Strukturen von Batterie- und Energiemanagementsystemen mit Bleibatterien und Ultracaps

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Detlef Heinemann
aus Berlin

Von der
Fakultät IV - Elektrotechnik und Informatik
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften

Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Clemens Gühmann, TU Berlin
Berichter: Prof. Dr.-Ing. Dietrich Naunin, TU Berlin
Berichter: Prof. Dr.-Ing. Rolf Hanitsch, TU Berlin

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 10. Juli 2006

Berlin 2007

D83

Strukturen von Batterie- und Energiemanagementsystemen mit Bleibatterien und Ultracaps

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Detlef Heinemann
aus Berlin

Von der
Fakultät IV - Elektrotechnik und Informatik
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften

Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Clemens Gühmann, TU Berlin
Berichter: Prof. Dr.-Ing. Dietrich Naunin, TU Berlin
Berichter: Prof. Dr.-Ing. Rolf Hanitsch, TU Berlin

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 10. Juli 2006

Berlin 2007

D83

Das LEBEN geht weiter

für Dietrich und Jutta

sie sind viel zu früh von uns gegangen

Danksagung

Ich möchte mich bei allen Personen bedanken, die mir durch ihre Unterstützung bei der Anfertigung dieser Arbeit geholfen haben. Mein besonderer Dank gilt meiner Familie, die mich immer begleitet und unterstützt hat.

Ebenso danke ich den Studien- und Diplomarbeitern, deren Mitarbeit mir eine wertvolle Hilfe war. Den Mitarbeitern am ehemaligen Institut für Elektronik und Lichttechnik danke ich für die Zusammenarbeit und die schöne Zeit. Danke auch an Frau Kessel für ihre immer lieben Worte und die moralische Unterstützung. Bei Siemens gilt mein Dank Wilfrid Lammers, der mir das Ghost-Lab ermöglichte und mir so viele Freiheiten einräumte, Herrn Luchterhand für die Unterstützung und Gregor Petsch für unsere manchmal richtig tolle Zusammenarbeit.

Ganz besonders danke ich Prof. Dr.-Ing. Dietrich Naunin für die Betreuung meiner Arbeit während meiner Dienstzeit an der Technischen Universität Berlin und auch danach. Er hat diese Arbeit erst ermöglicht, immer mit Engagement getrieben und bis zuletzt unterstützt. Vielen Dank für die vielen schönen persönlichen Momente, die Offenheit, die Ehrlichkeit und die Warmherzigkeit. Er war ein toller Mensch, ist leider viel zu früh verstorben. Ich hätte ihm so gerne noch ein Exemplar persönlich übergeben.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Rolf Hanitsch danke ich für die Übernahme des Korreferats und das der Arbeit entgegengebrachte Vertrauen.

Schließlich danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Clemens Gühmann für die Übernahme des Vorsitzes des Promotionsausschusses.

Titel: Strukturen von Batterie- und Energiemanagementsystemen mit Bleibatterien und Ultracaps

1 Einleitung 1

2 Elektrochemische Energiespeicher 4

2.1 Charakterisierung von Batteriesystemen 4
2.1.1 Kenndaten von Batteriesystemen 4
2.1.2 Definitionen von batteriierelevanten Kenngrößen 6

2.2 Batteriesysteme 8
2.2.1 Blei-Batteriesysteme 9
2.2.2 NiCd-Batterien 19
2.2.3 NiMH-Batterien 22
2.2.4 Li-Ion-Batterien 27
2.2.5 NaNiCl-Batterie 28
2.2.6 Ultracaps 30

3 Allgemeine Anforderungen an Batteriemanagementsysteme und deren Strukturen 34

3.1 Anforderungen an Batteriemanagementsysteme 34
3.1.1 Allgemeine Anforderungen 34
3.1.2 Überwachung von Ladung und Entladung 38
3.1.3 Ladeverfahren für Traktionsbatterien 40
3.1.4 Entladeverhalten 51
3.1.5 Ladezustandsbestimmung 56
3.1.6 Batterietemperierung, thermisches Management 57
3.1.7 Ladungsausgleich 62
3.1.8 Diagnose 64

3.2 Anwendungsgebiete für Batteriemanagementsysteme 67
3.2.1 Traktion 67
3.2.2 Hybridfahrzeug 71
3.2.3 Bordnetz 73
3.2.4 Photovoltaik als stand-alone Lösung 76
3.2.5 Portable Geräte 78

3.3 Strukturen von Batteriemanagementsystemen für unterschiedliche Batteriesysteme am Beispiel von Traktionsanwendungen in ESF 81
3.3.1 Grundlegende Struktur von Batteriemanagementsystemen 81
3.3.2 Blei-Gel-Batteriesystem 83
3.3.3 NiMH-Batteriesystem 85

3.3.4 Li-Ion-Batteriesystem 86
3.3.5 NaNiCl-Batteriesystem 88
3.3.6 Ultracaps 90

4 Ladezustandsbestimmung als Funktion von Batterie-managementsystemen für Blei-Gel-Batterien im Traktionsbetrieb 93

4.1 Problematik 93

4.2 Traditionelle Verfahren der Ladezustandsbestimmung 94
4.2.1 Ladungsbilanzierung 95
4.2.2 Ruhespannungsbestimmung 96
4.2.3 Impedanzspektroskopie 99

4.3 Modellierung des Batterieverhaltens 99
4.3.1 Anforderungen an Batteriemodelle 100
4.3.2 Bekannte Modellierungsansätze 100
4.3.3 Modellansatz zur Beschreibung einer 6V 160Ah Blei-Gel-Batterie 104

4.4 Fuzzy Methoden zur Ladezustandsbestimmung 115
4.4.1 erforderliche Wissensbasis 116
4.4.2 Umsetzung 116

5 Realisierungen von Batteriemanagementsystemen für Blei-Gel Batterien 119

5.1 Batteriemanagementsystem für VW Golf CitySTROMer A2 119
5.1.1 Grundprinzip des Fahrzeugs 119
5.1.2 Funktionsprinzip 121
5.1.3 Systemstruktur 122
5.1.4 Hardwarekomponenten Batteriemanagementsystem für VW Golf CitySTROMer A2 123

5.2 Batteriemanagementsystem für CITYCOM cityEL 130
5.2.1 Struktur BMS cityEL 130
5.2.2 Hardwarekomponenten 131

6 Realisierung eines Energiemanagementsystems für einen hybriden Energiespeicher aus Batterie und Ultracaps zum power-assist 142

6.1 Implementierung eines power-assist Leistungsspeichers 143
6.1.1 Einsatzgebiete Ultracap im cityEL 143
6.1.2 Systemanalyse LEV cityEL 144
6.1.3 Betriebsverhalten der Ultracaps 146

6.2 Betriebsstrategien des hybriden Energiemanagements 150

6.3 Systemauslegung 153

6.4 Hardwarekomponenten 161

6.5 Ergebnisse im Betrieb 163

7 Zusammenfassung 169

8 Literaturverzeichnis 172

9 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis 179

1 Einleitung

Mobilität ist eine der Kernforderungen, die momentan innerhalb der Gesellschaft an das Individuum gestellt werden. Diese Mobilität wird im Arbeitsleben gefordert, zum Beispiel in dem Wunsch den Arbeitnehmer dort einzusetzen, wo seine Arbeitskraft gerade gefordert ist. Daraus hat sich die Forderung abgeleitet, dass auch die benötigten Arbeitsmittel wie der PC diesen Mobilitätsanforderungen genügen müssen. Die Entwicklung der Notebooks trägt dieser Forderung Rechnung. Die Entwicklung der Mobiltelefone ist ebenso rasant vorangeschritten. Über ein Mobiltelefon ist neben dem normalen Telefongespräch eine Verbindung ins Internet möglich. Damit erreicht man im Prinzip die weltweite Verfügbarkeit von Informationen auch im mobilen Einsatz.

Mobilitätseinschränkungen, vor 10 Jahren noch völlig normal, werden heute nicht mehr toleriert. Einschränkungen in der Verfügbarkeit der genannten Anwendungen werden heute in erster Linie durch die Beschränkung der Energieversorgung der Geräte hervorgerufen. Auf der einen Seite müssen die Geräte immer kleiner und leichter werden, auf der anderen Seite werden immer längere Laufzeiten im Batteriebetrieb gefordert. Die Batteriehersteller haben in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte in den Batterietechnologien erreichen können. Die Energiedichte, wie auch die Leistungsdichte, der einzelnen Batteriesysteme werden permanent gesteigert. Der mobile Energiespeicher Batterie verursacht einen großen Teil der entstehenden Systemkosten. Das Alterungsverhalten ist oftmals noch nicht befriedigend. Hinzu kommen Sicherheitsprobleme, da die Batterien mit ihren hohen Energiedichten auf Überladungen sehr sensibel reagieren.

Ein weiteres Feld der Mobilität ist der Straßenverkehr. Mit zunehmendem Wohlstand stieg in Deutschland die Anzahl der zugelassenen PKW. Während im schienengebundenen Nah- und Fernverkehr elektrisch betriebene Schienenfahrzeuge die Regel sind, findet man im PKW vornehmlich Benzin- und Dieselmotoren vor. Die steigenden Fahrzeugbestände innerhalb aller Industrienationen führen vornehmlich in den Ballungsgebieten zu hohen Belastungen der Luft mit Schadstoffen wie CO, CO_2, NO_X, Benzol und Ruß. Insbesondere in den Sommermonaten führen diese Belastungen zur Ozonbildung und zum Smog. Das gestiegene Umweltbewusstsein der Bevölkerung führte Anfang der Neunziger Jahre zu der Forderung nach umweltfreundlicheren und ressourcenschonenderen Fahrzeugkonzepten. Elektrofahrzeuge wurden als ein am Einsatzort lokal emissionsfreies Fahrzeug identifiziert und von den Fahrzeugherstellern erforscht. Die Fahrzeuge wurden als Konversionsfahrzeuge entwickelt. Das bedeutet, dass bestehende Fahrzeuge anstelle eines Verbrennungsmotors einen elektrischen Antrieb mit einer Batterie als Energiespeicher erhalten haben. Insbesondere die sichere Montage der Batterie und das erheblich gestiegene Fahrzeuggewicht verursachten konstruktive Probleme.

Parallel zu diesen Entwicklungen wurden rasante Fortschritte in der Diesel-Technologie im Rahmen der Direkteinspritzung erzielt. Diese resultierten in einer dramatischen Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs bei einer deutlichen Verbesserung der Fahrdynamik der Fahrzeuge. Die batteriebetriebenen Elektrofahrzeuge konnten dagegen nur mäßige Fahrleistungen bei einer gegenüber dem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor drastisch verkürzten Reichweite aufweisen. Die Batterielebensdauer war deutlich zu kurz, die Kosten entsprechend zu hoch.

Die Konzepte rein batteriebetriebener Elektrofahrzeuge konnten sich dadurch niemals wirklich durchsetzen. Schwachpunkt im System war immer die Batterie. Zudem wurden damals vornehmlich Blei- oder NiCd-Batterien eingesetzt, die beide nicht umweltfreundlich entsorgbar sind. Die Batteriehersteller forschten an neuen Systemen wie NiMH, NaNiCl oder Lithium-Ion. Allen gemein war eine deutlich erhöhte Energie- und Leistungsdichte gegenüber dem Bleisystem. Die Kosten sind bis heute deutlich über denen der verschlossenen Bleibatterie. Alltagstaugliche Elektrofahrzeuge wurden nicht produziert, die Kosten, die Lebendauer und Sicherheitsproblematiken verhindern das bis heute.

Die Endlichkeit der fossilen Brennstoffe und die unklare politische Lage in einigen Förderländern haben die Forschungsaktivitäten im Bereich der alternativen Antriebe beschleunigt. Die kalifornische Umweltgesetzgebung fordert neben Niedrigstemissions-fahrzeugen auch einen prozentualen Anteil von Nullemissionsfahrzeugen. Dabei bieten sich batteriebetriebene Elektrofahrzeuge an, da einzig sie am Einsatzort sowohl emissionsfrei als auch geräuscharm verkehren können. Die Energie zur Wiederaufladung der Batterien stellen Kraftwerke zur Verfügung. Dabei ist natürlich im deutschen Kraftwerksmix wieder ein Anteil fossiler Energieträger in der Energieerzeugung enthalten.

Die Brennstoffzellenfahrzeuge von DaimlerChrysler erzeugten um die Jahrtausendwende erhebliches Aufsehen. Extreme Fortschritte in der Minimierung der Baugröße ließen eine schnelle Serienfertigung möglich erscheinen. Prinzipiell kann ein Brennstoffzellenfahrzeug ohne CO_2 Ausstoß betrieben werden. Um die Tankstelleninfrastruktur zu nutzen und keine Speicher von Flüssigwasserstoff im Fahrzeug zu haben, wird der benötigte Wasserstoff aus Methanol über einen Reformer gewonnen. Dabei entsteht dann wieder CO_2. Die Brennstoffzelle kann die hohen dynamischen Lastprofile im Automobil nur eingeschränkt ermöglichen. Deshalb gibt es Untersuchungen zur Hybridisierung des Speichers durch eine Implementierung von Doppelschichtkondensatoren, den Ultracaps. Diese weisen eine hohe Leistungsdichte bei sehr niedriger Energiedichte auf. Energiemanagementsysteme müssen nun im Fahrzeug die Lastanforderungen des Antriebs bestimmen und über ein geschicktes Lastmanagement die benötigte Energie bereitstellen.

Im verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeug ist ebenfalls eine Hybridisierung feststellbar. Prinzipiell sollen die eingesetzten elektrischen Antriebe helfen die Emissionswerte weiter zu senken. Konzepte sehen den Start/Stop-Betrieb des Motors vor, den power-assist, rein elektrisches Fahren ohne Emissionen oder auch die Vermeidung des Teillastbereiches. Auch in diesen Konzeptionen wird ein Energiemanagementsystem die Energieflüsse im Fahrzeug steuern. Hybridfahrzeuge nutzen Batterien oder Ultracaps zur Speicherung der elektrischen Energie. Die eingangs genannten mobilen Geräte haben in der Regel Batterien, die aus einer oder wenigen Zellen bestehen. Im Automobil bestehen Batterien aus vielen Zellen oder Modulen. Beim Toyota Prius hat die Batterie zum Beispiel eine Nennspannung von 201,6 V bei 168 in Reihe geschalteten Zellen. Der Betrieb kann in einem weiten Temperaturbereich erfolgen. Das stellt erhebliche Anforderungen an das Batteriemanagementsystem.

Alle genannten Applikationen stellen sehr hohe Anforderungen an die Kosten und die Lebensdauer der elektrischen Energiespeicher. Die Energiespeicher müssen während der Ladung und während der Entladung auf die Einhaltung ihrer zulässigen Betriebsbereiche überwacht werden.

Jede Applikation weist andere Lastprofile für die Batterie auf. Diese Lastprofile müssen identifiziert werden. Anhand der Applikation und der möglichen Lastprofile muss dann der passende Energiespeicher oder die passende Kombination von Energiespeichern bestimmt werden. Die Einhaltung der zulässigen Betriebsbereiche wird von einem Batteriemanagement-system überwacht.

Batteriemanagementsysteme zur Überwachung und Betriebsführung von Batterien ermöglichen einen schonenderen Batteriebetrieb, da Überladungen oder Tiefentladungen wirkungsvoll verhindert werden können. Die thermische Betriebsführung der Batterie ist ebenfalls eine Teilaufgabe des Batteriemanagementsystems. Moderne Batterien in Fahrzeugen bestehen aus mehreren Modulen, die wiederum aus mehreren Zellen bestehen. Im Prinzip muss jede einzelne Batteriezelle überwacht werden. In der Praxis muss dabei ein Kompromiss aus Kosten, Aufwand und Nutzen gefunden werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Messungen an unterschiedlichen Bleibatterien, unterschiedlichen NiMH Batterien und Ultracaps durchgeführt. Alle untersuchten Energiespeicher sind für Automobilanwendungen vorgesehen. Die Auswertung der Messungen hat deutlich gemacht, dass jedes Batteriesystem andere Anforderungen an das Batterie-managementsystem stellt. Aber auch innerhalb eines Batteriesystems weisen unterschiedliche Batteriemodule ein unterschiedliches Betriebsverhalten auf und fordern deswegen ein adaptiertes Batteriemanagementsystem.

Die Anforderungen und Strukturen von Batteriemanagementsystemen werden nach Batteriesystemen und Applikationen beschrieben. Dafür ist eine Kenntnis der einsetzbaren Batteriesysteme erforderlich.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei Batteriemanagementsysteme entwickelt. Das zweite System wurde durch die Implementierung eines Ultracaps hybridisiert. Alle elektronischen Komponenten für das notwendige Energiemanagementsystem wurden an der TU Berlin entwickelt. Der Hauptversuchsträger ist ein rein batterieelektrisch betriebenes Fahrzeug vom Typ CITYCOM cityEL. Umfangreiche Testfahrten im Sommer- wie im Winterbetrieb zeigen die Möglichkeiten und die Grenzen der entwickelten Strategien auf.

Die Ergebnisse dieser Arbeit lassen sich im Prinzip auch auf andere Batterie-Applikationen übertragen. Die entwickelten Batteriemanagementsysteme können zum Beispiel zum Betrieb in Photovoltaikanlagen oder im Kfz-Bordnetz adaptiert werden. Deswegen erfolgt eine Beschreibung des Batteriemanagements für diese Applikationen in dieser Arbeit.

Betrachtet man die eingangs angesprochenen Mobilitätsanforderungen an Kraftfahrzeuge, so entspricht das genutzte Fahrzeug nicht der Norm. Es bietet sich jedoch aufgrund des einfachen Aufbaus als Versuchsträger an und erfüllt alle Anforderungen an ein Stadtmobil. Das Batteriemanagementsystem ist seit 5 Jahren im Fahrzeug installiert, das Energie-managementsystem seit 4 Jahren. Mit dem Energiemanagementsystem wurde der aktuelle Batteriesatz in das Fahrzeug integriert. Es ist schwierig aus einem einzigen Prototypenfahrzeug allgemeingültige Aussagen zu Lebensdauerverlängerungen zu treffen, die erforschten Ansätze aus über 6000 km Fahrleistung bestätigen aber durchaus die Überlegungen und Ansätze.

2 Elektrochemische Energiespeicher

In einem elektrochemischen Energiespeicher wird beim Aufladen die zugeführte elektrische Energie in chemische Energie umgewandelt. Wird an den elektrochemischen Energiespeicher ein Verbraucher angeschlossen, so wird die chemische Energie wieder in elektrische Energie zurückgewandelt. Man unterscheidet zwischen wiederaufladbaren und nicht wiederaufladbaren Energiespeichern. Nicht wiederaufladbare elektrochemische Energiespeicher werden als Primärbatterien, wiederaufladbare als Sekundärbatterien bezeichnet. Letztere werden auch als Akkumulatoren bezeichnet. Wenn in den folgenden Abschnitten das Wort ‘Batterie’ benutzt wird, so sind immer Sekundärbatterien gemeint.

Um möglichst hohe Lebensdauern von Batterien zu erhalten, ist es notwendig, dass die elektrochemischen Abläufe so gestaltet sind, dass schädigende Betriebsbereiche vermieden werden. Dafür ist eine genaue Kenntnis über das eingesetzte Batteriesystem notwendig.

In diesem Abschnitt sollen die für Elektrotraktion relevanten Batteriesysteme charakterisiert werden. Je nach der Relevanz für diese Arbeit nimmt diese Charakterisierung für das jeweilige Batteriesystem einen unterschiedlichen Raum ein.

2.1 Charakterisierung von Batteriesystemen

An dieser Stelle werden charakteristische Größen definiert, die für alle genannten Batteriesysteme genutzt werden. Es erfolgt eine Differenzierung in physikalische Größen die den Systemen zu eigen sind, und solche, die zur besseren Vergleichbarkeit definiert wurden.

2.1.1 Kenndaten von Batteriesystemen

Der Gewichtsanteil des Energiespeichers ‘Batterie’ eines reinen Elektrofahrzeuges liegt im Gegensatz zum Energiespeicher ‘Tank’ eines Fahrzeuges mit Verbrennungsmoter bei ca. 30% des Fahrzeuggewichts. Das Batteriegewicht ist demnach nicht vernachlässigbar, da es die Fahreigenschaften des Fahrzeuges einschränkt. Batteriesysteme werden deshalb nicht nur nach ihren absoluten elektrischen Größen, sondern massebezogen bewertet. Tabelle 2.1 enthält Angaben über die Energiedichte und die Leistungsdichte. Setzt man diese beiden Größen miteinander ins Verhältnis, so erhält man das in **Abb. 2.1** gezeigte Ragone-Diagramm. Dieses verdeutlicht, dass die entnehmbare Energie einer Batterie abhängig von der Leistungsentnahme ist. Je steiler hierbei die Kennlinie verläuft, desto unabhängiger ist die entnehmbare Energie von der Leistungsentnahme. In modernen Fahrzeugkonzepten werden den Energiespeichern hohe Leistungen entnommen. Dann zeigen NiMH und Lithium-Ion Batterien ein sehr hohes Potenzial auf. Doppelschichtkondensatoren sind in dem Sinne keine Batterien, konkurrieren aber aufgrund der Leistungsdichte mit NiMH-Systemen. Wenn Aussagen über die Restreichweite eines Elektrofahrzeuges erstellt werden sollen, ist die Abhängigkeit der Energiedichte von der Leistungsdichte zur Berechnung und Anzeige der entnehmbaren Kapazität von Bedeutung.

