia, Gianfranco, 2009.
Battery operated devices and systems: From portable electronics to industrial products.
1. Aufl.
Heidelberg : Elsevier.
ISBN 9780444532145

[PRO02] Proebster, Walter E., 2002.
Rechnernetze: Technik, Protokolle, Systeme, Anwendungen.
2. Aufl.
München : Oldenbourg.
ISBN 3486257773

[REE93] Reese, Joachim, 1993.
Standardisierung, Typisierung, Normung.
In: Wittmann, Waldemar und Kern, Werner Hrsg.: *Enzyklopädie der Betriebswirtschaftslehre*, Bd. 1, S. 3940-3949.
5. Aufl.
Stuttgart : Poeschel.
ISBN 9783791080338

[SCH11] Schlick, Thomas; Hertel, Guido; Hagemann, Bernhard; Maiser, Eric und Michael Kramer, 2011.
Chancen und Herausforderungen für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau.
Studie, Roland Berger, Amsterdam u.a., 09.05.2011.
http://www.rolandberger.com/media/pdf/Roland_Berger_Zukunftsfeld_Elektromobilitaet_rev_20110509.pdf
(16.03.2013)

[SMO09] Smole, Erwin, 2009.
Abschlussbericht e-connected.
e-connected: Initiative für Elektromobilität und Nachhaltige Energieversorgung.
Klima- und Energiefonds, Wien, 21.11.2009.
http://www.e-connected.at/userfiles/Abschlussbericht_e-connected.pdf (10.03.2013)

[SPA11] Spath, Dieter, 2011.
Elektromobilität: Potenziale und Perspektiven.
In: *5. ÖPNV-Innovationskongress*, 22.-24. Februar 2011, Freiburg.
http://innovationskongress-bw.de/wp-content/uploads/2012/12/1.-Vortrag_Prof.-Dr.-Dieter-Spath.pdf (26.06.2013)

[SHI01] Shibata, H.; Taniguchi, S.; Adachi, K.; Yamasaki, K.; Ariyoshi, G.; Kawata, K.; Nishijima, K. und K. Harada, 2001.
Management of serially-connected battery system using multiple switches.
In: *4th IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, Bd. 2, S. 508-511.
DOI 10.1109/PEDS.2001.975369

[STE12] Steinbild, Martin, 2012.
LITHOREC II: Recycling von Lithium-Ionen-Batterien.
Flyer.
http://www.pt-elektromobilitaet.de/projekte/foerderung-von-vorhaben-im-bereich-der-elektromobilitaet-ab-2012/forschung-und-entwicklung-zum-thema-batterierecycling/dateien-pressematerial-etc/flyer-lithorec_ii.pdf (17.03.2013)

[MOS11] Mosquet, Xavier; Devineni, Mythili; Mezger, Tobias; Zablit, Hadi; Dinger, Andreas; Sticher, Georg; Gerrits, Marco und Massimo Russo, 2011.
Powering Autos to 2020: The Era of the electric Car?
The Boston Consulting Group, Boston, Juli 2011.
http://www.bcg.com/documents/file80920.pdf (28.09.2012)

[TRE12] Tremme, Katrin, 2012.
Globale Erwärmung und Treibhauseffekt? Ursachen und Folgen.
Fachverband Medienproduktioner e.V., Zell/Mosel, 21.03.2012.
http://blog.mediamundo.biz/globale-erwarmung-und-treibhauseffekt-ursachen-und-folgen/ (06.09.2013)

[VEZ09] Vezzini, Andrea, 2009.
Lithiumionen-Batterien als Speicher für Elektrofahrzeuge.
Bulletin SEV/AES. **2009**(3), S. 19-23.
ISSN 14207028

[VET05] Vetter, J.; Novak, P.; Wagner, M. R.; Veit, C.; Möller, K.-C.; Besenhard, J. O.; Winter, M.; Wohlfahrt-Mehrens, M.; Vogler, C. und A. Hammouche, 2005.
Ageing mechanisms in lithium-ion batteries.
Journal of Power Sources, **147**(1-2), S. 269-281.
ISSN 03787753
DOI 10.1016/j.jpowsour.2005.01.006

[VERL10] Verl, Alexander; Schmitz, Stefan und Karl-Heinz Wurst, 2010.
Zwei Drähte braucht man immer!
wt Werkstattstechnik online, **100**(1/2), S. 112-118.
ISSN 14364980
http://www.werkstattstechnik.de/wt/article.php?data[article_id]=52625 (06.10.2013)

[WALL11] Wallentowitz, Henning, 2011.
Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges: Technologien Märkte und Implikationen.
2. Aufl.
Wiesbaden : Vieweg + Teubner.
ISBN 9783834899101

[WIE99] Wiegman, Herman L. N., 1999.
Battery state estimation and control for power buffering applications.
Madison, Univ. of Wisconsin, Diss., 1999.
http://mysite.verizon.net/hwiegman/pdf/thesis.pdf
(07.09.2013)

Traktionsbatterien bestimmen durch ihre hohen Kosten den Verkaufspreis von Elektrofahrzeugen und tragen dadurch zu geringer Marktakzeptanz dieser bei. Eine Traktionsbatterie besteht nicht nur aus dem Energiespeicher selbst, sondern unter anderem auch aus einer Überwachungseinrichtung – dem Batteriemanagementsystem (BMS). Das BMS soll einen fehlerfreien und sicheren Betrieb der Komponente Batterie sicherstellen. Da BMS individuell für jedes Fahrzeug entwickelt werden, ist es Ziel der vorliegenden Arbeit, einen Ansatz zu finden, BMS einheitlich zu gestalten und somit eine Möglichkeit zu schaffen, die Kosten der Batterie zu senken.

ISBN 978-3-8396-0909-5

9 783839 609095

FRAUNHOFER VERLAG