Tab. 2.1: *Vergleichsdaten verschiedener Batteriesysteme*

Batteriesystem		**Pb/PbO2**	**Ni/Cd**	**NiMH** (Saft NHE 10-100 Modul)	**Li-Ion** (Saft VL45E cell)	**Na/$NiCl_2$**	**UCap**
Energiedichte (bei 2h entl.)						ohne BMS	
	[Wh/kg]	35	50	66 (HE)	149	94	3,4
	[Wh/l]	100	140	137 (HE)	313	148	4,5
Leistungsdichte	[W/kg]	100	180	150	664	169	2,7k
	[W/l]	230	360	310	1392	265	3,6k
Zellennennspannung	[V]	2,00	1,2	1,2	3,6	2,58	2,5
Ladeschlussspannung	[V]	2,05	1,65	1,55	4,0	2,85	2,8
Entladeschlussspannung	[V]	1,7	1,0	1,0	2,7 (2,3 peak)	1,72	1,4
Betriebstemperatur	[˚C]	0 bis +55	-20 bis +55	-20 bis +40	-10 bis +55	+270 bis +330	-30 bis +70
Wirkungsgrad	[%]	70 - 85	60 - 80	80	k.A.	80 - 95	k.A.
Selbstentladung	[%/Mon]	1 - 15	20 - 30	20-30	k.A.	0	20
Verluste	[Wh/Tag]					ca.4400	
Lebensdauer der Zelle	[Zyklen]	500 - 1500	bis 2000	> 600	> 600	1400	500k
	[Jahre]	4	6			>9	>10
-"- **des Moduls**	[Zyklen]	300 - 500	ca. 1200				500k
	[Jahre]	2 - 4	4 - 6				>10

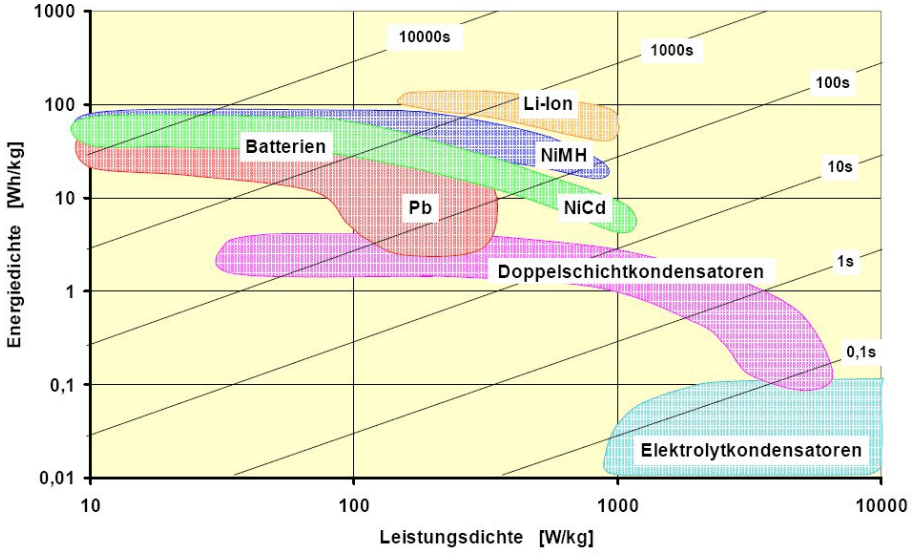


Abb. 2.1*: Ragone Diagramm: Zusammenhang zwischen Leistungsdichte und Energiedichte [Wai04]*

2.1.2 Definitionen von batterierelevanten Kenngrößen

In den folgenden Abschnitten Verwendung findende Begriffe und Kenngrößen sollen an dieser Stelle definiert werden.

Spannungsdefinitionen:

Führt man die Elektroden einer Batterie in einen Elektrolyten ein, so stellt sich nach dem Abklingen der Einschwingvorgänge die **Ruhespannung U_R** ein. Diese Ruhespannung ist von der Elektrolytkonzentration und von der Temperatur abhängig. Sie ist generell nur an der eingeschwungenen, unbelasteten Zelle meßbar. Bei Stromfluß wird hingegen eine **Klemmenspannung (U_{KL})** bzw. **Zellenspannung U_Z** gemessen, die bei einer Blei-Batterie zwischen der **Entladeschlußspannung** von ca. 1,7 V und der **Ladeschlußspannung** von ca. 2,4 V liegt. Es liegt ein von Ausgleichsvorgängen geprägter komplexer Zusammenhang zwischen der Ruhespannung U_R und der Zellenspannung U_Z vor. Der Einschwingvorgang von der Zellenspannung zur Ruhespannung selbst kann sehr lange dauern (Stunden bis Wochen). Dem Einschwingvorgang überlagert sich dabei die Selbstentladung der Batterie. Die Auswertung der Ruhespannung zur Bestimmung des Ladezustandes einer Traktionsbatterie ist im Fahrbetrieb aufgrund der Länge der Einschwingvorgänge irrelevant, kann jedoch zur Rekalibrierung der Ladezustandserfassung bei längeren Standzeiten genutzt werden. Man ordnet einem Batteriesystem weiterhin zur Charakterisierung eine **Nennspannung U_N** zu. Diese ist von den Betriebsbedingungen unabhängig. Tabelle 2.2 zeigt die Nennspannungen einiger Batteriesysteme.

Tab. 2.2: *Nennspannungen verschiedener Batteriesysteme*

Batteriesystem	Pb/PbO_2	Ni/Cd	NiMH	Lithium-Ion	Na/NiCl	Zink-Luft
Nennspannung	2,0 V	1,2 V	1,2 V	3,6 V	2,58 V	1,45 V

Kapazitätsdefinitionen:

Die **Kapazität K** einer Batterie gibt die entnehmbare Ladungsmenge an. Diese ist vom Aufbau, dem Entladestrom I_E, der Temperatur ϑ und dem Vorleben der Zelle abhängig. Die entnehmbare Kapazität ist in der Regel erst durch eine vollständige Entladung bestimmbar. Die **Nennkapazität K_N** stellt eine vom Hersteller garantierte und unter vorgegebenen Betriebsbedingungen entnehmbare Mindestkapazität dar. Diese Nennkapazität dient der Projektierung von kompletten Systemen aus Batterie und Batterieperipherie. Der Nennwert wird bei Raumtemperatur von neuwertigen Batterien eingehalten. In der Praxis wird die Nennkapazität für eine bestimmte Entladedauer angegeben. Üblich ist die Angabe bei

zweistündiger Entladung (K_2) für Elektro-Straßenfahrzeuge, fünfstündiger Entladung (K_5) für industriellen Traktionsbetrieb und zehnstündiger Entladung (K_{10}) für stationäre Anwendungen.

Man definiert einen **Nennstrom I_N** in Anlehnung von der Nennkapazität ausgehend zu

$$I_N = \frac{K_N}{N * t_0} \quad , \quad t_0 = 1h \tag{2.1}$$

So ergibt sich bei einer Batterie mit 160Ah bei 10-stündiger Entladung ein Nennstrom I_{10} von 16A. Zur Charakterisierung von Batterien wird der massebezogene Begriff der **spezifischen Kapazität** und **Energiedichte** verwendet. Häufig wird zum Beispiel zur Anzeige der Restkapazität auf einem Bordinstrument eine **normierte Kapazität k** eingeführt, die nach Gleichung **(2.2)** folgendermaßen definiert werden kann:

$$k = \frac{K(I_E, \vartheta, t)}{K_N} * 100\% \tag{2.2}$$

Definition Ladezustand:

Der Anwender benötigt Angaben über den Ladezustand seiner Batterie, damit er seine Routenplanung zuverlässig durchführen kann.

Gemäß DIN40729 ist der Ladezustand wie folgt definiert:

> Der Ladezustand ist das Verhältnis einer aktuellen Elektrizitätsmenge zu einer zugeordneten n-stündigen Kapazität einer Batterie.

Die Definition geht von der gespeicherten und nicht von der entnehmbaren Ladungsmenge aus. Eine Angabe der entnehmbaren Ladung würde ein Wissen sowohl über die Entladebedingungen als auch über die Akku-Vorgeschichte erfordern. Als erste Annäherung lässt sich der Ladezustand über das Zeitintegral des Stromes und eine Normierung auf die Nennkapazität (unter Abschätzung des Nebenreaktionsstromes) relativ brauchbar ermitteln.

Sogenannte Ladungsbilanzierungsverfahren haben sich in der Praxis bewährt, erfordern aber Rekalibrierungen nach wenigen -zig Zyklen, da durch Selbstentladung und Alterung Änderungen des Batterieverhaltens erfolgen. Die Durchführung der Ladungsbilanzierung ist eine Teilaufgabe des Batteriemanagements.

Weitere Verfahren zur Ermittlung des Ladezustandes werden im Kapitel 4 eingehender behandelt.

Zwischen der aufgenommenen Batterieladung (in Ah) während der Ladephase und der entnehmbaren Ladung (in Ah) in der Entladephase besteht eine Differenz, die durch Verluste begründet ist. Das Verhältnis von aufgenommener zu abgegebener Ladung während eines vollen Zyklusses einer Batterie wird als **Ladefaktor** bezeichnet und ist nach folgender

Gleichung definiert:

$$Ladefaktor = \frac{aufgenommeneLadung}{abgebbareLadung} \quad \textbf{(2.3)}$$

Der Ladezustand State of Charge (SOC_N) ist das Verhältnis der bei einer bestimmten Temperatur noch entnehmbaren Ladung Q_{ent} zur maximal bei dieser Temperatur nach der Vollladung zur Verfügung stehenden Kapazität. Bezogen auf die Nominaltemperatur ergibt sich:

$$SOC_N = \frac{Q_N^{ent}}{C_N^{rated}} \quad \textbf{(2.4)}$$

Als nomineller State of health (SOH_N) kann das Verhältnis der aktuell bei Nominaltemperatur verfügbaren Kapazität einer Batterie zur vom Hersteller bei Nominaltemperatur angegebenen Nominalkapazität definiert werden:

$$SOH_N = \frac{C_N^{actual}}{C_N^{rated}} \quad \textbf{(2.5)}$$

2.2 Batteriesysteme

Wiederaufladbare Batterien werden in unterschiedlichsten Anwendungsgebieten eingesetzt. Historisch und applikationsbedingt haben sich unterschiedliche Batteriesysteme am Markt etabliert. An dieser Stelle sollen die für Automotive-Anwendungen wichtigsten Systeme in ihren Eigenschaften vorgestellt werden. Dabei können einzelne Batteriesysteme für bestimmte Anwendungen prädestiniert sein, für andere Anwendungen dagegen völlig ungeeignet erscheinen. Zum Beispiel sind Lithium-Ionen Batterien im Gerätebatteriesektor quasi zum Stand der Technik bei mobilen Geräten wie Handys oder Notebooks geworden, für die Elektrotraktion ist dieser Batterietyp jedoch aufgrund der im Fahrzeugbetrieb bisher erzielbaren Lebensdauer erst in Prototypen einsetzbar. Oftmals gibt es innerhalb eines Applikationsbereiches weitere Diversifikationen, so dass ein Batteriesystem auf die jeweilige Anwendung hin optimiert werden muss und kann. Ein Beispiel dafür ist das NiMH-System. Im Bereich der Elektrotraktion gibt es unterschiedliche Betriebsstrategien, denen unterschiedliche Lastprofile zugrunde liegen. Der Batteriehersteller optimiert die Zellen auf diese Anforderungen, indem zum Beispiel die Zellgeometrie oder die chemische Zusammensetzung der Elektroden bzw. der aktiven Masse variiert wird. Es können dadurch zum Beispiel Hochleistungszellen (High Power, HP) für Hybridanwendungen, Ultrahochleistungszellen (Ultra high Power, UHP) zum power-assist oder Hochenergiezellen (High Energy, HE) für reine Elektrotraktion realisiert werden.

Die Batteriemanagementsysteme müssen wiederum den verwendeten Zellen angepasst werden. Deshalb erfolgt hier eine grundlegende Beschreibung der relevanten Batteriesysteme. Im

nachfolgenden Abschnitt 3.2 werden dann die Strukturen von Batteriemanagementsystemen für unterschiedliche Applikationen vorgestellt, nämlich für den Traktionsbetrieb im Elektro-straßenfahrzeug (3.2.1), Hybridfahrzeuge (3.2.2), Kfz-Bordnetz (3.2.3), Photovoltaische Anlagen (3.2.4) und Portable Geräte (3.2.5).

2.2.1 Blei-Batteriesysteme

Die Bleibatterie ist die bisher am häufigsten eingesetzte Traktionsbatterie. Sie wurde früher als offene Batterie hergestellt, wird aber zunehmend von den wartungsfreien geschlossenen Batterien verdrängt. Beide Typen von Bleibatterien weisen bereits ein unterschiedliches Verhalten auf. Ein Batteriemanagementsystem muss die jeweiligen charakteristischen Eigenschaften berücksichtigen. Zum Verständnis der später beschriebenen Funktionsweise eines Batteriemanagementsystems sollen die wesentlichen Charakteristika der Bleibatterie an dieser Stelle erläutert werden.

Die Zelle des Bleiakkumulators hat den nachfolgend in **Abb. 2.2** dargestellten prinzipiellen Aufbau. In eine Hartplastikschale werden die Elektroden und der Elektrolyt eingeführt. Die negative Elektrode besteht im geladenen Zustand aus metallischem Blei (Pb), die positive Elektrode aus Bleidioxyd (PbO_2). Beide Elektroden tauchen in den Elektrolyten aus verdünnter Schwefelsäure (H_2SO_4). Zwischen den Elektroden ist die Zellenspannung messbar. Im Ruhezustand ist diese Ruhespannung abhängig vom Ladezustand der Zelle. Wird ein elektrischer Verbraucher zwischen die Elektroden geschaltet, so fließt in den Ableitern, den Elektroden und im Verbraucher ein Strom durch Elektronen, im Elektrolyten ein Strom durch Ionen. Dieser Stromfluss wird durch die an der Phasengrenze zwischen Elektroden und Elektrolyt ablaufenden chemischen Reaktionen ermöglicht.

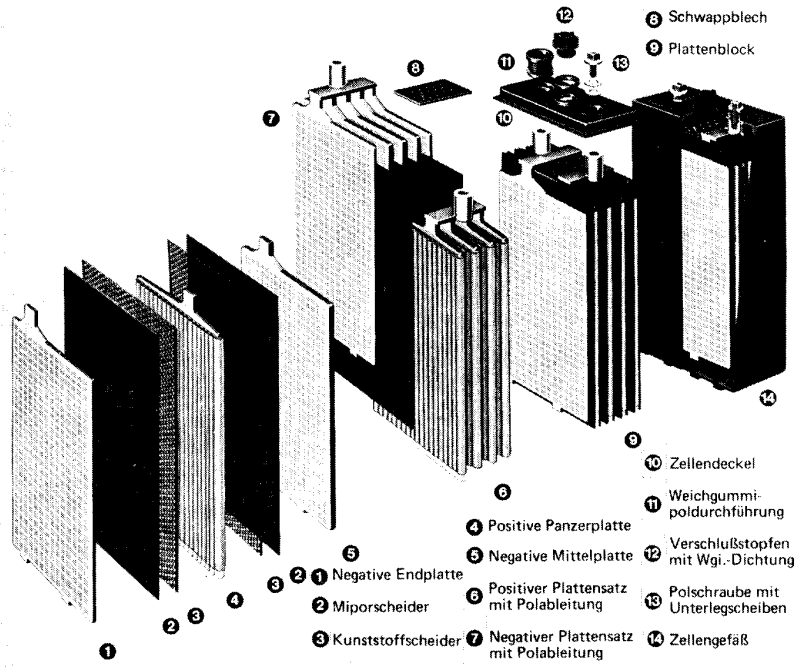


Abb. 2.2 *Prinzipieller Aufbau eines Blei-Säure-Akkumulators [VAR86]*

Zur Erhöhung der Festigkeit und Verminderung der Korrosion wurde das Blei der Gitterplatten mit Antimon legiert. Diese Antimonlegierung führt jedoch am Ende des Ladevorganges zur Zersetzung des Wassers in Wasserstoff und Sauerstoff, die sogenannte Gasung. Der durch Gasung erfolgte Wasserverlust musste bei offenen Systemen durch regelmäßiges Nachfüllen von Wasser ausgeglichen werden. Das Aufsteigen der Gasblasen während der Gasung durchmischt aber auch die Säure und wirkt somit der Elektrolytschichtung entgegen; ein durchaus erwünschter Effekt bei offenen Blei-Batteriesystemen.

Eine wesentliche Forderung zur Erzielung einer großen Akzeptanz elektrischer Straßenfahrzeuge ist jedoch eine Wartungsfreiheit der Batterie.

Wartungsfreie Zellen bzw. Module haben eine geschlossene Bauform, d.h. im Normalbetrieb dürfen der Batterie keine Gase entweichen. Es muss allerdings ein Sicherheitsventil vorgesehen werden, damit der bei eventuell starker Gasung entstehende Druck ab einem bestimmten Überdruck entweichen kann. Die Batterie ist in diesem Fall durch Gasungsverluste dauerhaft geschädigt. Der Elektrolyt wird bei wartungsfreien Batterien in einem Gel oder einem Vlies festgelegt. Er ist dann nicht mehr flüssig, sondern fest. Diese Festlegung im Gel erfolgt durch den Zusatz disperser Kieselsäure. Im Elektrolyten bilden sich im Betrieb feine Risse und Poren aus. Durch diese Risse kann der Sauerstoff austreten und an der negativen Platte zu Wasser reduziert werden. Es handelt sich hierbei um einen positiven Alterungseffekt, da das kapazitätsmindernde Entweichen des Sauerstoffs vermindert wird.

Eine Säureschichtung ist bei wartungsfreien Blei-Gel-Batterien nicht feststellbar. Auch wartungsfreie Bleibatterien haben Sauerstoffverluste, die jedoch gering gegenüber Bleibatterien mit flüssigem Elektrolyten sind.

Die chemische Reaktion ist reversibel. Je nach Ablaufrichtung wird in Lade- oder Entladevorgang der Blei-Säure-Zelle unterschieden.

$$Pb + PbO_2 + 4H^+ + 2SO_4^{2-} \underset{entladen}{\overset{laden}{\rightleftharpoons}} 2PbSO_4 + 2H_2O \qquad \textbf{(2.6)}$$

Die Zellenreaktion aus (2.6) beschreibt das Gleichgewichtssystem vollständig [Hei95]. Anhand der Zellenreaktionsgleichung ist erkennbar, dass der Elektrolyt Schwefelsäure (H_2SO_4) nicht nur das ionenleitende Medium darstellt, sondern beim Entladevorgang "verbraucht" wird. Dementsprechend wird die Schwefelsäure beim Ladevorgang zurückgebildet. **Abb. 2.3** zeigt den schematischen Reaktionsablauf.

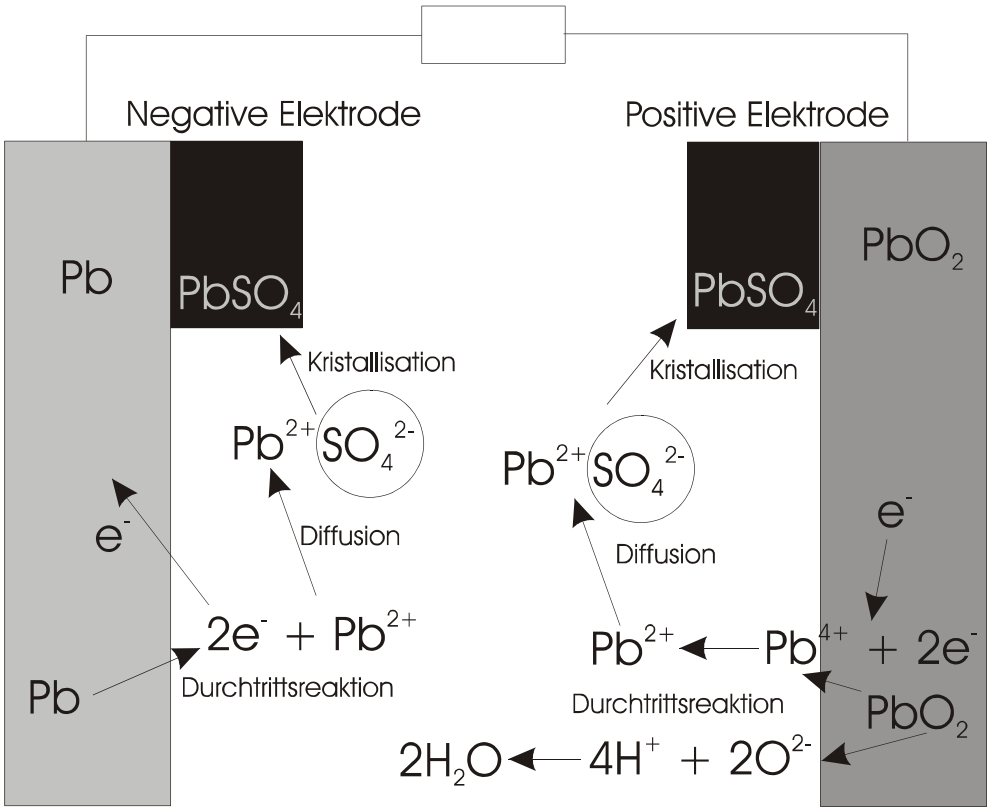


***Abb. 2.3**: Schematischer Reaktionsablauf der Entladung eines Blei-Akkumulators*

Das elementare Blei der negativen Elektrode wird während des Entladeprozesses zu zweiwertigem Pb^{2+} oxydiert und fällt infolge der geringen Löslichkeit als Bleisulfat aus. Das Bleidioxid der positivem Elektrode spaltet sich auf und das entstehende vierwertige Blei reduziert zu zweiwertigem Pb, welches ebenfalls als Bleisulfat ausfällt. Der Wasserstoff des Elektrolyten reagiert mit dem Sauerstoff zu Wasser. Der Elektrolyt wird demnach während der Entladung verbraucht, indem Bleisulfat an den Elektroden kristallisiert und Wasser gebildet wird. Die Säuredichte ist somit abhängig vom Entladegrad und kann zur Ladezustands-bestimmung herangezogen werden. Die Gleichgewichtszellenspannung ist gemäß der Nernst'schen Gleichung (2.7) von der Säuredichte abhängig, so dass diese im eingeschwungenen Zustand zur Bestimmung des Ladegrades herangezogen werden kann.

$$U_0 = U_{0S} + \frac{RT}{nF} \ln \frac{\prod a_{ox} \cdot}{\prod a_{red} \cdot} \qquad \textbf{(2.7)}$$

Die Gleichgewichtsspannung U_{0S} ist die Differenzspannung der Einzelelektroden gegen eine Wasserstoffelektrode bei einem Druck von 1 bar und einer Temperatur von 298,15 K. R bezeichnet die Gaskonstante, T die absolute Temperatur und F die Faraday-Konstante. Der Faktor

$$\frac{\ln \dfrac{\prod \alpha_{ox}}{\prod \alpha_{red}}}{n} = f(c) \tag{2.8}$$

kann in erster Näherung als Geradengleichung

$$f(c) = 0{,}275 \cdot c - 7{,}2 \tag{2.9}$$

angesetzt werden, wobei c der Konzentration des Elektrolyten in Masse-% entspricht.

Die Gleichgewichtszellenspannung in Abhängigkeit der Säuredichte für den realen und den nach (2.9) approximierten Fall zeigt **Abb. 2.4**.

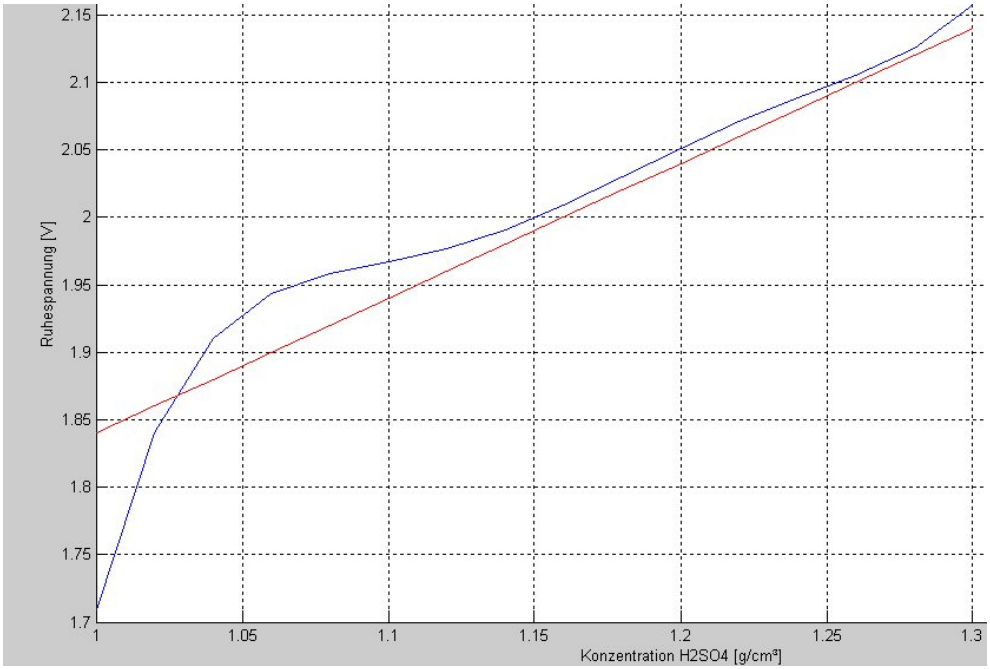


***Abb. 2.4**: Ruhespannung in Abhängigkeit der Elektrolytdichte [Var86]*

Der Elektronenaustausch, der auch als Durchtrittsreaktion bekannt ist, wird in der Praxis von unterschiedlichen Teilreaktionen begleitet. Die Kristallisations- und Transportvorgänge durch Diffusion und Migration sind in ihren Abläufen stark entladestrom-, temperatur- , ladezustands- und alterungsabhängig und können damit geschwindigkeitsbestimmend für die Gesamtreaktion werden. Auftretende Hemmungen machen sich für den Anwender in Form von Überspannungen bemerkbar [Var86,Scl82]. Zur Beschreibung des Batterieverhaltens wurden verschiedene Modelle entwickelt. Zu nennen sind in diesem Zusammenhang insbesondere die Arbeiten von Runge [Run74], Gretsch [Gre78], Schleuter [SCL82] und Mauracher[Mau96]. Gemeinsames Ziel aller Arbeiten war die Modellierung der Batterie mit Hilfe der Separierung von Teilprozessen durch dynamische Messungen. Jedem Teilprozess werden bei diesem Ansatz Einzelelemente des Ersatzschaltbildes zugeordnet. Das elektrische Ersatzschaltbild nach

Gretsch (**Abb. 2.5**) basiert auf dem Versuch die einzelnen Überspannungen durch separate Widerstände zu beschreiben. Jeder Widerstand besteht aus einer Konstanten und je einem stromabhängigen, einem temperaturabhängigen und einem ladegradabhängigen Faktor. Zur Bestimmung der Abhängigkeiten sind umfangreiche Messungen vor der Inbetriebnahme der Batterie notwendig. Die Einzelelemente werden für die Ladung und Entladung getrennt bestimmt, was durch die Einbeziehung idealer Dioden in das Ersatzschaltbild verdeutlicht wird.

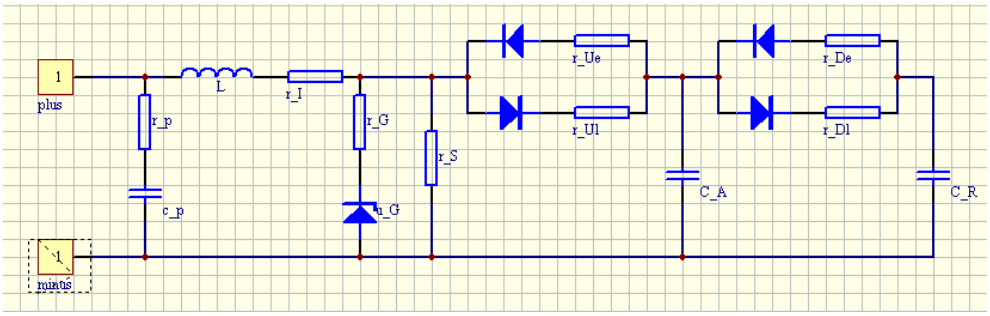


***Abb. 2.5**: Elektrisches Ersatzschaltbild für Blei-Akkumulatoren [Gre78]*

Gretsch beschränkt sich auf Konstantstromentladungen einzelner Module von Starterbatterien, eine Übertragung auf das Entladeverhalten von Traktionsbatterien liefert [Stü00]. Die Nutzung des Modells erfordert eine permanente Adaption der Modellparameter zur Erfassung der Alterung. Andere Ansätze sind ebenfalls im Traktionsbetrieb nur eingeschränkt oder gar nicht nutzbar. So bestimmt Mauracher seine Parameter mit Hilfe der Impedanzspektroskopie. Eine Adaption des Modells erfordert somit längere Stillstandszeiten des Fahrzeuges. Da das Modell für USV-Batterien entwickelt wurde, ist die Abhängigkeit der ermittelten Parameter von der Temperatur nicht weiter untersucht worden.

Die Auslegung einer Traktionsbatterie für Elektrostraßenfahrzeuge ist abhängig von der gewählten Betriebsstrategie. Bleibatterien werden nur für rein elektrisches Fahren angewendet. Dabei bestimmt die geforderte Reichweite den Energieinhalt der Batterie, der aber noch nichts über die bei einer speziellen Fahrt entnehmbare Ladung aussagt. Der Entladegrad ist definiert als

$$q(t) = \frac{Q(t)}{Q_n} \qquad \textbf{(2.10)}$$

Dabei ist Q(t) die der Batterie seit dem letzten Erreichen des Vollladezustandes entnommene Ladung und Q_n die entnehmbare Ladung bei einem Entladestrom $I_E = I_2$.

q(t) = 0 soll als Vollladezustand gedeutet werden. Bei der Entladung mit Strömen kleiner I_2 oder bei Temperaturen oberhalb der Nenntemperatur von ϑ=25˚C können relative Entladegrade q(t)>1 auftreten. Bereits im neunzehnten Jahrhundert hat Peukert [Peu1897] festgestellt, dass der erreichbare Entladegrad des Bleisystems von der Entladestromstärke abhängt und die Abhängigkeit

$$q_e(i) = \frac{Q}{Q_n} = \left(\frac{I}{I_N}\right)^{1-\gamma} = i^{1-\gamma} \qquad \textbf{(2.11)}$$

beschrieben. Dabei bestimmt Peukert den empirischen Exponenten γ abhängig von der Bauform und der Temperatur zu 1,1 ... 1,5. Unter Laborbedingungen wurden bei ϑ=25˚C Konstantstromentladungen an Blei-Gel 6 V/160 Ah Traktionsbatterien der Firma Sonnenschein durchgeführt. **Abb. 2.6** zeigt die der untersuchten Batterien entnehmbare Ladungsmenge in Abhängigkeit der Entladestromstärke.

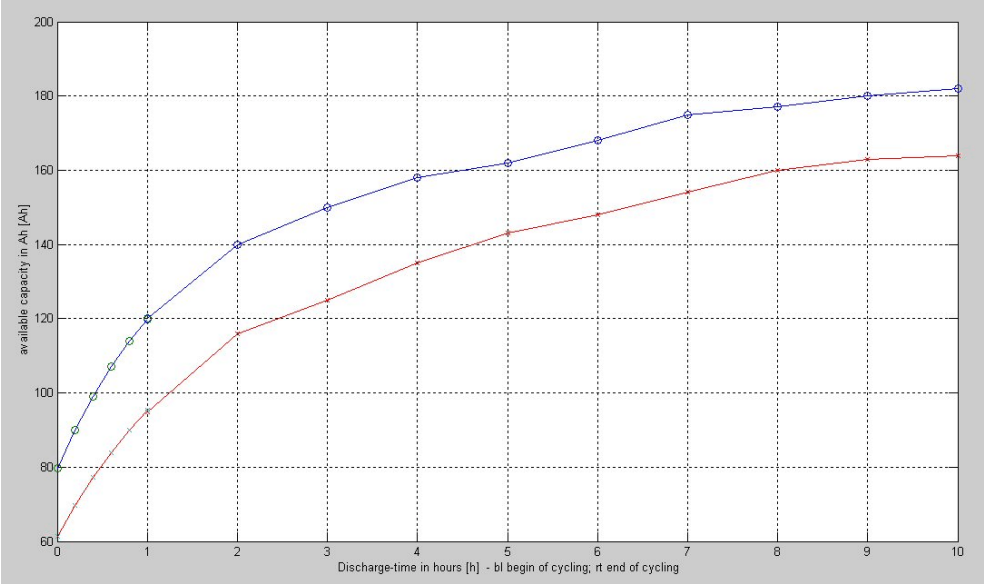


Abb. 2.6: *Entnehmbare Ladung einer Sonnenschein 6V/160Ah Bleibatterie in Abhängigkeit der Stromstärke/Entladedauer (eigene Messungen - blau: Beginn der Zyklierung - rot: Ende des Untersuchungszeitraumes)*

Zur Bestimmung der durch die Zyklierung bedingten Alterung wurden die Konstantstrom-entladungen am Ende des Untersuchungszeitraumes wiederholt. Diese sind ebenfalls in **Abb. 2.6** als rote Kurve dargestellt. Für die im Rahmen dieser Arbeit genutzten Bleibatterien gibt der Hersteller den in **Abb. 2.7** gezeigten Verlauf der entnehmbaren Kapazität über der Zyklenzahl an.

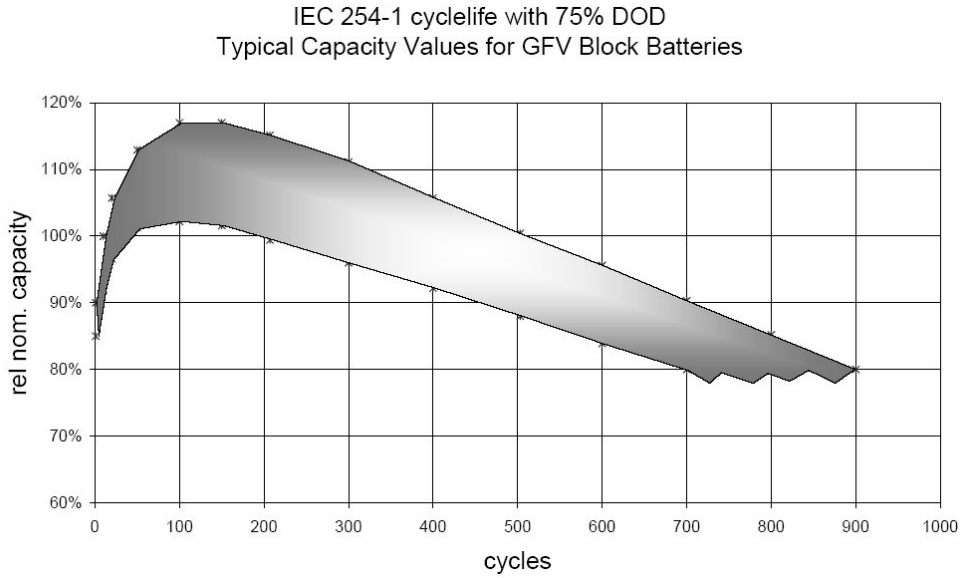


Abb. 2.7: Entnehmbare Ladungsmenge in Abhängigkeit der Zyklenzahl [Han05]

Giglioli [Gig90] setzt für den erreichbaren Entladegrad einen Entladestromfaktor und einen Temperaturfaktor an. Er beschreibt die Abhängigkeit des erreichbaren Entladegrades wie folgt:

$$q_e(i,T)_{Gig} = \frac{K_C}{1+(K_C-1)i^{\delta}} q_0 (1-\frac{T}{T_F})^{\varepsilon} \qquad \textbf{(2.12)}$$

K_C und δ sind empirische Parameter, die die Stromabhängigkeit beschreiben. K_C entspricht den bei beliebig kleiner Entladerate ($i \to 0$) erreichbaren Entladegrad. q_0, ε und T_F sind empirische Konstanten, die die Temperaturabhängigkeit beschreiben. Schöner [Scn84] bestätigt in seiner Arbeit die Temperaturabhängigkeit des Absolutwertes des Entladegrades. Nach DIN 43539 wird die Temperaturabhängigkeit des Entladegrades linear approximiert. Dabei ist α ein temperaturabhängiger Faktor. Die Temperaturabhängigkeit geht dann über in

$$(1+\alpha\Delta T) \qquad \textbf{(2.13)}$$

Der Entladegrad weist weiterhin eine Abhängigkeit von in der Batterie ablaufenden Alterungsprozessen auf. Dabei ist festzustellen, dass der erreichbare Entladegrad mit zunehmender Zyklenzahl nachlässt. Prinzipiell können bei Bleibatterien folgende Alterungseffekte beobachtet werden [Mau98]:

Tab. 2.3: *Alterungseffekte und Ursachen am Beispiel der Bleibatterie*

Alterungseffekt	Ursache
Gitterkorrosion an der positiven Elektrode	erhöhtes Elektrodenpotential oder zu hohe Temperatur
Isolation aktiver Masse	hoher Entladestrom oder niedriger Ladestrom
Kurzschlüsse	Korrosionsprozesse
Sulfation und Verbleiung der negativen Elektrode	unzureichendes Laden, hohe Temperatur, starkes Gasen
Verlust aktiver Masse der positiven Elektrode	hohe Entladestromstärke und Entladetiefe, Überladung
Austrocknung durch Wasserverlust	schädlicher Ladealgorithmus

Der Effekt der Isolation aktiver Masse (premature capacity loss) ist ein teilweise reversibler Vorgang, der durch häufige Entladung mit großen Strömen auftritt. Mit Hilfe einer Konditionierung kann dieser Effekt teilweise wieder aufgehoben werden. Der Konditionierungsvorgang ist ein spezieller, vom Batteriemanagement initiierter Zyklus, bei dem die Batterie mit I_{30} entladen wird, um anschließend mit hohem Strom geladen zu werden. Aktive Masse geht unwiederbringlich verloren, wenn sich aufgrund hoher Entladeleistung eine dichte Bleisulfatschicht über die aktive Masse legt.

Beim Laden können die entstehenden Bleidioxidkristalle nur wenige Kristallisationspunkte finden. Es bilden sich Dendriten, die durch Gasung abgerissen werden oder sich bei der anschließenden Entladung ablösen.

Schöner [Scö88] fand heraus, dass die Alterung in erster Näherung von der Temperatur und vom Entladestrom entkoppelt ist. Dadurch kann in Gleichung 2.12 mit der Näherung aus 2.13 ein alterungsabhängiger Faktor eingeführt werden, der von der Zyklenzahl abhängig ist.

$$q_e(i,T)_{Gig} = \frac{K_C}{1+(K_C-1)i^{\delta}} q_0(A(n)+\alpha\Delta T) \qquad \textbf{(2.14)}$$

Die Reversibilität der Reaktionsgleichung wurde bereits dargestellt. Die für die Entladung in **Abb. 2.3** schematisch dargestellten Abläufe kehren sich bei der Ladung um. Obwohl die Ausgangs- bzw. Endprodukte der Reaktion identisch sind und die Prozesse in entgegengesetzter Reihenfolge ablaufen, kann eine unterschiedliche Reaktionsgeschwindigkeit festgestellt werden. Diese ist nämlich abhängig von der Reihenfolge der Abläufe. Während der Ladung muss das aus dem aufgelösten Bleisulfat gewonnene Blei zur Elektrodenoberfläche transportiert werden, ein Vorgang, der aufgrund der langsamen Diffusionsgeschwindigkeit der Bleiionen

zeitbestimmend ist. Mit zunehmender Auflösung des Bleisulfates stehen weniger Bleiionen zur Verfügung, damit steigen auch die Transportwege zur Elektrodenoberfläche. Es bildet sich ein Diffusionsgrenzstrom aus, der auch durch eine Vergrößerung der Überspannung nicht mehr ansteigen kann, da die Nachlieferung der Reaktionsteilnehmer begrenzt ist. An der positiven Elektrode steigt mit zunehmender Ladung der Teil des Stromes an, der als Nebenreaktion die Sauerstoffentwicklung betreibt. Auch an der negativen Elektrode begrenzt der Nachschub an Bleiionen die Ladereaktion, und bei zunehmender Spannung wird ein zunehmender Anteil des Ladestromes zur Wasserstoffentwicklung genutzt. Die Transportvorgänge machen sich also beim Laden stärker als beim Entladen bemerkbar. Der Ladewirkungsgrad η_L als das Verhältnis von aufgenommener Ladung zu zugeführter Ladungsmenge sinkt mit steigender Stromdichte und fallender Temperatur.

Betrachtet man das Verhalten der Bleizelle bei einer Konstantstromladung, so ergeben sich die in **Abb. 2.8** aufgeführten Spannungsverläufe. Die Zellenspannung hat den charakteristischen Verlauf mit einem moderaten Anstieg über der Ladezeit, kombiniert mit einem starken Anstieg zum Ladeschluß. Betrachtet man die Einzelpotentiale gemessen gegen eine $Hg/HgSO_4$-Bezugselektrode, so stellt man fest, dass die Elektrodenpotentiale unterschiedlich verlaufen. Der moderate Anstieg der Zellenspannung (als Summe der beiden Einzelpotentiale) über der Ladezeit basiert auf dem entsprechenden Anstieg des Potentials der positiven Elektrode, während das der negativen Elektrode nahezu konstant verläuft. Erst zum Ladeende ist der starke Anstieg des negativen Elektrodenpotentials feststellbar und für das Ladeende der Konstantstromphase verantwortlich. Der Verlauf der Spannungen steht im Zusammenhang mit den bereits beschriebenen Gasungsreaktionen. Daraus ist ableitbar, dass der Wirkungsgrad an der positiven Elektrode aufgrund der immer vorhandenen Sauerstoffgasung immer kleiner als 1 ist, während an der negativen Elektrode über einen weiten Zeitraum mit hohem Wirkungsgrad geladen werden kann. Der Anstieg des Potentials der negativen Elektrode kann bei vorhandener Bezugselektrode zur Umschaltung auf die Restladephase genutzt werden.

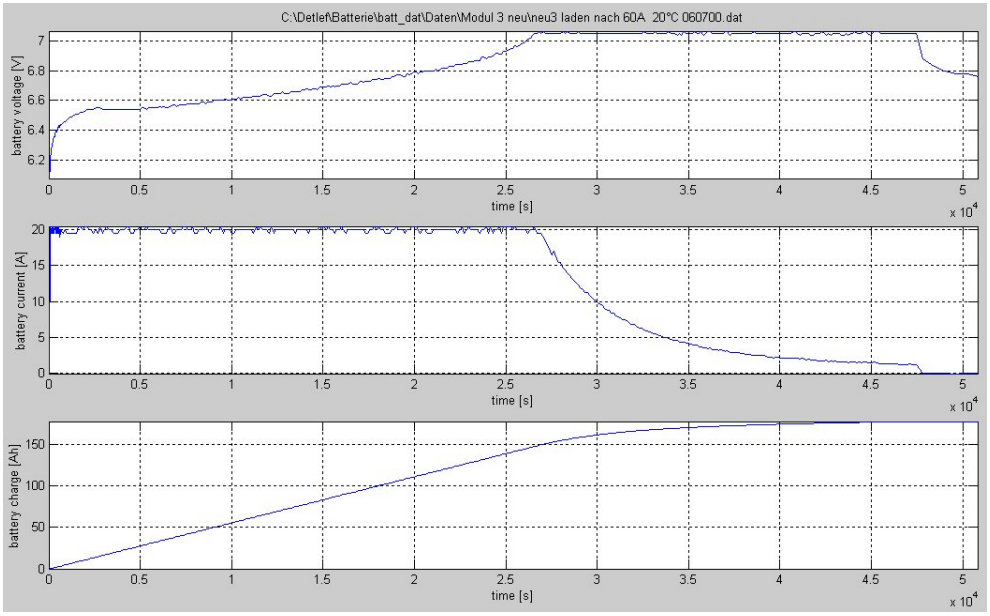


***Abb. 2.8**: Spannung, Strom und eingebrachte Ladung bei einem 6V/160Ah Modul*

Bei der Ladung mit einer konstanten Spannung kann bei einer geeigneten Wahl der Ladespannung eine für die Batterie schädliche Gasung vermieden werden. Der Ladestrom sinkt bei zunehmender Ladedauer exponentiell ab. Die Ladezeit hängt bei diesem Verfahren von der Wahl des Anfangsladestromes ab. Bleibatterien können aufgrund ihres Aufbaues mit hohen Strömen geladen werden. In der Praxis wird der Anfangsstrom einer Ladephase durch das zur Verfügung stehende Ladegerät begrenzt. Eine Vollladung der Zelle ist bei einer Konstantspannungsladung mit 2,23V/Zelle erreichbar. In der Praxis werden meist höhere Spannungen bis ca. 2,4V/Zelle gewählt. Diese Spannung wird allgemein als Gasungsspannung bezeichnet, ein Begriff, der aufgrund der oben beschriebenen Vorgänge während der Ladung nicht korrekt ist. Vielmehr kann beim Überschreiten der 'Gasungsspannung' von einer verstärkten und für die Batterie schädlichen Gasung gesprochen werden. **Abb. 2.9** zeigt den Zusammenhang zwischen Ladezeit und gewählter Strombegrenzung des Anfangsladestromes zum Beginn der Ladephase. Aufgrund der Limitierung des Anfangsladestromes entsteht dann die charakteristische Ladekurve nach dem IU-Verfahren.

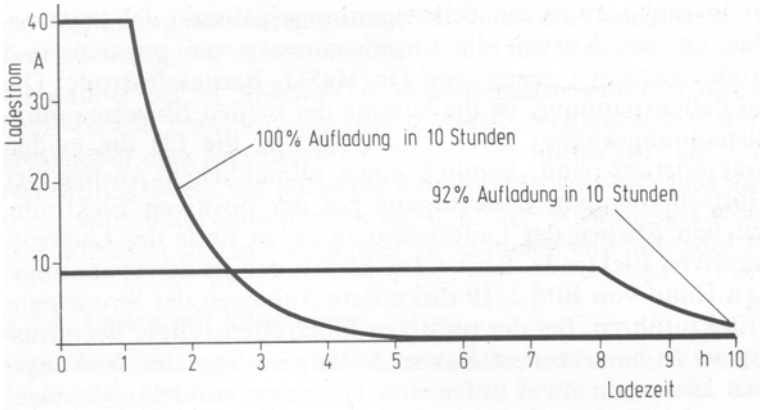


***Abb. 2.9**: Erreichbarer Ladegrad in Abhängigkeit des Anfangsladestromes aus [Var86]*

Da Bleibatterien ständig einer gewissen Selbstentladung ausgesetzt sind, werden Batterien, die der Notstromversorgung dienen, mit einem Erhaltungsladestrom nach dem Erreichen des Vollladezustandes weitergeladen. Die Steuerung ist eine Aufgabe des Batteriemanagement-system, da in der Regel Reihenschaltungen vieler Zellen vorliegen.

Der gewählte Erhaltungsladestrom sollte so bemessen sein, dass möglichst geringe Gasung die Folge ist. Wie bereits erwähnt, kann die Bleizelle bei einer Spannung von 2,23V/Zelle den Vollladezustand erreichen. Nutzt man Zellenspannungen < 2,23V/Zelle, so werden die Zellen nicht im Vollladezustand gehalten, Ausgleichsladungen werden in bestimmten Intervallen notwendig.

Bei der Entladung von Bleibatterien kann ein ladegradabhängiger Verlauf des Innen-widerstandes festgestellt werden. In **Abb. 2.10** ist die Gleichgewichtsspannung in Abhängigkeit der entnommenen Ladung in das Diagramm eingetragen. Es ist deutlich erkennbar, dass die Differenz zwischen der Gleichgewichtsspannung und der Klemmenspannung zum Entlade-schluss hin größer wird.

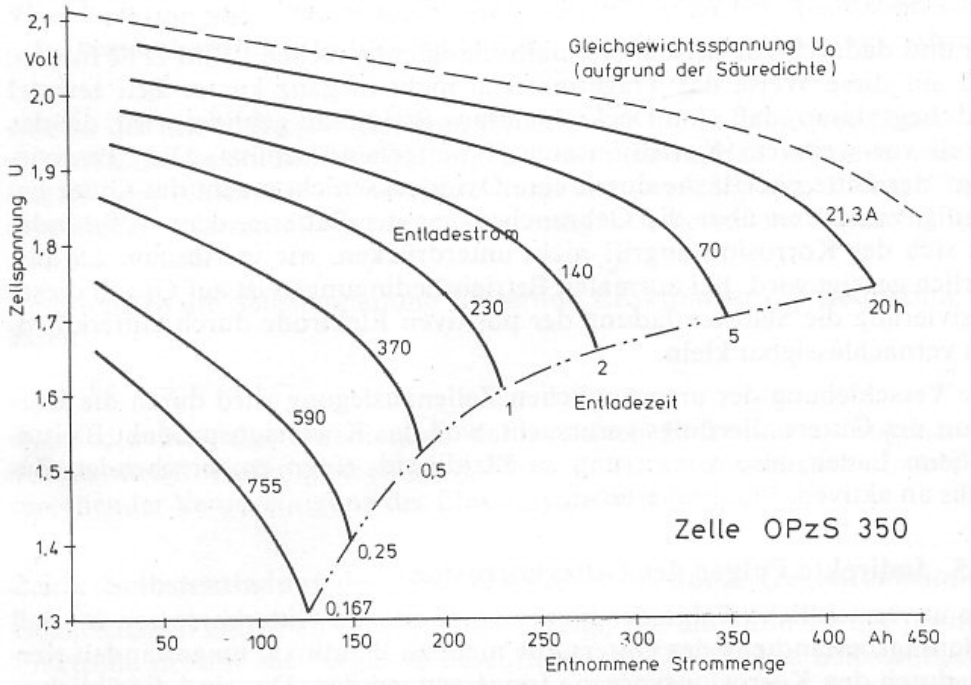


***Abb. 2.10**: Entladekennlinien einer OpzS 350 nach [Var86]*

Mit zunehmender Entladung verändert sich die Struktur der Elektroden. Diese werden, wie beschrieben, mit einer Bleisulfatschicht überzogen. Diese Bleisulfatschicht ist nichtleitend und bestimmt den Innenwiderstand der Zelle maßgeblich [Kah92].

2.2.2 NiCd-Batterien

Bereits um 1900 arbeiteten Edison und Jungner an der Entwicklung alkalischer Batterien. Während Edison den Nickel-Eisen Akkumulator entwickelte, fand bei Jungner Cadmium Verwendung als negative Masse. Fertigungsreife Zellen gab es ab ca. 1910, in Sintertechnik gefertigte Zellen sind seit den späten 30er Jahren verfügbar. Die Sinterelektroden werden aus nickelbeschichteten Stahlblechen hergestellt. Bei ca. 1000˚C wird Nickelpulver eingesintert. Es entsteht eine hochporöse Oberfläche, in die in mehrstufigen Prozessen die aktiven Massen eingebracht werden [Var82].

1933 erhielten Dassler, Lange, Langguth und Breuning ein Patent, das die Herstellung geschlossener NiCd-Batterien ermöglichen sollte. Ab Mitte der 50er Jahre wurden die ersten aus einer Massenproduktion stammenden gasdichten und umpolfesten Zellen vertrieben, die zwar überladen, nicht jedoch tiefentladen werden konnten. Dassler erhielt 1951 ein Patent für seine Entwicklung der in die positive Elektrode integrierten ‘antipolaren Masse’, die die Tiefentladung sicherer macht. Seither wird an den Grundprinzipien festgehalten und die Entwicklungsschritte konzentrieren sich auf eine Optimierung der Fertigungsprozesse, sowie die Erhöhung der Energie- und der Leistungsdichte.

Besonders seit den 80er Jahren wurden erhebliche Fortschritte in Bezug auf die entnehmbare Kapazität der Zellen gemacht. Diese Forschungsanstrengungen basierten auf der rapide ansteigenden Nachfrage nach wiederaufladbaren Batterien für portable Geräteanwendungen wie Laptops, Camcorder oder schnurlose Telefone.

Die höhere Energie- und Leistungsdichte gegenüber der Bleibatterie in Verbindung mit dem besseren Entladeverhalten bei tiefen Temperaturen stellen die Hauptvorteile der Nickel-Cadmium Batterie gegenüber dem Bleisystem dar. Andererseits muss man im Traktionsbereich die circa viermal höheren Anschaffungskosten und die Entsorgungsprobleme des giftigen Cadmiums in Betracht ziehen, so dass im Traktionsbereich die Bleibatterie den höheren Stellenwert genießt. Innerhalb der Europäischen Union gibt es Bestrebungen, die auf ein Verbot des Einsatzes von Cadmium abzielen:

"Angesichts der spezifischen Umwelt- und Gesundheitsrisiken, die von Cadmium, Quecksilber und Blei ausgehen, und der besonderen Eigenschaften von Batterien und Akkumulatoren, die Cadmium, Quecksilber und Blei enthalten, sollten zusätzliche Maßnahmen verabschiedet werden. ... Die Verwendung von Nickel-Cadmium- Gerätebatterien und von Blei-Gerätebatterien sollte verboten werden. Wenn keine Alternativen bestehen, können für verschiedene wichtige Anwendungszwecke Ausnahmen vorgesehen werden." [EU04]

Aufgrund der rasanten Entwicklungen der im nächsten Abschnitt beschriebenen Nickel-Metallhydrid Batterie ist die NiCd Technologie ersetzbar geworden.

Die NiCd Zelle besteht aus einer positiven Nickelhydroxidelektrode, einer negativen Cadmiumelektrode und verdünnter Kalilauge (KOH) als Elektrolyt. KOH wird wegen der größeren Leitfähigkeit gegenüber anderen Hydoxiden wie Cäsium-, Lithium- oder Natriumhydroxid verwendet. Die Leitfähigkeit der Hydroxide ist von der Konzentration abhängig. Ein Maximum existiert für KOH bei 1,27 kg/l, entsprechend 6,5 mol/l.

Die chemische Reaktion an der Kathode lässt sich vereinfacht so beschreiben, dass beim Entladen dreiwertiges Nickel zu zweiwertigem reduziert wird.

$$2NiOOH + 2H_2O + 2e^- \underset{\text{entladen}}{\overset{\text{laden}}{\rightleftharpoons}} 2Ni(OH)_2 + 2OH^- \qquad \textbf{(2.16)}$$

An der Anode wird beim Entladen metallisches Cadmium in den zweiwertigen Zustand oxidiert.

$$Cd + 2OH^- \underset{\text{laden}}{\overset{\text{entladen}}{\rightleftharpoons}} Cd(OH)_2 + 2e^- \qquad \textbf{(2.17)}$$

Aus den prinzipiellen Reaktionsgleichungen ist die Reversibilität der Reaktionsabläufe beim Laden und Entladen ersichtlich. Der Elektrolyt nimmt an der Reaktion nicht teil und dient lediglich dem Ionentransport. Ein Zusammenhang zwischen der Zusammensetzung des Elektrolyten und dem Ladezustand der Zelle, wie er beim Bleisystem zu beobachten ist, existiert beim NiCd-System nicht. Die Leerlaufspannung im entladenen und geladenen Zustand unterscheidet sich deshalb nur um wenige mV, so dass sie bei der NiCd-Zelle anders als bei der Blei-Zelle nicht zur Ermittlung des Ladezustandes herangezogen werden kann.

Die hier beschriebenen Reaktionsgleichungen sind stark vereinfacht, sind aber u.a. in [Var82] ausführlich beschrieben. Die Reaktionsprodukte der positiven Elektrode sind unter anderem abhängig vom Herstellungsprozess, so variiert das Nickelhydroxid in der Kristallstruktur je nach Ausgangsstoff der Hydroxidgewinnung. Die positive Elektrode oxydiert während der Ladung nicht durch die Absorption von Sauerstoff, sondern durch die Abgabe von Wasserstoff.

Parallel zur Hauptreaktion kann eine Wasserzersetzungsreaktion stattfinden, wobei an der positiven Elektrode

$$2OH^- \underset{\text{rekombinien}}{\overset{\text{laden}}{\rightleftharpoons}} H_2O + \frac{1}{2}O_2 + 2e^- \qquad \textbf{(2.18)}$$

und an der negativen Elektrode

$$2e^- + 2H_2O \underset{\text{rekombinieren}}{\overset{\text{laden}}{\rightleftharpoons}} H_2 + 2OH^- \qquad \textbf{(2.19)}$$

entstehen. Gasdichte Zellen sind so konstruiert, dass der Sauerstoff an der negativen Elektrode verzehrt wird und diese damit entlädt. Die negative Elektrode wird daher überdimensioniert.

Die Reaktionsgleichung lässt sich ausgehend von **(2.18)** und **(2.19)** folgendermaßen beschreiben:

$$Cd + 2NiOOH + 2H_2O \underset{\text{laden}}{\overset{\text{entladen}}{\rightleftharpoons}} Cd(OH)_2 + 2Ni(OH)_2 \qquad \textbf{(2.20)}$$

Beim Erreichen der Entladeschlussspannung ist nur die positive Elektrode entladen. Eine bei weiterer Entladung zu beobachtende Umpolung der Zelle bezieht sich somit auch nur auf die Umpolung der positiven Elektrode. Die Zellenspannung beträgt dann ca. -0,2 V. Es bleibt anzumerken, dass die Reaktion der Haupt- und der Gasungsreaktion an beiden Elektroden stets im Gleichgewicht befindlich sind. Die Summe der umgesetzten Elektronen an jeder Elektrode ist stets gleich dem äußeren Strom. Die Aufteilung zwischen Haupt- und Gasungsreaktion kann jedoch an jeder Elektrode unterschiedlich sein.

Die Separatoren zwischen den Elektroden müssen von der Struktur her so beschaffen sein, dass zum einen eine sehr gute Benetzung der Elektroden mit dem Elektrolyten garantiert ist, auf der anderen Seite jedoch auch größere Gasblasen zwischen den Elektroden beweglich sind. Verwendung finden Fasermatten aus Polyamid oder Polypropylen. Zur Erreichung einer hohen kalendarischen Lebensdauer müssen die Separatoren gegen den Elektrolyten und gegen Oxydation beständig sein. Polyamid ist oberhalb von 45˚C nicht mehr oxidationsbeständig, so dass bei Separatoren dieses Typs die obere Betriebstemperatur auf den angegebenen Wert begrenzt werden muss. Polypropylenseparatoren weisen dagegen eine geringere Absorptionsfähigkeit des Elektrolyten auf, so dass ein schlechteres Betriebsverhalten speziell bei niedrigen Temperaturen und hohen Entladeraten auftritt. Die Betriebstemperatur kann allerdings auf bis zu 60˚C heraufgesetzt werden.

Verwendet man höhere Elektrolytkonzentrationen als die, bei der die maximale Leitfähigkeit auftritt, so resultiert das in einer größeren Kapazität der Zelle, die jedoch aufgrund höheren Überdruckes beim Überladen, größerer Quellung der Elektroden und einer verstärkten Oxydation der Separatoren mit einer verkürzten Lebensdauer erkauft wird.

2.2.3 NiMH-Batterien

Nickel-Metall-Hydrid Batterien (NiMH) wurden als Nachfolger der Nickel-Cadmium Batterie konzipiert. Diese sind seit ihrer Entwicklung um die vorletzte Jahrhundertwende bekannt und wurden ständig weiterentwickelt.

Die Forderung nach immer größeren Kapazitäten und längeren Lebensdauern auf der einen und der zitierten Forderung der Substitution des giftigen Cadmiums auf der anderen Seite führten zur forcierten Entwicklung der NiMH-Technologie seit der Mitte der 80er Jahre. Inzwischen haben NiMH-Batterien im Gerätebatterie-Sektor einen Marktanteil von über 30%. Die Kapazität der Zellen wurde seit der Markteinführung 1992 dramatisch gesteigert, trotzdem ist die Entwicklung noch nicht abgeschlossen.

Die Hochstrombelastbarkeit hat die NiMH-Batterie auch für Traktionsanwendungen interessant gemacht. Die Umweltgesetzgebung in Kalifornien und Bestrebungen in anderen Ländern führten zu erheblichen Anstrengungen der Industrie zur Erfüllung der gesetzten Normen. Null-Emissionsfahrzeuge sind derzeit nur mit Elektromotoren denkbar, NiMH-Batterien erscheinen momentan besonders für den Einsatz in Hybridfahrzeugen prädestiniert zu sein.

Der prinzipielle Aufbau der NiMH Zelle ist in **Abb. 2.11** gezeigt. Wie bei NiCd Zellen besteht die positive Elektrode aus reversibel ladbarem β-Nickelhydroxid. Die negative Elektrode besteht aus einer Metalllegierung, die Wasserstoff in Form von Hydriden speichern kann. Als Elektrolyt kommt wie in anderen alkalischen Systemen Kalilauge (KOH) zum Einsatz. Der Elektrolyt nimmt an der Zellenreaktion nicht teil. Die Konzentration des Elektrolyten ist somit über den gesamten Bereich des SOC konstant. Da die Elektrolytkonzentration maßgeblich den Innenwiderstand bestimmt, ist auch dieser über einen weiten Bereich des SOC nahezu konstant.

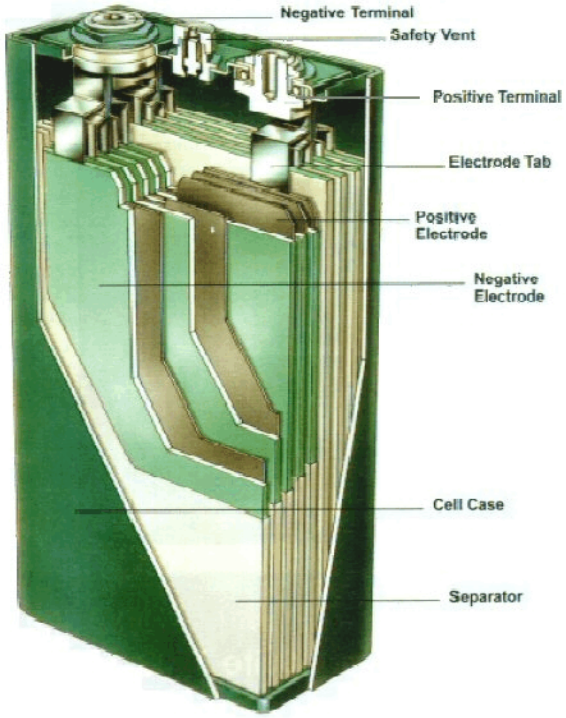


***Abb. 2.11**: Aufbau einer prismatischen NiMH Zelle [Kop04]*

Während der Ladephase wird zweiwertiges Nickel-Hydroxid an der positiven Elektrode zu dreiwertigem oxydiert. Gleichzeitig verlassen Protonen die positive Elektrode. Die vereinfachte Reaktion an der positiven Nickel-Hydroxid Elektrode kann folgendermaßen beschrieben werden:

$$Ni(OH)_2 + OH^- \underset{entladen}{\overset{laden}{\rightleftarrows}} \beta - NiOOH + H_2O + e^- \qquad \textbf{(2.21)}$$

Diese werden an der Phasengrenze Elektrode/Elektrolyt an der negativen Elektrode zu neutralen Wasserstoffatomen entladen und dann an der negativen Elektrode in Form von Metall-Hydriden eingespeichert. Die Kapazität der negativen Elektrode ist hauptsächlich von der Aufnahmefähigkeit der Wasserstofflegierung bestimmt. Dabei ist die Legierung derart zu wählen, dass auch bei erhöhter Betriebstemperatur der Wasserstoffdruck die für die mechanische Zellstabilität vertretbaren Werte nicht übertritt. Während der Entladung kehrt sich die Reaktion um. Die vereinfachte Reaktion an der negativen Hydrid-Elektrode kann folgendermaßen beschrieben werden:

$$M + H_2O + e^- \underset{entladen}{\overset{laden}{\rightleftarrows}} MH + OH^- \qquad \textbf{(2.22)}$$

Die kombinierte Zellenreaktion kann nach [Kop04] beschrieben werden als

$$M + Ni(OH)_2 + H_2O \underset{\text{entladen}}{\overset{\text{laden}}{\rightleftarrows}} MH + (\beta - NiOOH \bullet H_2O) \qquad \textbf{(2.23)}$$

Die geometrischen und physikalischen Beschaffenheiten der Elektrodenoberflächen bestimmen die kinetischen Eigenschaften und das Langzeitverhalten der Zellen. Die Elektroden mit einer Dicke von ca. 0,4 mm, bestehen aus gepressten Metallpartikeln <70 µm, wodurch eine poröse Struktur mit großen Elektrodenoberflächen entsteht. Die Existenz der porösen und chemisch stabilen Grenzschicht zwischen Elektrode und Elektrolyt bestimmt sowohl die Lade- und Entladecharakteristik der Zelle als auch die kalendarische und zyklische Lebensdauer. Heutige NiMH Zellen weisen eine Kapazitätsdichte von ca. 1800 mAh/cm³ auf, womit die Speicherfähigkeit ca. dreimal so groß ist wie bei NiCd Zellen. Die entnehmbare Kapazität ist bis zu. 70% höher als bei NiCd Zellen gleicher Baugröße.

Zellen für Traktionsanwendungen mit Kapazitäten zwischen 40 Ah und 150 Ah werden aus Gründen der Packungsdichte, der Klimatisierung und mechanischer Vorteile als prismatische Zellen gefertigt. Diese werden stets als gasdichte Zellen ausgeführt. [Köh05] vergleicht zylindrische Zellen mit denen in prismatischer Bauform, zusammengefasst in **Abb. 2.12**.

	CYLINDRICAL	PRISMATIC
• open circuit voltage	1.25 V	7.5 V
• capacity (1 C)	5.5 Ah	7 Ah
• spec power	1.160 W / kg	1.350 W / kg
• internal resistance	2.3 mOhm	9.8 mOhm (1.6 mOhm / cell)
• spec energy	44 Wh / kg	47 Wh / kg
• dimensions	32 x 56 mm	285 x 19,6 x 109 (112) mm
• weight	155 g	1.200 g
• design :	1 valve / cell	1 central valve / 6 cells
• battery design	no preferred cell orientation	upright position in battery design

***Abb. 2.12**: Vergleich der Eigenschaften zylindrischer und prismatischer Zellen nach [Köh05]*

Die negative Elektrode wird gegenüber der Kathode überdimensioniert. Im entladenen Zustand der Zelle ist die negative Elektrode demnach im teilentladenen Zustand, bei vollständig geladener Zelle ist dagegen die Anode nicht vollständig geladen. Durch diese Maßnahme kann nur an einer Elektrode, nämlich der positiven, Gasung auftreten. Dabei wird bei der Überladung der produzierte Sauerstoff sofort an der negativen Elektrode verzehrt, bei einer Tiefentladung oder Umpolung wird der an der positiven Elektrode entstehende Wasserstoff von der Metalllegierung unmittelbar aufgenommen. Der Druckanstieg wird durch diese Maßnahme besser vermieden.

Abhängig vom Anwendungsgebiet werden Zellen unterschiedlicher Bauform angeboten. Für reine Elektrofahrzeuge wurden Hochenergie-Zellen (HE - high energy) entwickelt. Die gravimetrische Energiedichte dieser Zellen liegt bei bis zu 80 Wh/kg, die volumetrische Energiedichte bei ca. 220 Wh/l. HE Zellen können mit bis zu 3 CA kontinuierlich entladen werden. Die Vollladung kann innerhalb von drei Stunden erreicht werden, bei gestufter Ladung können jedoch bereits 80 % der Kapazität innerhalb von 30 Minuten eingeladen werden.

In Hybridfahrzeugen mit einem gewissen Anteil aus der Traktionsbatterie gespeister Fahrt, zum Beispiel Toyota Prius, wird keine so große Energie wie im reinen batteriebetriebenen Elektrofahrzeug gefordert. Vielmehr wird ein Beschleunigungsverhalten gefordert, das dem des Verbrennungsmotors entspricht. Hochleistungszellen (HP - high power) wurden auf hohe Leistungsabgabe und Schnellladefähigkeit optimiert. Trotz der optimierten Leistungsdichte werden Energiedichten von 55 Wh/kg bzw. 150 Wh/l erreicht. Auch bei 5 CA-Entladung ist noch nahezu die Nominalkapazität verfügbar. High Power Zellen können innerhalb einer Stunde voll geladen werden. Partielle Ladungen auf 80 % C_{nom} sind innerhalb von 10 Minuten möglich. Die Schnellladung der Zellen wird durch den Temperaturanstieg der Zellen begrenzt. Dieser wird durch die exotherme Formierung der Hydride, die ohmschen Verluste sowie die Sauerstoffgasung und -rekombination zum Ladeende hervorgerufen.

Für neue Fahrzeuggenerationen gewinnt die Batterie als Leistungspuffer (power-assist) Bedeutung. Für die Grundlast steht ein Verbrennungsmotor oder eine Brennstoffzelle zur Verfügung. Lastspitzen während kurzer Beschleunigungsphasen oder an Steigungen werden aus der Batterie abgedeckt. Ebenso ermöglicht die zum Einsatz kommende Ultra-Hochleistungsbatterie (UHP - Ultra High Power) beim regenerativen Bremsen die Rückspeisung hoher Leistungen. UHP Batterien werden bei ca. 70 % SOC betrieben und können von der Kapazität her relativ gering dimensioniert werden. Die typische Kapazität einer solchen Batterie liegt bei ca. 10 Ah, Entladeraten von 30 CA, entsprechend einer zweiminütigen Entladung, sind möglich. Die Gesamtbatterie eines solchen Kompaktfahrzeuges hat einen Energieinhalt von nur 1...4 kWh. Die Entladecharakteristik einer UHP Zelle der Firma Varta ist in **Abb. 2.13** dargestellt. Das Spannungslevel, verursacht durch Spannungsabfälle am Innenwiderstand, ist bei 30 CA Entladung bei den derzeit in der Forschung befindlichen Zellen deutlich zu niedrig. Das Ladeverhalten der Zellen ist sehr beeindruckend. Bei kontinuierlicher 10 CA Ladung ist die Batterie innerhalb von sechs Minuten voll geladen. 80 % der Nominalkapazität sind nach nur 2,5 Minuten verfügbar. Laut Hersteller können 40 C Ladeimpulse mit einer Länge von bis zu 10 Sekunden problemlos absorbiert werden. UHP Zellen benötigen von den genannten Zelltypen das aufwändigste Batteriemanagementsystem (BMS), da sie einerseits mit extremen Leistungen, andererseits in kleinen SOC-Fenstern betrieben werden.

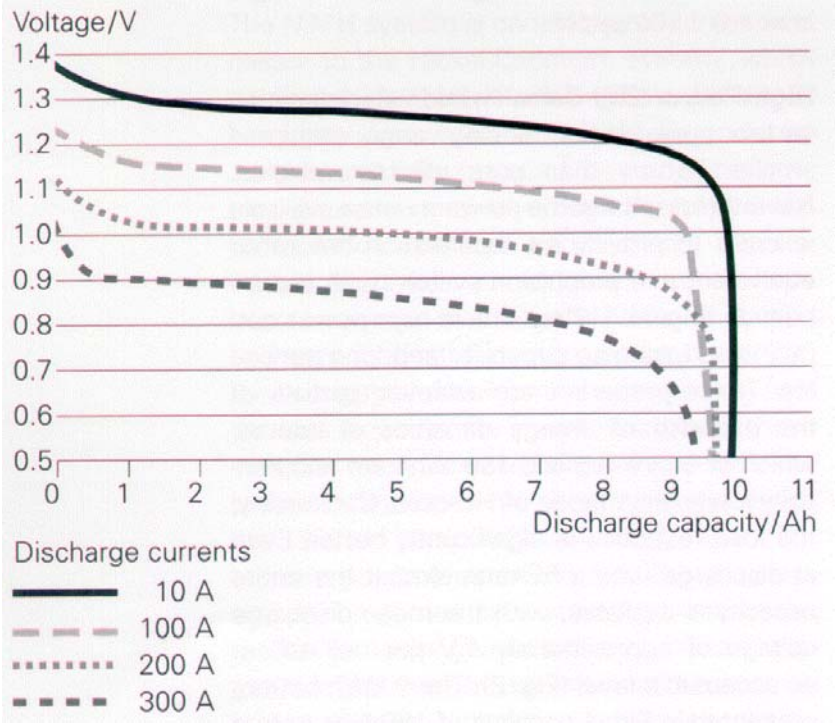


***Abb. 2.13**: Entladecharakteristik einer UHP Zelle 10Ah [Var97]*

Im Gegensatz zu den anderen beiden Typen werden UHP Zellen in Ladungsfenstern zwischen ca. 30-40 % DOD (entsprechend 60-70 % state of charge - SOC) betrieben. Im Zyklenbetrieb fehlt die Rekalibrierung des Ladezustandes über den Vollladezustand. NiMH Batterien benötigen unbedingt ein Batteriemanagementsystem.

Im Ragonediagramm in **Abb. 2.14** sind die Charakteristiken der einzelnen Batterietypen sehr deutlich erkennbar. HE Zellen weisen deutlich bessere Daten als NiCd oder Blei-Gel-Batterien auf, sind jedoch im Moment nicht in Großserie verfügbar. HP Zellen eignen sich sehr gut für Hybridfahrzeuge bei denen eine längere Strecke elektrisch gefahren werden soll.

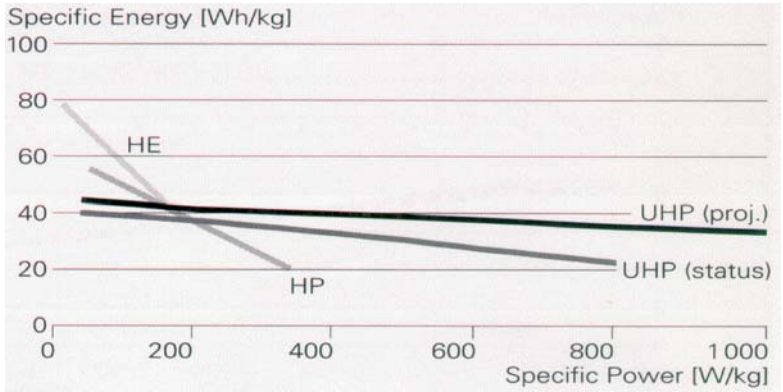


***Abb. 2.14**: Ragone-Diagramm HE (High Energy), HP (High Power) und UHP (Ultra HP) [Var97]*

UHP Zellen sollen in der Zukunft spezifische Leistungen von 1000 W/kg erreichen. Das ist ein Leistungsbereich, der bisher Kondensatoren vorbehalten war. UHP Zellen können somit als direkter Konkurrent der Superkondensatoren (Ultracaps) aufgefasst werden. Auch diese dürfen nur in bestimmten Spannungsbereichen betrieben werden und erfordern ein Energiemanagementsystem zur Einhaltung der definierten Betriebsbereiche. Die Zukunft wird zeigen, in welche Richtung der Fahrzeugbau geht, bzw. welches der Systeme das höhere Entwicklungspotenzial aufweist und sich für Traktionsanwendungen durchsetzen kann.

2.2.4 Li-Ion-Batterien

Es gibt in dem Markt für portable Produkte eine starke Tendenz zu Lithium-Ionen Batterien (Li-Ion, Li+). Diese Produkte wie Notebooks oder Mobiltelefone benötigen immer mehr Leistungsmerkmale und eine verlängerte Betriebsdauer bei weiter reduzierten Geräteabmessungen und sinkendem Gewicht. Li-Ion Batterien weisen zur Zeit die höchsten volumetrischen und gravimetrischen Energiedichten aller verfügbaren Sekundärsysteme auf. Aufgrund dieser technischen Eigenschaften eignen sie sich nicht nur für Geräteanwendungen, sondern wären auch für Elektrofahrzeuge hervorragend einsetzbar. Die Kosten übertreffen momentan jedoch noch die der NiMH Batterie, die Lebensdauerproblematik und Sicherheitsaspekte sind noch nicht zufriedenstellend geklärt. Prinzipiell scheint aber eine über 30 %-ige Reduzierung von Volumen und Gewicht gegenüber NiMH erreichbar. Weiterer Vorteil ist die Verwendung preislich unkritischer Rohstoffe.

Li-Ion Batterien sind physikalisch aus drei Komponenten zusammengesetzt, der positiven Elektrode, der negativen Elektrode und dem Separator. Grundsätzlich bewegt sich in der Batterie während eines äußeren Stromflusses ein Li-Ion von einer Platte zur anderen. Die Anode enthält Verbindungen, die während des Ladens Ionen abgeben und während des Entladens Ionen aufnehmen. Umgekehrt verhält es sich bei der positiven Platte. Die einzelnen Hersteller von Lithium-Ionen Batterien haben unterschiedliche Zusammensetzungen der chemischen Elektrodenverbindungen entwickelt mit der Zielsetzung der Erhöhung der Energiedichte und der Senkung der Kosten. Diese unterschiedlichen chemischen Verbindungen weisen auch unterschiedliche Gleichgewichtspotenziale auf, so dass bei Li-Ion Batterien von keiner einheitlichen Spannungslage gesprochen werden kann. Auch die Lade- und Entladecharakteristik wird von der Zusammensetzung der Elektroden geprägt. Die positive Elektrode besteht zumeist aus Lithium-Manganoxid, Lithium-Kobaltoxid oder Lithium-Nickeloxid. Graphit oder amorphes Karbon (CoO_2) sind dagegen die Hauptbestandteile der negativen Elektrode.

Die Gesamtreaktion ist äußerst komplex, läßt sich aber prinzipiell für die Lithium-Kobaltoxid Elektrode vereinfachen zu [Mar99]:

$$yLi + Li_xCoO_2 \underset{entladen}{\overset{laden}{\leftrightarrows}} Li_x + yCoO_2 \qquad \textbf{(2.24)}$$

Das Standardladeverfahren für Lithium-Ion Batterien ist die IU-Ladung. Die Ladeschluss-

spannung muss bei Li-Ion Batterien extrem genau eingehalten werden. Mehrere 10 mV über der vom Hersteller vorgegebenen Ladeschlußspannung von in der Regel 4,2 V können die Zelle bereits schädigen (Beschädigung, reduzierte Kapazität, verkürzte Lebensdauer) oder gar zur Explosion bringen. Pulsladeverfahren werden untersucht mit dem Ziel der Verkürzung der Ladezeit, der Erhöhung der Lebensdauer und Sicherheit sowie der Verbesserung der Ladeausgleichsmechanismen des Batteriemanagements.

Li-Ion ist auch im Entladeprozeß weniger 'tolerant' als zum Beispiel NiMH. Tiefentladungen unterhalb der end-of-discharge Spannung von ca. 2,7 V führen zu irreversiblen chemischen Prozessen, die ebenfalls zu Kapazitätsminderungen und einer Herabsetzung der Zyklenlebensdauer führen. Auf die daraus erwachsenen Anforderungen an die Strukturen von Batteriemanagementsystemen wird im Abschnitt 3.3.3 ausführlich eingegangen. Prinzipiell hat die Überwachung jedoch auf Zellenebene, Packebene und Modulebene zu erfolgen.

2.2.5 NaNiCl-Batterie

Die ZEBRA Batterie ist eine ursprünglich von der AEG Anglo Batteries entwickelte Hochtemperaturbatterie Die ZEBRA-Batterie wird bei Betriebstemperaturen im Bereich um 300˚C betrieben. Dadurch ergeben sich zum Teil völlig unterschiedliche Anforderungen an das Batteriemanagement als bei den Normaltemperaturbatterien. Die Energiedichte der Batterie ist mit 92 Wh/kg bzw. 143 Wh/l sehr hoch, die Leistungsdichte ist dagegen mit ca. 150 W/kg relativ gering. Die Zyklenlebensdauer liegt unabhängig von der Entladetiefe bei ca. 1500 Zyklen [Maz05]. Aufgrund der hohen Betriebstemperatur ist eine gute Isolierung zu gewährleisten, andererseits ist die Batterie dadurch sehr unabhängig von Umgebungseinflüssen (Sommer, Winter). Die Selbstentladung ist niedrig, umfangreiche Sicherheitstest wurden durchgeführt. In den folgenden Absätzen soll der Aufbau und die Wirkungsweise der ZEBRA Batterie erläutert werden.

Im geladenen Zustand der Zelle besteht die negative Elektrode aus Natrium (Na), die positive aus Nickelchlorid ($NiCl_2$). Die Elektroden sind durch eine Keramikwand getrennt, die für Natriumionen leitfähig ist, für Elektronen jedoch als Isolator wirkt. Eine Reaktion kann nur ablaufen, wenn ein äußerer Verbraucher an die Ableiter geschaltet ist. Der Widerstand des Verbrauchers bestimmt dabei die Geschwindigkeit der Zellreaktion. Die Zellreaktion ist in **Abb. 2.15** dargestellt,

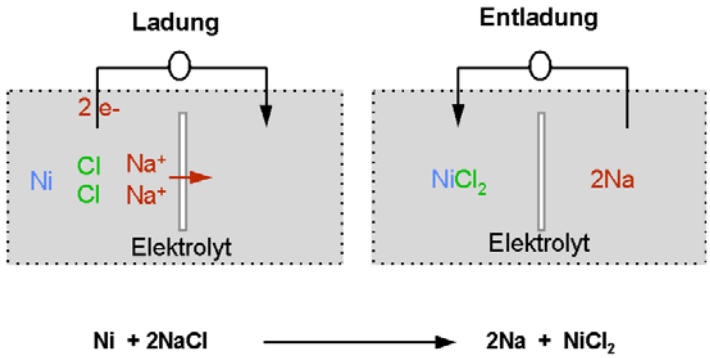


***Abb. 2.15**: Zellreaktion der ZEBRA-Zelle [Dau96]*

den prinzipiellen Aufbau zeigt **Abb. 2.16**.

Bei der Entladung reagiert das Nickelchlorid mit dem Natrium unter der Bildung von Natriumchlorid und Nickel. Bei der Betriebstemperatur von ca. 300˚C wird das Natrium flüssig, dann weist der Elektrolyt die notwendige Leitfähigkeit für Natriumionen auf. Der Keramikelektrolyt hatte bei runden Zellen ungefähr die Form eines Reagenzglases (siehe **Abb. 2.16**). In ihn wird die feste Elektrode aus Nickelchlorid mit dem Ableiter eingebracht. Zur Kopplung der porösen positiven Elektrode an den Keramikelektrolyten ist ein zweiter Elektrolyt notwendig, der aus schmelzflüssigem Natriumaluminiumchlorid ($NaAlCl_4$) besteht [ZEB93]. Dieser durchdringt die positive Elektrode, so dass die gesamte positive Masse zur Zellreaktion zur Verfügung steht. Das Zellgehäuse bildet gleichzeitig den negativen Pol der Zelle. Bei der Zellfertigung wird ein Gemisch aus Nickelpulver und Kochsalz in das Zellgehäuse eingefüllt. In dem Zwischenraum zwischen Zellgehäuse und Elektrolytrohr wird während des ersten Ladevorganges elektrochemisch Natrium gebildet. Zur Erhöhung der Packungsdichte der Zellen und damit der Energiedichte der Batterien werden heute quadratische Zellen eingesetzt.

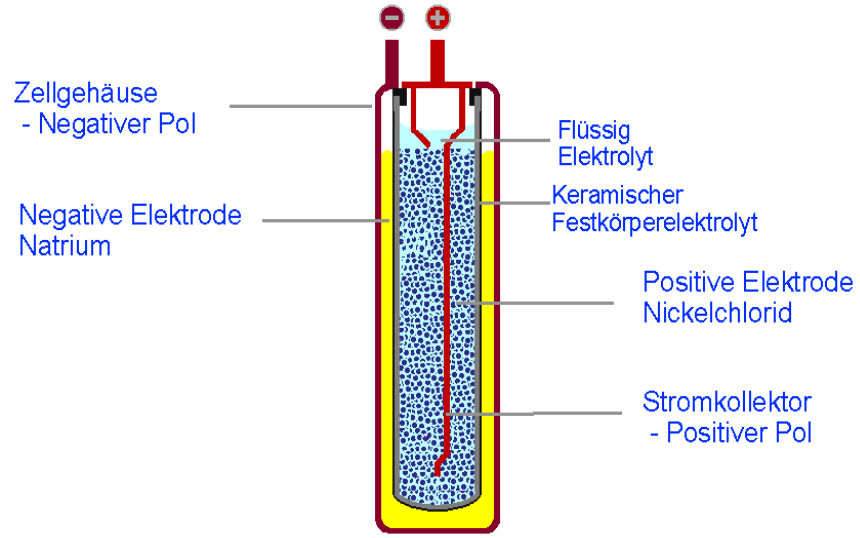


***Abb. 2.16**: Aufbau der ZEBRA-Zelle [Dau96]*

Durch die geometrischen Abmessungen der Zelle kann die Kapazität, in der Regel 30 Ah, festgelegt werden. Die Ruhespannung beträgt 2,58 V. Die Zellen werden durch Reihen- und Parallelschaltung zur fertigen Batterie zusammengefügt. Praktisch gibt es keinerlei Limitierungen der Anzahl der in Reihe oder parallel geschalteten Zellen. Die Zellen haben einen Ah-Wirkungsgrad von 100 %, sind über- und tiefentladefähig und haben aufgrund der Innenwiderstandscharakteristik quasi ein automatisches charge-balancing. Die von der MES-DEA gefertigte ML3G hat eine booster-Funktion integriert, indem eine niederohmige Zelle geringerer Kapazität mit einer Ruhespannung von 2,35 V zur Hauptzelle parallelgeschaltet ist. In Hochlastmomenten bricht die Spannung der ‘Energiezelle auf die Spannung der Leistungszelle zusammen. Diese versorgt die Last kurzzeitig mit Strom. Wird wieder Normallast gefahren, so wird die Leistungszelle aufgrund der höheren Spannungslage wieder aus der Energiezelle gespeist. Prinzipiell ist hier ein hybrides Batteriesystem realisiert worden. Die Batterie wird in ein mit Vakuumisolierung versehenes Gehäuse eingebracht. Die während

eines Kurzschlusses der vollgeladenen Batterie freigesetzte Energie soll nach Angaben des Herstellers im Gehäuse aufgenommen werden. Das BMS überwacht die Einhaltung des vorgegeben Temperaturfensters der Batterie. Beim Verlassen der Limitierungen wird der zweipolige Circuit-Breaker ausgelöst. Unterhalb von 150 ˚C wird die Batterie inaktiv geschaltet. In diesem Fall findet aufgrund der Zellchemie keine Alterung und keine Selbstentladung statt.

Aufgrund der Charakteristik als Hochtemperaturbatterie hat der damalige Inhaber als einer der ersten Batteriehersteller das Batteriesystem als Kombination aus Zellsystem, BMS, Charger und Circuit-Breaker angesehen. Diese Struktur ist in **Abb. 2.17** dargestellt.

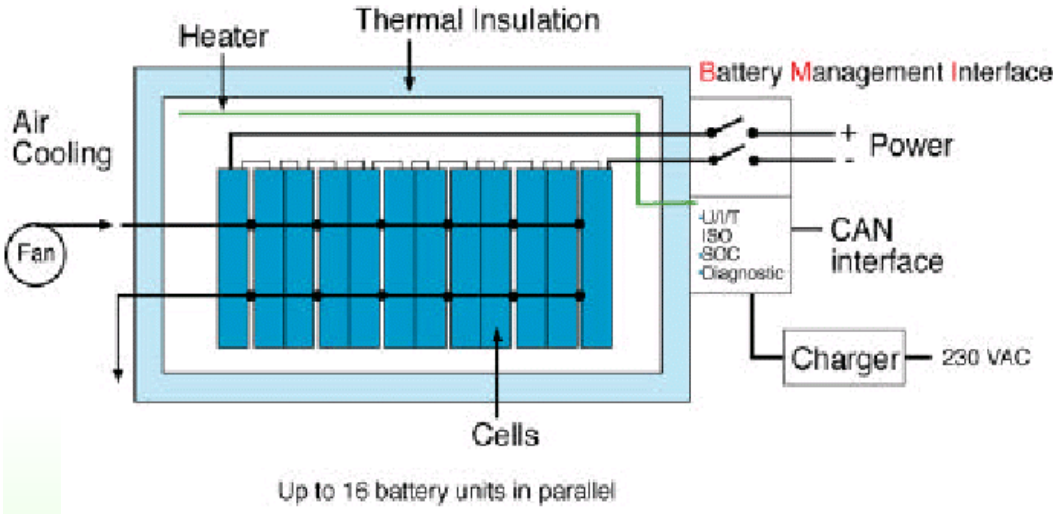


***Abb. 2.17**: Komplettsystem der ZEBRA-Batterie [Dau96]*

2.2.6 Ultracaps

Bei Ultracaps, häufig auch Superkondensatoren oder Doppelschichtkondensatoren genannt, handelt es sich nicht um Batterien, sondern um eine spezielle Art von Kondensatoren. Sie stellen eine neue Methode der Energiespeicherung dar. Der Energieinhalt liegt in der Nähe von Hochleistungsbatterien, so dass Ultracaps für power-assist Anwendungen eine interessante technische Alternative zu Batterien darstellen. Die Eigenschaften sollen deshalb an dieser Stelle erläutert werden.

Im Gegensatz zu Batterien findet die Energiespeicherung bei Ultracaps nicht auf der Basis reversibler chemischer Reaktionen statt, sondern durch die Nutzung der Ladungsverschiebung an der Grenzfläche zwischen Elektrolyt und Elektrode. Helmholtz entdeckte bereits 1853, dass ab einer bestimmten angelegten Spannung zwischen zwei in eine leitende Flüssigkeit getauchten Kohlenstoffelektroden ein kontinuierlicher Strom fließt. Unterhalb dieser Spannung fließt kein Strom, oberhalb einer maximalen Spannung erfolgt eine Gasungsreaktion. In einem gewissen Bereich der angelegten Spannung verhält sich das System wie ein Kondensator [Gag02]. Ionen aus dem Elektrolyten lagern sich beim Anlegen der Spannung an der Grenzfläche der Elektroden an und laden diese auf. Die speicherbare Energie dieses Systems

hängt dabei unter anderem von der Elektrodenoberfläche und der Zersetzungsspannung des Elektrolyten ab (Gasung). Allein diese Eigenschaften rechtfertigen die Betrachtung der Ultracaps im Rahmen des Batteriemanagements. Auch ohne weitere Betrachtungen wird deutlich, dass Ultracaps ein Management erfordern, welches dem der Batterie ähnlich ist. **Abb. 2.18** zeigt eine schematische Gegenüberstellung von Ultracap und PB-Säure Batterie. Aus dem Vergleich der Daten der Energie- und der Leistungsdichte läßt sich erkennen, dass Ultracaps für andere Einsatzgebiete als Bleibatterien prädestiniert sind.

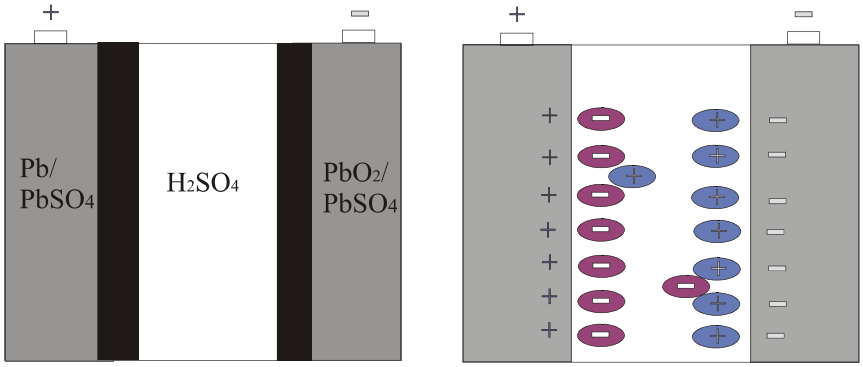


***Abb. 2.18**: Vergleich der Speicherprinzipien Pb-Säure und Ultracap*

Tab. 2.4: *Vergleich von Eigenschaften Pb-Säure und Ultracap*

	Pb-Batterie	**Ultracap**
pos. Elektrode	$Pb/PbSO_4$	C
neg. Elektrode	$PbO_2/PbSO_4$	C
Elektrolyt	H_2SO_4	organisch
Speicherprinzip	elektrochemisch	elektrostatisch
Zellspannung	2 V	2,3 V
Energiedichte	40 Wh/kg	2 Wh/kg
Leistungsdichte	150 W/kg	1000 W/kg

Durch den Einsatz neuer Kohlenstoff-Fließe und aufgesprühter Metallelektroden konnten die bis in die 90er Jahre hohen, und damit leistungsbegrenzenden Vorwiderstände der Elektroden reduziert werden, so dass Leistungsdichten bis 3000 W/kg erreicht werden können. Ultracaps haben Lade- und Entladezeiten, die im Bereich von 5 s bis zu 60 s liegen. Dadurch eignen sie sich speziell für power-assist Anwendungen, z.B. der kurzzeitigen Bereitstellung von Energie zum Beschleunigen oder zur Aufnahme regenerativer Bremsenergie. Denkt man sich eine Hybrid-Lösung aus einer Hochenergiebatterie und einem Ultracap-basierten Leistungsspeicher,

so kann die Batterie für den Leistungsbedarf bei konstanter Fahrt ausgelegt werden, da die Beschleunigungsleistung aus dem Leistungsspeicher kommt. Das Energiemanagement des Fahrzeugs hat dann die Aufgabe des Lademanagements der Ultracaps, wobei eine Nachladung über den Generator wie auch über den Energiespeicher vorzusehen ist.

Im Bereich der ICE-Fahrzeuge eignen sich Ultracaps ebenfalls zur Übernahme von Aufgaben, die bisher Batterien vorbehalten waren. Als mögliche Applikationen neben dem power-assist sind die Katalysator-Vorheizung oder die Speisung des kombinierten Starter-Generators im Start-Stop Betrieb oder zum Boosten denkbar [Epc00]. Das Starten eines Dieselmotors mit Ultracaps ist problemlos möglich. Ultracaps sind dabei nicht als Ersatz zur Starterbatterie, sondern zu deren Ergänzung gedacht. Wirklicher Start-Stop Modus des Motors an Ampeln, stabilisierte Bordnetzspannung und deutlich verbesserte Kaltstarteigenschaften rechtfertigen den Einsatz von Ultracaps im Bereich verbrennungsmotorisch betriebener Fahrzeuge.

Die Nennspannung wird mit verbesserten Fertigungsprozessen von 2,3 V auf 3V hochgesetzt werden. Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Ultracaps konnten bereits schädigungsfrei im Zyklenbetrieb bis zu einer Zellenspannung von 2,5 V betrieben werden. Die bei $U_N = 3$ V niedrigeren Systemkosten verbunden mit höheren Stückzahlen sollen den Einsatz wirtschaftlich machen. Zur Zeit sind Ultracaps im Entwicklungsstadium noch hinter power-assist Batterien zurück, z.B. hat jedoch die Firma Epcos AG bereits einen dieselmotorisch betriebenen Versuchsbus mit einem Ultracap-Hochleistungsspeicher ausgerüstet. Als Lebensdauer gibt Epcos 10 Jahre bzw. >500000 Vollzyklen an. Allgemein kann jedoch festgestellt werden, dass die zu erwartende Lebensdauer von Ultracaps deutlich höher ist als die von elektrochemischen Energiespeichern [Jeh00].

Kapazitäten von ca. 2700 F bei 2,3 V werden weder in HEV noch in 42 V-ICE Applikationen ausreichen. In der Praxis werden im Bereich Automotive immer Kondensatorbänke, vergleichbar Batteriemodulen, eingesetzt werden. Dabei werden Ultracaps ähnlich der ZEBRA-Batterie durch Reihen- und Parallelschaltung einzelner Caps zusammengesetzt. Solche Ultracapmodule (UCM) müssen sowohl während des Ladens, als auch während des Entladens überwacht werden. Während des Ladens sollten parallelgeschaltete Ultracapstränge getrennt werden und erst wieder beim Einsetzen der Entladung parallel geschaltet werden. Dabei müssen die getrennten Stränge durch geeignete Aufladewiderstände gegeneinander gesichert sein. Bei in Serie geschalteten Ultracaps kann die Spannung der einzelnen Caps wie bei Batteriezellen aufgrund der unterschiedlichen Isolationswiderstände variieren. Ein Überladen einzelner Caps muss wie bei Batteriezellen verhindert werden. Epcos schlägt isolierte Spannungsquellen zur Aufladung vor, für den Fall der nicht möglichen Realisierung (aus wirtschaftlichen Gründen) werden shunts zum charge-balancing vorgeschlagen. Momentan ist die Fertigungsqualität so gut, dass zwei oder maximal drei Caps in Reihe als Submodul betrachtet werden können, solange die Gesamtspannung der n in Reihe geschalteten Caps

$$U_{Sub\,\mathrm{mod}} < n * 0{,}8 * U_{Nenn}$$

gewährleistet ist. Diese Angabe gilt auch für einzelne Caps (n=1).

Die für Fahrzeuganwendungen zur Zeit interessantesten Ultracaps weisen eine Kapazität von

2700 F bei einer Nennspannung von 2,3 V auf. Für die im Rahmen dieser Forschungsarbeit genutzten Ultracaps der Firma Epcos mit den Modulwerten von 42 V/67 F und 42 V/134 F weisen eine spezifische Energie von 2,3 Wh/kg auf. In der Praxis wurden die Ultracaps zur Erzielung hoher Entladeleistungen nur bis zur halben Nominalspannung entladen, so dass ein Viertel der eingespeicherten Energie nicht genutzt wurde.

Eigene Innenwiderstandsmessungen haben einen ESR (equivalent series resistance) von 3,5 mΩ im Vollladezustand ergeben. Ultracaps werden häufig in Ersatzschaltbildern als idealer Kondensator mit einem den ESR symbolisierenden Reihenwiderstand beschrieben. Bei Lastprofilen höherer Dynamik kann diese einfache Ersatzschaltung nicht mehr genutzt werden.

Die Selbstentladung der Ultracaps ist gering, sie liegt bei vollgeladenem Ultracap bei < 6 mA, nach ca. 100 Stunden noch bei <3 mA.

Die neueren Generationen zeichnen sich durch verbesserte Elektrodentechnologie und Montagetechnik aus [Die02]. Die Kapazität konnte auf 5000 F/2,5 V gesteigert werden. Konnten die alten Zellen mit einem Leistungsäquivalent von 1000 W/kg für 3,6 s entladen werden, so können die neuen Zellen unter gleichen Bedingungen und gleichem Gewicht für über 10 s entladen werden. Beim Einsatz neuer Zellen kann demnach entweder das Einbauvolumen und -gewicht vermindert oder mit signifikant höheren Leistungen gearbeitet werden. Der Innenwiderstand (ESR) wurde herabgesetzt, zusätzlich macht sich der verminderte Anstieg des ESR bei tiefen Temperaturen positiv bemerkbar. Gerade bei tiefen Temperaturen weist der Ultracap deshalb gegenüber der Bleibatterie erhebliche Vorteile bezüglich der Hochstrombelastbarkeit auf.

Lädt man die Ultracaps mit konstantem, niedrigem Strom in der Größenordnung von 5 A, so erkennt man den nichtlinearen Anstieg der Modul- wie auch aller Zellenspannungen. Die Abweichungen der einzelnen Zellenspannungen betragen nach eigenen Messungen ungefähr 200 mV zwischen minimaler und maximaler Spannung und bleiben während eines Zyklusses in etwa konstant. Der nichtlineare Anstieg zeigt eine relativ betrachtet niedrigere Kapazität bei kleineren Spannungen und eine relativ größere Kapazität bei höheren Spannungen.

Diese höhere Kapazität bei höheren Spannungen hat seine Ursache im Anstieg der elektrostatischen Kräfte in der Doppelschicht, die proportional der angelegten Spannung steigen.

3 Allgemeine Anforderungen an Batteriemanagementsysteme und deren Strukturen

Kapitel 2 hat gezeigt, dass die für Traktionsanwendungen denkbaren Batteriesysteme völlig unterschiedlich aufgebaut sind. Die unterschiedlichen elektrochemischen Eigenschaften jedes Batteriesystems haben unterschiedliche Lade- und Entladecharakteristiken zur Folge, was zu unterschiedlichen Anforderungen an die Batteriemanagementsysteme (BMS) führt [Chu96]. In der technischen Realisierung ergeben sich an das Batteriesystem und an die Applikation angepasste Strukturen des BMS. Trotzdem lassen sich systemübergreifend Aufgaben des Batteriemanagements formulieren. Der Abschnitt 3.1 zeigt allgemein die Anforderungen an BMS, Abschnitt 3.2 zeigt die Notwendigkeiten der Anpassung von BMS an unterschiedliche Anwendungsfälle auf und Abschnitt 3.3 beschreibt die prinzipiellen Strukturen von BMS für unterschiedliche Batteriesysteme am Beispiel des Einsatzes der Batterie im Elektrostraßenfahrzeug.

3.1 Anforderungen an Batteriemanagementsysteme

BMS sollen dabei helfen das Potenzial der Batterie voll auszuschöpfen und dabei gleichzeitig batterieschädigende Betriebszustände verhindern. Kernproblem elektrischer Straßenfahrzeuge sind die über die Lebensdauer des Fahrzeuges zu hohen Batteriekosten; diese sollen durch ein intelligentes Batteriemanagement signifikant gesenkt werden. Daneben existieren weitere Aufgaben wie zum Beispiel die Erfassung von Diagnosedaten, worauf im Abschnitt 3.1.8 detailliert eingegangen werden soll.

Eine Verlängerung der Lebensdauer bedeutet, dass der Alterungsprozess verlangsamt werden muss. [Gar00] sieht interne und externe Parameter der Batterie, die die Alterung der Batterie bestimmen. Interne Parameter sind dabei solche, die der Batteriehersteller beeinflussen kann, z.B. die Beschaffenheit der Gitter oder die Fertigungsqualität. Die externen Parameter sind die, welche die Alterung aufgrund des Betriebes beeinflussen. Dazu zählen die Betriebstemperatur, das Ladeverfahren, die Batteriewartung, die Einhaltung der Betriebsbereiche und das Entladeprofil. Dabei sind einige externe Parameter durch die Applikation festgelegt, auf andere kann das Batteriemanagementsystem einwirken.

3.1.1 Allgemeine Anforderungen

Die Anforderungen an BMS hängen dabei natürlich zusätzlich vom Einsatzgebiet des Fahrzeuges ab. Im Rahmen der Forschung werden Systeme benötigt, die erhebliche Mengen an Daten erfassen und speichern können. Die Systemkosten spielen ebenso wie der Montageaufwand eine untergeordnete Rolle, so dass hochwertige Elektronik zum Einsatz kommen kann. In Flottenversuchen werden dagegen bereits eine Vielzahl von Fahrzeugen eingesetzt. Hier sollen die Forschungsergebnisse auf der einen Seite verifiziert werden, auf der anderen Seite soll die Machbarkeit von Lösungen erprobt werden. Das BMS muss dann bereits ‘seriennah’ aufgebaut sein, Montage und Service dürfen keine Probleme verursachen, die Kosten sind zu minimieren.

[Fre95] sieht die Kosten des BMS bei 15%-25% der Batteriekosten. In Flottenversuchen müssen auch erhebliche Datenmengen der Auswertung zur Verfügung stehen. Serienlösungen dagegen müssen kostenminimiert sein und haben nur eingeschränkt Statusdaten zu verwalten. Entwicklungsschritte der Batterietechnologie haben immer direkt Auswirkungen auf die Anforderungen, die an das zum Einsatz kommende BMS gestellt werden. Am Beispiel der Modulfertigung von NiMH Batterien kann beobachtet werden, wie mit zunehmender Serientauglichkeit die hardwaregestützte Einzelzellenüberwachung (direkte Messung jeder Zellenspannung) durch eine softwaregestützte Lösung (Schluss auf Einzelzelle über algorithmengestützte Auswertung des Modulverhaltens) abgelöst wird.

Um ein optimales Batterieverhalten zu erhalten, ist die Schaffung eines gleichen elektrischen Betriebsverhaltens aller Batteriemodule notwendig, denn das schwächste Modul bestimmt das Batterieverhalten. Nur durch Schaffung eines guten Betriebsverhalten für das schwächste Einzelmodul kann eine hohe Lebensdauer und Wirtschaftlichkeit der Traktionsbatterie erreicht werden.

Am untersuchten VW Golf CitySTROMer konnte beobachtet werden, dass sich der Austausch einzelner defekter Module durch neuartige gleichen Typs auf die neuen Module nachteilig auswirkt. Die älteren Module haben bereits einen Alterungsprozess durchlaufen und daher geringere entnehmbare Kapazitäten als die neuen Module. Die neuen Module werden in der Regel nicht mit ihrer vollen entnehmbaren Kapazität zykliert. Daraus folgt, dass aktive Masse nicht umgewandelt wird und je nach Batterietyp kann das unterschiedliche Effekte, auf jeden Fall aber eine verkürzte Zyklenlebensdauer gegenüber gleichartigen Modulen in komplett ausgetauschten Batteriesätzen hervorrufen. [Prü95] verdeutlicht die Problematik der unterschiedlichen Modulkapazitäten innerhalb eines Batteriesatzes sehr deutlich (**Abb. 3. 1**)

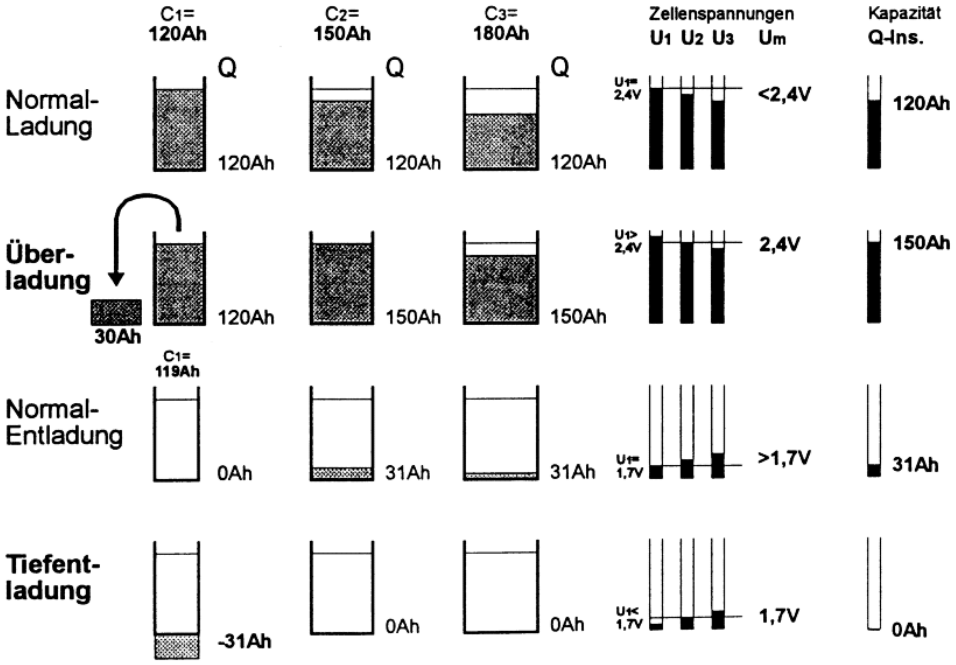


***Abb. 3. 1**: Problematik unterschiedlicher Modulkapazitäten nach [Prü95]*

Zur Sicherstellung eines optimalen Batterieverhaltens müssen folgende Forderungen der Batterie erfüllt sein:

- Batterietemperierung im Betriebsbereich,
- Temperaturausgleich zwischen allen Modulen,
- Zellenspannung innerhalb zulässiger Grenzen,
- Strombegrenzung als Tiefentladungsschutz und
- Lade- und Entladeprozeß im vorgeschriebenen Rahmen.

Diese Forderungen müssen vom BMS erfüllt werden. Weitere Ziele des Einsatzes von BMS sind die **Erhöhung der Zuverlässigkeit**, der **Wirtschaftlichkeit** und der **Reichweite** von Elektrofahrzeugen. Dazu müssen Möglichkeiten des Eingriffs in den Antriebsstrang durch das BMS bzw. Möglichkeiten der Kommunikation des BMS mit dem verantwortlichen Fahrzeugsteuergerät (Vehicle Management Unit - VMU) bestehen.

Im allgemeinen stehen dem BMS die folgenden batteriebezogenen Größen zur Verfügung:

- Batteriemodul- bzw. Zellenspannungen,
- Batteriestrom und
- Batterietemperaturen.

Die Auswertung dieser physikalischen Größen durch das Batteriemanagement muß zur Erfüllung der oben genannten Anforderungen führen. Antriebsbatterien dürfen nur in einem bestimmten Umgebungstemperaturbereich betrieben werden. Im Betrieb muß ein Temperaturausgleich aller Module angestrebt werden. Nur dann werden die einzelnen Batteriemodule ein ähnliches Alterungsverhalten aufweisen und keine Streuungen im Betriebsverhalten auftreten. Zur Sicherstellung zulässiger Betriebsbereiche gehört ebenfalls eine Steuerung des Lade- und Entladevorganges durch das Batteriemanagementsystem. Informationen über den Betriebszustand sind dem Fahrer bzw. Servicetechniker anzuzeigen.

Weder die Traktionsspannung für Elektrostraßenfahrzeuge, noch die Leistungen einzelner Traktionsmodule sind momentan einer Normung unterworfen. Vielmehr handelt es sich bei jedem Fahrzeug um zum Einsatz kommende individuelle Batterielösungen. Der Batteriehersteller als Zulieferer des Fahrzeugherstellers konfektioniert die der Produktion entnommenen Einzelzellen zu einem Batteriepack. Aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten dürfen für das Batteriemanagement keine individuellen Lösungen entworfen werden, vielmehr müssen auch die Komponenten des Batteriemanagements modular strukturiert sein. Moderne Batteriemanagementsysteme werden deshalb dezentral aufgebaut. Die Kommunikation der einzelnen Komponenten erfolgt dann über ein Bussystem, vorzugsweise bei europäischen Lösungen über den CAN-Bus. Die Batteriehersteller haben erkannt, dass das BMS als Teil des Batteriesystems aufzufassen ist und entwickeln deshalb eigene Systeme. Zunehmend wichtiger wird die Speicherung von Betriebsdaten zu Diagnosezwecken und zur Regulierung von Gewährleistungsansprüchen.

Die Betriebsdatenspeicherung muß im BMS innerhalb eines nichtflüchtigen Speichers erfolgen. Die Wahl des Speichers hängt wieder von der Applikation ab. Geringere Messraten lassen EEPROM oder batteriegepuffertes RAM sinnvoll erscheinen. In Forschungsfahrzeugen mit hohen Messraten sollten die Messdaten dagegen im Flash abgelegt werden. Im Gegensatz zur Funktionalität der Betriebsführung der Batterie kann es sich bei Diagnosedaten nicht ausschließlich um Firmware des Batterieherstellers handeln. Dieser Teil der Software des BMS muss vom Fahrzeughersteller/Systemverantwortlichen verantwortet werden, da er die Gewährleistungsansprüche zu prüfen hat. Diese Überlegung zeigt eine weitere Möglichkeit der Dezentralisierung. In einer zentralen und batterieunabhängigen Vehicle Management Unit (VMU) werden die Daten gespeichert, die dem Komplex ‘Gewährleistung’ zuzuordnen sind. Das setzt wieder voraus, dass die batterierelevanten Daten über einen extern zugänglichen Datenbus kommuniziert werden. Allein diese Überlegungen verdeutlichen zum einen die Notwendigkeit dezentraler Systeme, zum anderen aber auch die Notwendigkeit der Normung von Kommunikationsschnittstellen im Fahrzeug. Die Frage der Datenvorverarbeitung durch das BMS ist von Seiten der Batteriehersteller und der Fahrzeughersteller intensiv zu diskutieren.

Schöpe [Scö94] beschreibt in einem Zustandsdiagramm insgesamt vier mögliche Zustände des Batteriemanagementsystems für Elektrofahrzeuge. Diese sind in **Abb. 3. 2** dargestellt.

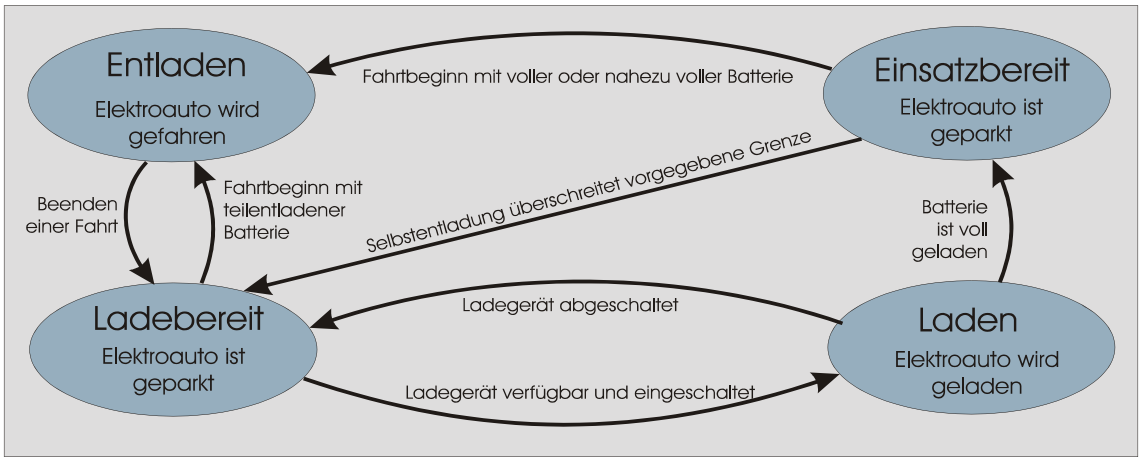


Abb. 3. 2: Zustände des BMS eines EV nach [Scö94]

Die im Kapitel 5 beschriebenen Systeme vereinfachen dieses Zustandsdiagramm auf drei mögliche Zustände. Laden, Entladen und Bereitschaft. Im Zustand der Bereitschaft misst das BMS die Ruhespannung und die Dauer der Bereitschaft seit dem Wechsel in den Zustand. Aus diesen Informationen wird bedarfsgesteuert in den Zustand ‘Laden’ gewechselt, wobei das Ladegerät vom BMS in einen der Zustände ‘Hauptladung’, ‘Nachladung’ oder ‘Erhaltungsladung’ geführt wird. Diese einzelnen Anforderungen an Batteriemanagementsysteme bezüglich der beiden Hauptzustände ‘Laden’ und ‘Entladen’ sollen nun detaillierter beschrieben werden.

3.1.2 Überwachung von Ladung und Entladung

Die Einhaltung der spezifischen Ladekennwerte ist für die Batterielebensdauer von elementarer Bedeutung. Das BMS führt auch während des Ladevorganges die Temperaturmessungen durch, steuert die Batterieklimatisierung und erfasst die Betriebsdaten. Auch das Ladegerät wird vom BMS kontrolliert. Das BMS tauscht mit dem Ladegerät (z.B. über CAN) Ladeparameter und Messdaten aus. Aus den bereits angestellten Überlegungen zur Minimierung der Kosten eines BMS ist es sinnvoll ein Ladegerät zu integrieren, dem als Führungsgröße der Strom vorgegeben wird. Mit einem stromgeführten Ladegerät und der Erfassung von Strom, Spannung und Temperatur lassen sich prinzipiell die gebräuchlichen Ladekennlinien gängiger Batteriesysteme realisieren.

Das BMS stellt dann für den Ladevorgang einen übergeordneten Master in einem System verteilter Intelligenz dar, das Ladegerät repräsentiert einen Slave. Während des Ladevorganges muss das BMS ständig sämtliche Modulspannungen auswerten. Am Ende des Ladevorganges können besonders schwache (noch unvollständig geladene) Batteriemodule detektiert und durch spezielle Ausgleichsladungen ‘nachträglich aufgefrischt’ werden.

Dieses nachträgliche Auffrischen einzelner noch nicht geladener Zellen ist jedoch im Fahrzeug mit einem erheblichen Aufwand verbunden. Prinzipiell müsste ein Ladegerät an jedes Modul selektiv anschaltbar sein. Dieses Ladegerät müßte mit einem möglichst großen Nachladestrom arbeiten können, damit die Ladezeit nicht übermäßig verlängert wird. Günstiger ist es, wenn jedes Modul bereits während der Hauptladephase individuell behandelt werden kann. Durch diese Individualisierung der Ladevorgänge ist sichergestellt, dass keine Verlängerung der Ladezeit durch individualisierte Nachladephasen eintritt. Der Ladevorgang endet, wenn das schwächste Modul den Vollladezustand erreicht hat. Der Bestimmung des Vollladezustandes kommt im Rahmen des Batteriemanagements eine entscheidende Bedeutung zu. Gutekunst [Gut91] beschreibt in seiner Arbeit unterschiedliche Verfahren für den Einsatz von NiCd-Zellen. Neben der Ladungsbilanzierung schlägt er die Auswertung des zellinternen Drucks und der Batterietemperatur vor. Die Kombination aus Ladungsbilanzierung, Temperaturauswertung und der Spannungsüberwachung nach dU/dt ist für Nickel-basierte Systeme zur Erkennung des Vollladezustandes ratsam.

Bei Bleizellen kann der Druck zur Bestimmung des Erreichens der Gasung herangezogen werden. Die Standardladeverfahren nach IU oder IUIa führen jedoch zu keinem auswertbaren Druck- oder Temperaturmaximum zum Ladeschluss. Abbruchkriterium ist hier das Erreichen eines festgelegten Minimalstromes. Ein reales BMS wird immer den Kompromiss aus maximaler Batterieüberwachung und Wirtschaftlichkeit suchen, so dass bei vielzelligen Modulen auf die Auswertung aller Zelltemperaturen zugunsten der einiger Musterzellen verzichtet werden wird.

Es existieren unterschiedliche Ansätze diesen Vollladezustand aller Module zu erreichen. Franke [Fra99] beschreibt das Verfahren von Kotkut, Divan und Novotny. Hierbei erfolgt die Einteilung des Ladeprozesses in eine Hauptladephase und anschließende Nachladephase. In der Hauptladephase wird die gesamte Batterie vom Hauptladegerät bis zum Erreichen der Gasungsspannung durch das erste Modul geladen. Während der anschließenden Nachladephase ist das Hauptladegerät abgeschaltet und die einzelnen Module werden individuell nachgeladen. Das

geschieht über einen als Coaxial Winding Transformator (CWT) bezeichneten Transformator, andere Verfahren gehen von separaten DC-DC Wandlern je Modul aus, die dann die individuell benötigte Leistung für jedes Modul bereitstellen. Im Versuchsfahrzeug cityEL wurde testweise ein solches System integriert. Durch dieses System war es möglich, Batterien unterschiedlicher Hersteller und unterschiedlichen Alterungszustandes im Fahrzeug zu kombinieren und dann bezüglich des Betriebsverhaltens Vergleiche anzustellen. Für den normalen Betrieb wird die Batterieladung jedoch mit einem zentralen Ladegerät durchgeführt. Verfahren zum Ladungsausgleich werden in Abschnitt 3.1.7 detaillierter erörtert.

Bei der Entladung muss das Batteriemanagement zum Ende des Entladevorganges dafür Sorge tragen, dass keine Modulspannung unter die Tiefentladungsgrenze zusammenbricht. Ansonsten muss das Batteriemanagement sofort wie in **Abb. 3. 3** in den Fahrstromkreis eingreifen und den Batteriestrom auf zulässige Werte begrenzen. Damit werden Tiefentladungen weitestgehend vermieden und der Fahrer kann noch mit verminderter Leistung weiterfahren. Dieses Verfahren wird auch als limp-home bezeichnet.

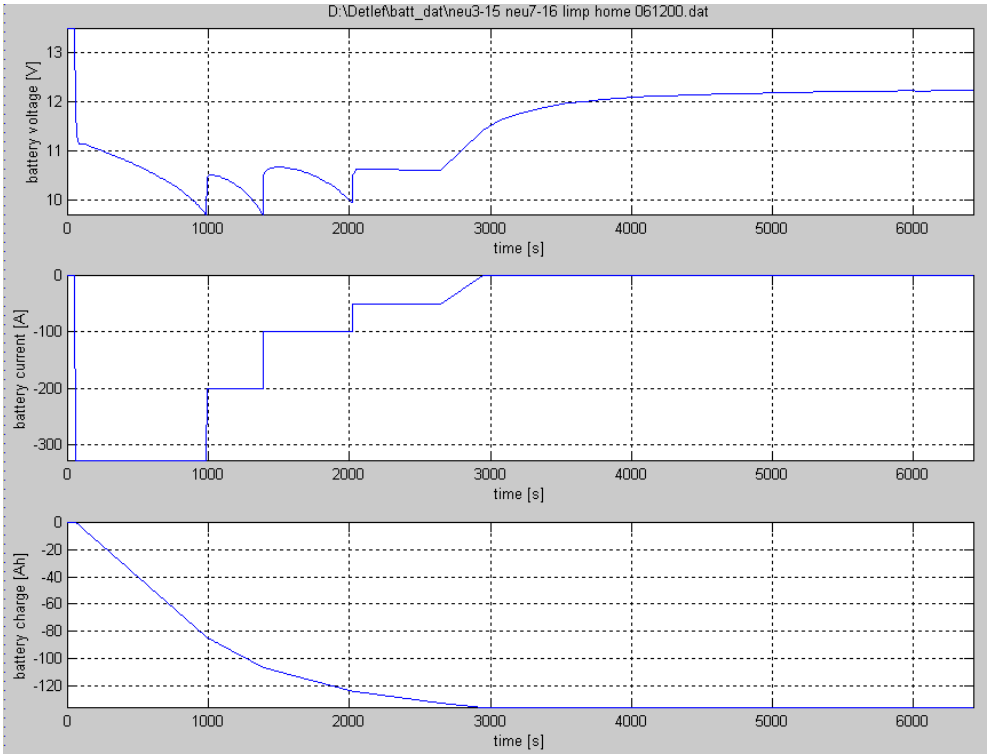


Abb. 3. 3: *Ergebnis eigener Laborversuche zur Entladung mit vermindertem Strom nach dem Erreichen der Entladeschlussspannung.*

Im Laborversuch wurden zwei in Reihe geschaltete Blei-Gel Module mit je 6 V/160 Ah bis zur Entladeschlussspannung mit Konstantstrom entladen und dann mit vermindertem Strom weiterhin entladen. Beim erneuten Erreichen der Entladeschlussspannung wurde der Strom erneut dezimiert. Es ist erkennbar, dass bei vermindertem Strom noch eine erhebliche Restla-

dung schädigungsfrei entnehmbar ist. Im Fahrzeug wird das BMS den maximal entnehmbaren Strom bestimmen bzw. festlegen und die Einhaltung überwachen. Im Kapitel 5 werden die Ergebnisse der Stromabregelung und des limp home im realen Fahrzyklus beschrieben. Die Limitierung des Entladestromes muss dem Fahrer durch ein Signal dargestellt werden, da sich das Fahrverhalten bei eingeschalteter Leistungsbegrenzung erheblich ändert. Für besondere Gefahrenmomente ist ein Kick-down zur temporären Abschaltung der Begrenzung sinnvoll. Der entnehmbare Maximalstrom wird vom BMS nicht nur in Abhängigkeit von der Batteriespannung, sondern auch von der Batterietemperatur festgelegt. Das Prinzip der Auswertung des Fahrpedals zeigt **Abb. 3. 4**.

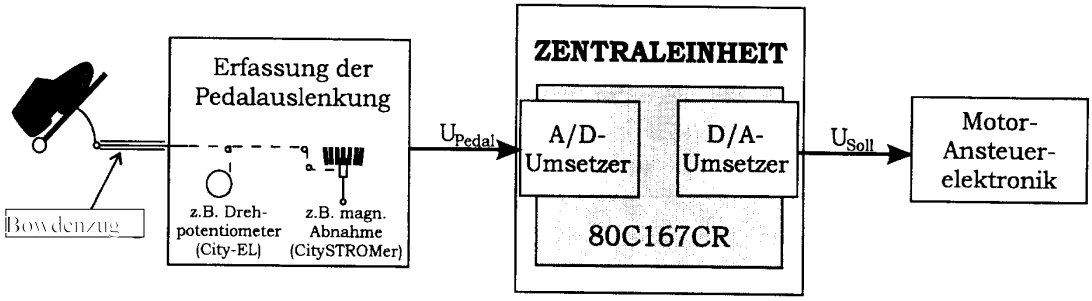


***Abb. 3. 4**:* *Eingriff des Batteriemanagementsystems in den Fahrstromkreis zur Vermeidung von Tiefentladungen [Rei97]*

3.1.3 Ladeverfahren für Traktionsbatterien

Allgemein kommt es beim Laden darauf an, die **richtige** Ladungsmenge mit der **richtigen** Stromstärke in den Akkumulator fließen zu lassen. Dabei haben sich für **unterschiedliche** Batteriesysteme aufgrund **unterschiedlicher** Technologien **unterschiedliche** Ladeverfahren als günstig herausgestellt. Die Steuerung und Überwachung des Ladeprozesses ist eine Teilaufgabe des Batteriemanagements. Die gängigen Ladeverfahren werden deshalb an dieser Stelle in ihren Charakteristiken erläutert und speziell für offene und geschlossene Bleibatterien vorgestellt. Die Steuerung des bordeigenen Ladegerätes ist für das BMS im Straßenfahrzeug eine wichtige Aufgabe zur Erzielung einer größeren Batterielebensdauer und damit zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit.

Ein Ladeverfahren muss **batterieschonend, bedienungsfreundlich**, **zuverlässig** und **kostengünstig** sein. Dabei ist jedes Ladeverfahren ein **Kompromiss aus technischem Aufwand, erforderlicher Ladezeit** und **der Lebensdauer der Batterie,** da das Ladeverfahren die Alterung mitbestimmt. Dabei können viele Lösungen "richtig" sein.

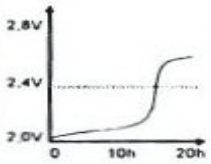
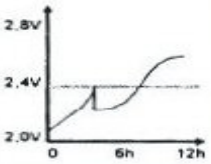
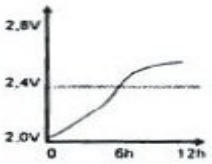
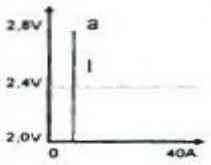
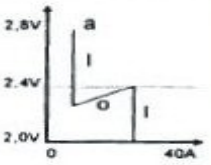
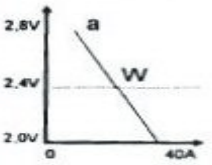
Hier fällt auf, dass alle genannten Eigenschaften nicht eindeutig definiert sind, sondern ein breites "Erfahrungswissen" voraussetzen, das z.B. in Fuzzysystemen berücksichtigt werden kann. Unterschiedliche Batteriesysteme benötigen dann unterschiedliche Regelbasen. Zum Beispiel ist der Absolutwert der Spannung für Blei-Säure Batterien ein hartes Abschaltkriterium, für NiMH Batterien dagegen nur ein zusätzliches, die Sicherheit erhöhendes Kriterium. Für

NiCd-Zellen gibt es bereits Untersuchungen über Fuzzy-Ladeverfahren [SGS94]. Generell sind diese Verfahren jedoch vom Hersteller freizugeben.

Moderne Ladegeräte müssen ein sogenanntes 'Chemistry-Independent Charge Management' aufweisen. Das setzt einen Microcontroller als zentrales Steuerungselement voraus. Eine Datenerfassung muß kritische Betriebszustände erfassen können. Bei mehrzelligen Batterien müssen dementsprechend eine große Anzahl analoger Daten erfasst werden können. Prinzipiell müssen Spannungen, Temperaturen und Ströme einer Auswertung durch den Microcontroller zugänglich gemacht werden. Eine Temperaturkompensation benötigter Referenzspannungen wird unabdingbar, damit temperaturabhängige Größen wie die Gasungsspannung bei Bleibatterien genau festlegbar und regelbar sind [Beh99].

Für ein bestimmtes Batteriesystem wiederum sind verschiedene Ladeverfahren denkbar. Diese sind von der Applikation und dem für die Einhaltung der zulässigen Betriebszustände tolerierbaren Messaufwand, aber auch der zur Verfügung stehenden Anschlussleistung abhängig. Die folgenden Abschnitte zeigen für unterschiedliche Batteriesysteme für Elektrotraktionsanwendungen mögliche Ladeverfahren. Am Beispiel von Bleibatteriesystemen sind bisher gebräuchliche Ladeverfahren in **Abb. 3. 5** zusammengestellt.

Da die Batteriespannung bei Elektrostraßenfahrzeugen nicht genormt ist, benötigt jedes Fahrzeug ein eigenes individuelles Ladegerät, das normalerweise an das übliche 230V-Netz angeschlossen wird. Zur Ladung einer Batterie sind einige allgemeine Hinweise zu beachten. Das Laden ist nur innerhalb bestimmter Temperaturgrenzen gestattet. Über 40 ˚C darf nur noch eingeschränkt, oberhalb 50 ˚C gar nicht mehr geladen werden. Die Überwachung der Betriebstemperaturen und Eingriffe in den Ladevorgang müssen durch das BMS erfolgen.

LADUNG	I a	I o I a	W a
BESCHREIBUNG	Ladung mit konstantem Strom *(Volladung wird erreicht)*	bis zur Gasungs-spannung Ladung mit hohem konst. Strom, danach Umschaltung auf niedrigen konst. Strom *(Volladung wird erreicht)*	kontinuierlicher Abfall des Lade-stromes auf 50% beim Erreichen der Gasungsspannung, bis auf 25% bei der Nachladung *(Volladung wird erreicht)*
STROMSTÄRKE pro 100Ah Batterie-Kapezität	max. 5A	erst 20A bis 40A dann max. 5A	10A bis 16A am Anfang
LADEZEIT ca.	20h	(bei 20A) 10h	11h bis 14h
SPANNUNGS-VERLAUF			
KENNLINIE DES LADEGERÄTES Ladestrom, Ladespannung			
ANWENDUNG	offene Batterien (z.B. Starterbatterie)	offene Batterien	nur für offene Batterien

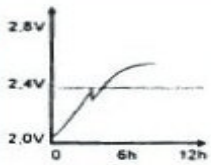
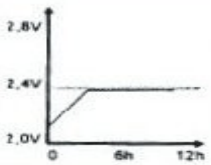
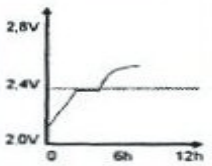
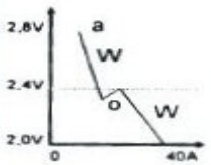
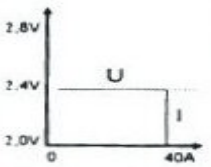
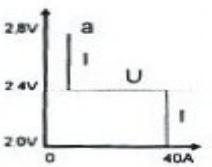
LADUNG	W o W a	I U	I U I a
BESCHREIBUNG	Ladung mit abfal-lendem, abgesetz-tem Strom, Prinzip wie bei Wa, Umschaltung beim Erreichen der Gasungsspannung *(Volladung wird erreicht)*	Ladung mit konst. Strom bis zum Erreichen der Gasungsspannung, danach Umschal-tung auf konstante Spannung *(Volladung erst nach über 15h)*	Ladungsbeginn wie bei IU, beim Erreichen eines kleinen Stromes wird mit diesem konstant weiter-geladen *(Volladung wird erreicht)*
STROMSTÄRKE pro 100Ah Batterie-Kapezität	20A bis 40A am Anfang	bis zu 40A (25A optimal)	erst 20A bis 40A dann max. 5A
LADEZEIT ca.	7h bis 10h	95% nach 8h	7h bis 9h
SPANNUNGS-VERLAUF			
KENNLINIE DES LADEGERÄTES Ladestrom, Ladespannung			
ANWENDUNG	nur für offene Batterien	geschlossene und offene Batterien	geschlossene und offene Batterien

***Abb. 3. 5**: Ladeverfahren für Bleibatterien [Nau97]*

Der Ladealgorithmus muss so gestaltet sein, dass eine für die Batterie schädliche Gasung vermieden wird. Im Abschnitt 2.2.1 wurde das Ladeverhalten bereits skizziert. Dabei wurde erläutert, dass eine Sauerstoffgasung der positiven Elektrode praktisch über den gesamten Ladezeitraum auftritt, die verstärkte und für die Batterie schädliche Schwellspannung jedoch oftmals beim Eintritt der Wasserstoffgasung an der negativen Elektrode festgelegt wird. Diese 'Gasungsspannung' liegt bei Bleibatterien bei Raumtemperatur bei ca. 2,4 V. Die Temperaturabhängigkeit der Gasungsspannung ist für Bleibatterien in **Abb. 3. 6** wiedergegeben.

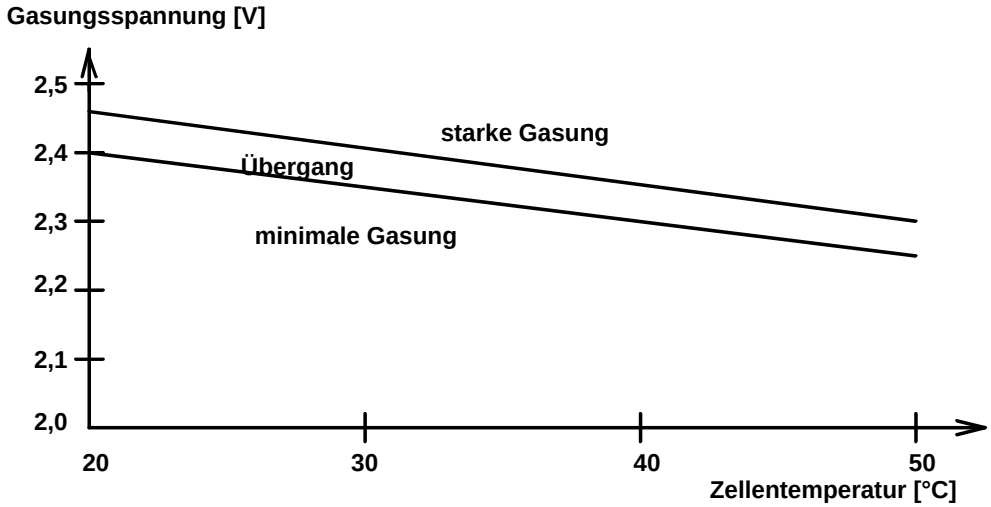


***Abb. 3. 6**: Gasungsspannung von Bleibatterien in Abhängigkeit der Zellentemperatur [Hei96]*

Generell dürfen die Batterien nicht bei Batterietemperaturen oberhalb 55 ˚C betrieben werden. Soll dennoch ein Weiterbetrieb nach einer solchen Erwärmung gewährleistet sein, so ist eine Batteriekühlung zwingend erforderlich.

Ladeverfahren für offene Bleibatterien

Für offene Bleibatteriesysteme haben sich zwei der oben aufgeführten Ladeverfahren etabliert. Es sind das WoWa- und das IUIa-Ladeverfahren. Mit beiden Ladeverfahren wird eine Volladung nach 7 bis 10 Stunden erreicht. Legt man beide Verfahren für die gleiche Gesamtladezeit aus, so muss das WoWa- Gerät für einen etwas größeren Anfangsstrom als das IUIa-Gerät ausgelegt werden. In diesem Fall sind beide Ladegeräte gleich teuer. Legt man beide Geräte für den gleichen Anfangsladestrom aus, so benötigt das Gerät nach dem WoWa-Verfahren eine etwas längere Ladedauer, ist aber aufgrund des einfacheren Aufbaus etwas billiger. Der Ladefaktor beträgt bei offenen Bleibatteriesystemen ca. 1,2. Offene Bleibatterien sollten wegen der erhöhten Alterung nicht schnell geladen werden. Während der Ladung und der Entladung erwärmt sich die Batterie, diese Verluste werden im einfachsten Fall durch den Innenwiderstand der Batterie modelliert.

Die Erhaltungsladung, über den zweiten I-Anteil im IUIa-Verfahren realisiert, kann für eine dauerhafte Gasung verantwortlich sein. Der Erhaltungsladestrom sollte prinzipiell so gewählt werden, dass die Batterie nicht gast (2,23 V/Zelle; üblicherweise als Erhaltungsladespannung

bezeichnet). Bei offenen Batterien führt die Gasentwicklung zu einem Wasserverlust im Elektrolyten, der durch Wartungsarbeiten wieder ausgeglichen werden muss. Man kann davon ausgehen, dass pro Ah Erhaltungsladestrom bei voll geladener Batterie ca. 0,336 g Wasser verbraucht wird [Var86]. Diese für Bleibatterien eigentlich ungewollte Gasung hat jedoch den positiven Nebeneffekt der Durchmischung des Elektrolyten. Ein ungewollter Effekt bei häufig zyklierten und mit geringerer Ladespannung geladenen Batterien ist eine starke Schichtung der Säure. Die Funktion der Zelle ist zwar prinzipiell nicht gefährdet, bei unterschiedlicher Säuredichte bilden sich unterschiedliche Stromdichten in der Zelle aus, was zu einer Verminderung der Lebensdauer führt. **Abb. 3. 7** zeigt schematisch die Ausbildung der Säureschichtung bei häufiger Zyklierung. Nimmt man eine Zelle mit einer homogenen Säuredichte an, so kann nach dem Entladen festgestellt werden, dass im unteren Bereich unterhalb der Elektroden eine höhere Säuredichte vorliegt als im oberen Bereich. Lädt man die Zelle nun ohne eine Durchmischung des Elektrolyten wieder auf, so kann beobachtet werden, dass die Säuredichte oberhalb der Platten geringer ist als zwischen den Platten. Prinzipiell muß jetzt vor dem Beginn der nächsten Entladung eine Durchmischung stattfinden. Durch stärkere Gasung, hervorgerufen durch einen größeren Erhaltungsladestrom, bilden sich während der Gasungsphase Gasblasen, die zu einer Konvektion und damit Homogenisierung der Säuredichte beitragen. In der Praxis ist für den eingesetzten offenen Batterietyp der Kompromiss aus erwünschter Vermeidung der Säureschichtung und dem durch Gasung erhöhten Wartungsaufwand zu finden.

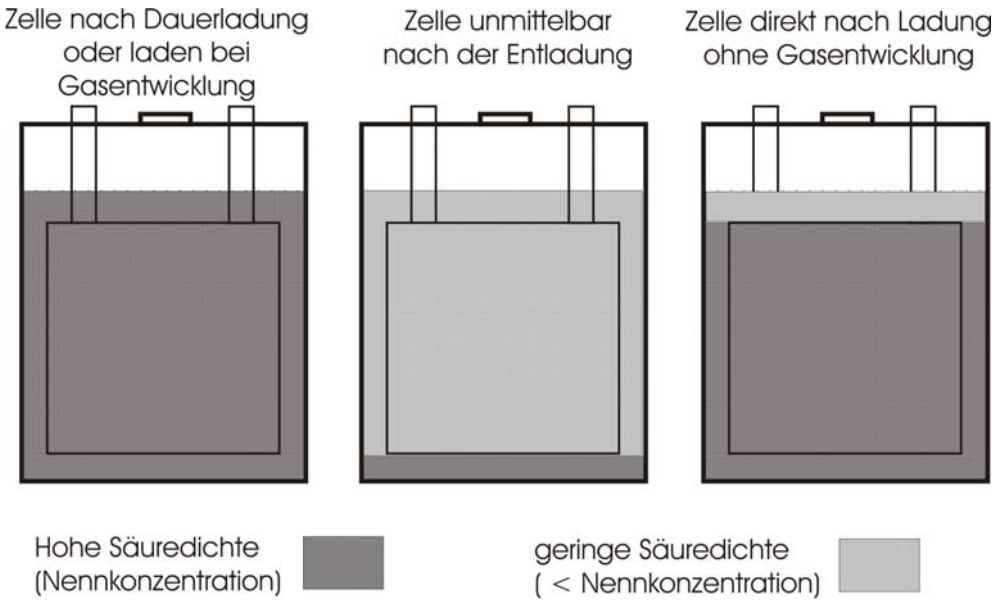


Abb. 3. 7: *Prinzip der Säureschichtung*

Ladeverfahren für geschlossene Bleibatterien (Blei-Gel-Batterien)

Geschlossene Blei-Gel-Batterien dürfen nicht gasen. Beim Laden wird jedoch gerade während der ersten hundert Zyklen mehr Wasser zersetzt als in der gleichen Zeit rekombinieren kann. Dadurch entweicht etwas Gas über das Überdruckventil der Zellen. Dieses zersetzte Wasser ist unwiederbringlich verloren. Das Ziel eines jeden Ladeverfahrens für wartungsfreie Batterien ist

deshalb die Vermeidung des Wasserverlustes. Nimmt man ein IUIa-Verfahren an, so ergeben Messungen, dass der Öffnungsdruck des Überdruckventils bereits vor dem Erreichen der Gasungsspannung von 2,4 V erreicht wird und das Überdruckventil öffnet. Während der U-Phase ist es wieder geschlossen, um in der anschließenden I-Nachladephase trotz der geringen Ströme schnell wieder zu öffnen. Bei älteren Zellen mit besserer Rekombinationsfähigkeit aufgrund der bereits angesprochenen Risse und Poren verbessert sich das Verhalten etwas. Aufgrund der geschilderten Probleme werden geschlossene Bleibatterien nach dem WoWa- oder dem IU-Verfahren geladen.

Nachteilig am IU-Verfahren ist die Tatsache, dass eine Vollladung erst nach ca. 15 Stunden erreicht wird. Allerdings sind 95% der Kapazität bereits nach ca. 8 Stunden Ladezeit verfügbar.

Zur Umgehung der längeren Ladezeiten des IU-Verfahrens bezüglich der Vollladung hat EXIDE ein neues Ladeverfahren für geschlossene Bleibatterien freigegeben. Dabei handelt es sich um ein normalerweise nur für offene Systeme genutztes IUIa-Verfahren, bei dem trotz des Überschreitens der Gasungsspannung eine schonende und ausgeglichene Ladung aller Zellen eines Moduls erreicht wird. Den Verlauf der Ladung zeigt **Abb. 3. 8**.

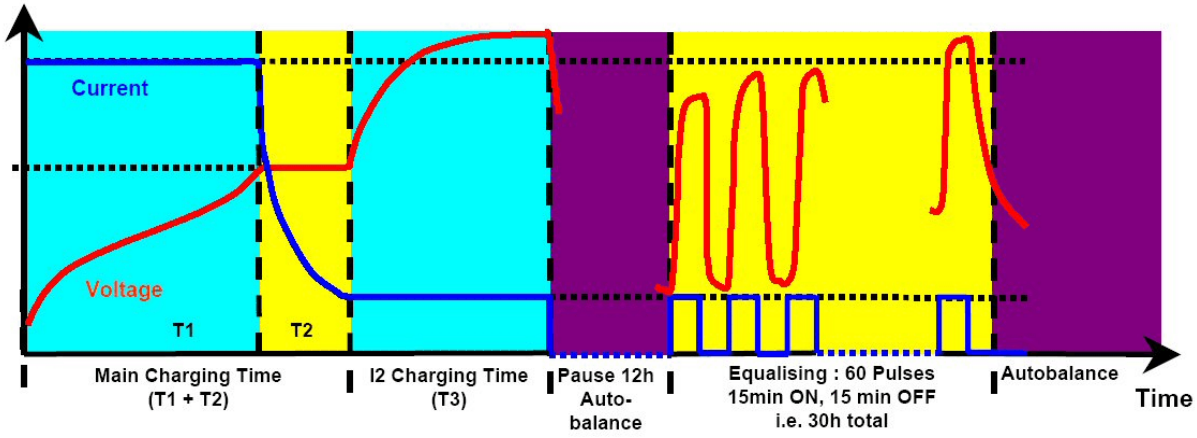


***Abb. 3. 8**: Strom- und Spannungsverlauf für EXIDE dryfit bloc Batterien [Han02]*

Am Beispiel der im Rahmen dieser Arbeit genutzten Blei-Gel Batterien 12 V/100 Ah lassen sich für den gezeigten Ladeverlauf folgende Größen ermitteln:

Batterietyp	Ladebedingungen								Autobalance		Equalizing Charge		
	I1 (A)		T1 (h)	U1	T1+T2 (h)	I2 (A)		T3 (h)	Uon	Uoff	ton	toff	ttotal
	min	max	max	Vpc	max	min	max	max	Vpc	Vpc	s	s	h
12V/100Ah	12	18	9	2,35	12	1,1	1,6	4	2,15	2,35	900	900	30

Ladeverfahren für geschlossene NiCd und NiMH Batterien

Im Bereich der Nickel-basierten Systeme sind verschiedene Ladeverfahren denkbar. NiMH

Batterien weisen ein ähnliches Ladeverhalten auf wie NiCd Batterien. Für NiMH Batterien werden generell Konstantstromladungen vorgesehen. Es gibt die Möglichkeiten der Variation des Ladestromes. Bei der Standardladung wird NiMH ca. 15 Stunden mit I_{10} geladen (NiCd ca. 12 Stunden). Die Zellen sind mit diesem Ladestrom überladefest, nachteilig ist jedoch die lange Ladezeit von ca. 12 Stunden, wenn die Batterie zuvor völlig entladen war. Teilentladene Batterien können nach diesem Verfahren geladen werden, wenn die Zellen vor dem Ladebeginn völlig entladen werden. Nachteilig an der vom Ladegerät gesteuerten Entladung vor Ladebeginn ist die zusätzliche Zyklierung und der Energieverlust der Zelle, aufgrund der vollständigen Umwandlung aktiver Masse ist ein bei NiCd Batterien zu beobachtender Memoryeffekt jedoch ausgeschlossen. Bei einer Ladung mit I_{10} ist die reine I-Ladung prinzipiell mit einem Timer zu kombinieren, so dass nach erfolgter Maximalladung zur Maximierung des Wirkungsgrades eine Abschaltung erfolgt. Ist der Ladezustand der Batterie bekannt, so ist es möglich die benötigte Energie bis zum Erreichen des Vollladezustandes timergesteuert in die Batterie einzuladen. Die Gasentwicklung bei Überladung wird bei diesen geringen Strömen durch Rekombination ausgeglichen. Timergesteuerte Ladeverfahren haben generell den Nachteil, dass der Vollladezeitpunkt zum Beginn der Ladung bestimmt wird, also keine Rückkopplung durch den Prozess stattfindet. Es handelt sich also um eine Ladesteuerung, nicht jedoch um eine Laderegelung.

Dagegen kann beschleunigtes Laden mit 3 I_{10} bei NiMH über 5 Stunden durchgeführt werden. Bei Schnellladeverfahren besteht die Gefahr der Schädigung der Batterie, wenn sich durch den zu hohen Druck das Sicherheitsventil öffnet. Ladungen mit Strömen von 5 I_{10} bis 10 I_{10} werden als Schnellladung bezeichnet. Die Bestimmung des Abschaltpunktes ist das zentrale Problem bei der Implementierung dieses Ladeverfahrens. Zuverlässigere Verfahren benötigen deshalb eine Rückkopplung der ladezustandsabhängigen Größen der Batterie. Ein intelligenter Laderegler nutzt den Zellendruck zur Bestimmung des Vollladezustandes. Der Zellendruck gibt Auskunft über die einsetzende Sauerstoffgasung innerhalb der Zelle. Nachteilig an diesem Verfahren ist die Tatsache, dass der zellinterne Druck nur mit einem Dehnungsmessstreifen erfassbar ist. Bei vielzelligen Batterien erfordert das einen hohen messtechnischen Aufwand, der aus Kostengründen in der Regel nicht vertretbar ist. Bei der Gasung handelt es sich um eine exotherme Reaktion, so dass die Temperatur am Zellgehäuse mit einer gewissen Totzeit dem internen Druck folgt. Bei der Auswertung der Temperatur nimmt man somit eine gewisse Überladung der Zelle billigend in Kauf. Die Temperaturauswertung ist wegen der zeitlichen Verzögerung zum Zelldruck umso kritischer, je größer der gewählte Ladestrom ist. Die Zellspannung muss mit in Betracht gezogen werden. Beim Erreichen einer Zellspannung von 1,6 V/Zelle ist die kritische Grenze der Wasserstoffentwicklung z.B. für NiCd erreicht. In diesem Fall muss die Ladung unterbrochen werden. Bei der Ladung mit konstantem Strom ist für NiCd und NiMH der in **Abb. 3. 9** dargestellte Verlauf der Zellenspannung über der Zeit feststellbar. Die Steigungen der Ladekurve variieren je nach Batteriesystem. Zum Beginn der Ladung steigt die Spannung relativ stark an, um dann einen sehr flachen Verlauf anzunehmen. Bei Beginn der Überladung wird die Hauptreaktion durch die Sauerstoffgasung abgelöst. Zusammen mit dem negativen Temperaturkoeffizienten der Zellspannung (-2 mV/K...-3 mV/K) führt der Übergang zur Gasung beim Erreichen des Vollladezustandes zur Ausbildung eines dargestellten Maximums der Zellenspannung.

Die Auswertung des Maximums der Zellenspannung nimmt eine noch größere Überladung der Zelle als bei der Temperaturauswertung in Kauf. Prinzipiell müßte beim Erreichen des Wen-

depunktes der Zellenspannung die Ladung beendet werden. Messtechnisch ist die Erkennung des Wendepunktes jedoch schwieriger als die Abschaltung über das Maximum. Real wird bei dieser -dU/dt Abschaltung die Ladung nach dem Absinken der Zellenspannung um einen Betrag von ca. 10 mV/Zelle unter das Spannungsmaximum beendet.

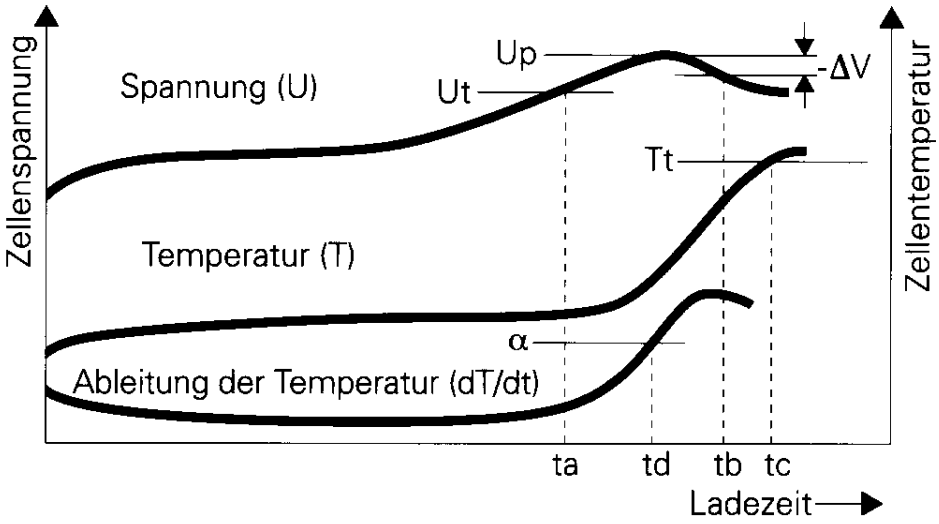


***Abb. 3. 9**: Ladecharakteristik der NiMH-Zelle [VAR97]*

Es ist anzumerken, dass die Ausprägung des Maximums sowohl ladestrom- als auch temperaturabhängig ist. Gerade bei kleinen Ladeströmen kann es vorkommen, dass die Messelektronik das Maximum aufgrund des flachen Anstieges der Zellenspannung und verrauschter Messsignale nicht oder bereits zu früh erkennt. Bei der Zusammenschaltung mehrerer Zellen zu Batterien ist es wahrscheinlich, dass nicht alle Zellen gleichzeitig ihr Maximum erreichen und somit bei der Messung der Gesamtspannung kein Maximum beim Erreichen des Vollladezustandes der ersten vollgeladenen Zelle auftritt. Zur sicheren Abschaltung der Ladung beim Erreichen des Vollladezustandes sollte deshalb neben der -dU/dt Methode noch die Temperatur oder besser der Druck überwacht werden. Beginnt die Ladung direkt nach einer Entladung, dann sollte eine gewisse Abkühlung der Batterie (ϑ_{Start} =35 ˚C) abgewartet werden. Da die positive Elektrode endothermes Verhalten aufweist wird sich ein lokales Minimum der Temperatur ausbilden. Die thermische Abschaltung, die sogenannte dT/dt Abschaltung, sollte bei einem Temperaturanstieg von 0,5 bis 1 K/min ansprechen. Bei kleineren Strömen oder verrauschten Messsignalen kann es vorkommen, dass beide Abschaltmethoden nicht ansprechen. In diesem Fall sollte ein zusätzlicher Thermoschalter den Ladevorgang abbrechen. Als Abschaltkriterium kann zum Beispiel bei den im Labor untersuchten NiMH Batterien 12 V/95 Ah ein Temperaturanstieg von $\Delta\vartheta$ = 8 K verwendet werden. Sorgt das Batteriemanagementsystem für eine Vergleichmäßigung der Zelltemperaturen und ist die Charakteristik der Temperaturverteilungen innerhalb des Moduls bekannt, so kann auf eine Temperaturüberwachung aller Einzelzellen verzichtet werden. Es kann dann die Messung von Referenztemperaturen ausreichen.

Abb. 3. 10 zeigt bei einem 7,2 V/6,5 Ah NiMH Modul, wie es im Toyota Prius der ersten Generation eingesetzt wurde, das deutlich ausgeprägte Maximum des Spannungsverlaufs.

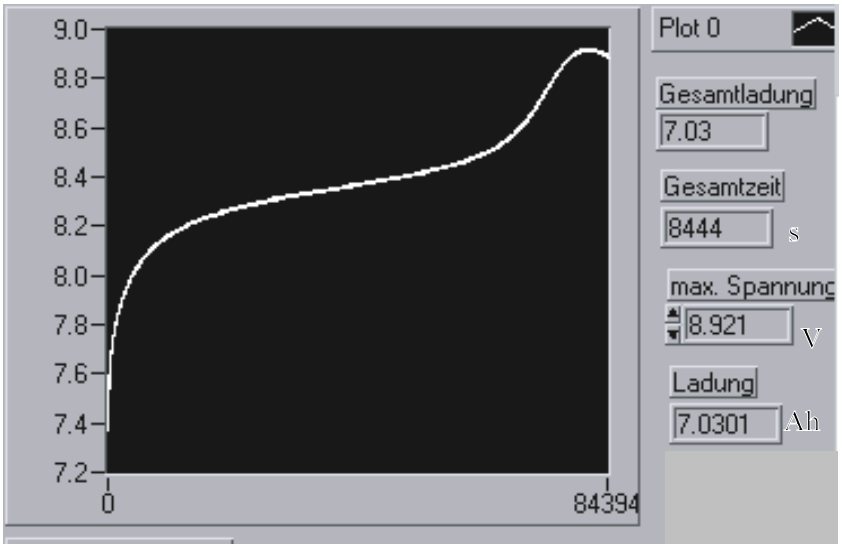


***Abb. 3. 10**: Realer Verlauf an einem Panasonic 6,5 Ah Modul bei Ladung mit 3 A [eigene Messung]*

Sowohl bei neuen als auch bei alten Modulen zeigten sich bei der Ladung mit hohen konstanten Strömen ausgeprägte Maxima. Diese Hochleistungszellen sind jedoch nicht für den Zyklenbetrieb entwickelt, sondern für power-assist Applikationen. Damit werden im realen Betrieb hohe Anforderungen in Bezug auf die Ladezustandsbestimmung an das BMS gestellt.

Ein anderer Ansatz zur Schnellladung von NiCd Zellen wurde von der Firma Robert Bosch bei der Entwicklung des Schnellladegerätes AL12FC gewählt. Es handelt sich um ein Ladegerät, welches innerhalb von 12 Minuten eine Vollladung von NiCd Zellen für Elektrowerkzeuge erzielt. Das Problem bei derart kurzen Ladezeiten mit den daraus resultierenden hohen Strömen ist eine dauerhafte Schädigung der Batterie bei Überladungen im Bereich einer Minute und eine Kapazitätsminderung bei Unterladung. Beschriebene Konstantstromladungen sind bei so kurzen Ladezeiten gefährlich, da eine Auswertung des Spannungsverlaufes (du/dt) oder des Temperaturverhaltens (T_{abs} oder dT/dt) wie beschrieben immer eine Überladung in Kauf nehmen. Gerade bei der Auswertung des Temperaturverhaltens können große Probleme auftreten, da die gemessene Temperatur sehr stark vom Montagepunkt des/der Sensors/Sensoren abhängt. Der genannte Schnelllader nutzt zur Bestimmung des Abschaltpunktes (shut-off point) einen Fuzzycontroller mit den Eingangsvariablen '*Temperatur*', '*Temperaturanstieg*', '*Spannung*' und '*Spannungsänderung*'. Über eine aus acht Regeln bestehende unvollständige Regelbasis wird der Ladestrom bestimmt. Der maximale Ladestrom für die eingesetzten Elektrowerkzeuge war auf 6A beschränkt. Adaptiert man das Verfahren auf Batterien für Elektrostraßenfahrzeuge, so kann die Stromversorgung nicht mehr über die normale Haushaltsversorgung erfolgen, da die benötigten Ladeströme zu groß sind.

Ladeverfahren für Li-Ion-Batterien

Prinzipiell werden Li-Ionen Batterien nach dem IU-Verfahren geladen. Es wurden aber auch Versuche mit einer gepulsten I-Ladung unternommen. Dabei wurde ein PWM-Signal mit konstanter Stromamplitude generiert, bei dem die Pulsdauer so ausgelegt ist, dass die maximal zugelassene Ladespannung (bei reiner U-Ladung) nicht überschritten wird. Die Messungen an Li-Ion Batterien wurden an Gerätebatterien durchgeführt, da zum Zeitpunkt der Messungen keine Batterien für ESF-Anwendungen zur Verfügung standen. Die Prinzipien der Ladetechnik sind jedoch übertragbar. Aufgrund von Fertigungstoleranzen und unterschiedlicher Alterung muss für Li-Ion- Module jeweils eine Einzelzellenüberwachung vorgesehen werden.

Ladeverfahren für ZEBRA-Batterien

Für die ZEBRA-Batterie sind zwei unterschiedliche Ladeverfahren denkbar, die vom Steuergerät parametriert und überwacht werden. Neben der Normalladung der Batterie ist die ZEBRA-Batterie auch schnellladefähig. Als Normalladung ist eine IU-Ladung vorgesehen. Der zeitliche Verlauf einer Normalladung ist in **Abb. 3. 11** dargestellt.

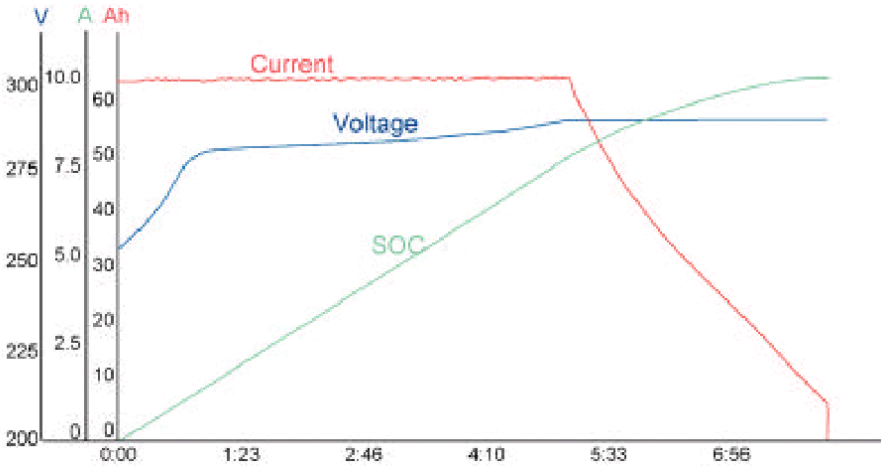


***Abb. 3. 11**: Ladekennlinie ZEBRA-Batterie [Böh98]*

Das Batteriemanagement gibt über den CAN-Bus die Regelgröße an das Ladegerät. Als Regelgröße wird die Batteriespannung verwendet, wobei eventuell kurzgeschlossene Zellen berücksichtigt werden. Die Regelgröße wird vom Steuergerät anhand verschiedener Parameter berechnet. Das Ladeverfahren kann somit als U-Verfahren bezeichnet werden.

Ladeverfahren für Ultracaps

Im Kapitel 2 wurde bereits beschrieben, dass Ultracapmodule für den Einsatz im Fahrzeug aus Reihenschaltungen einzelner Ultracaps realisiert werden müssen, die geforderte Betriebsspannung ist die Grundlage zur Bestimmung der Anzahl der in Serie geschalteten Ultracaps.

Ultracaps können prinzipiell mit beliebigen Strömen geladen werden, da es sich bei den Ul-

tracaps vom Prinzip her um Kondensatoren handelt. Limitiert wird die Ladung durch die maximal (kurzzeitig) zulässige Spannung von ca. 2,8 V pro Zelle und die maximale Temperatur von 70 ˚C.

Die Fertigungs- und Kapazitätstoleranzen der Ultracaps sind noch nicht mit denen von Batterien vergleichbar. So gibt Epcos für den leistungsstärksten Typ B49410B2276Q000 (2700 F/2,5 V) Toleranzen der Kapazität in der Höhe von -10...+30 % an. Die Isolationswiderstände der Einzelkondensatoren können ebenfalls sehr unterschiedlich sein. Daraus resultiert, dass die Spannungsverläufe der einzelnen Ultracaps im Modul sehr unterschiedlich sein können. Die Anzahl der in Reihe geschalteten Ultracaps sollte so gewählt sein, dass die mittlere Betriebsspannung der einzelnen Ultracaps ca. 85% der Nennspannung beträgt. Damit kann statistisch eine Überladung einzelner Kondensatoren verhindert werden. Im Betrieb mit hohen Stromspitzen, wie sie im power-assist Betrieb auftreten, sind zum Schutz der Bauteile Zwangssymmetrierungen der Einzelspannungen sinnvoll.

Die eleganteste Variante entspricht dem Einzelladen der Kondensatoren über galvanisch getrennte Quellen. Das Prinzip zeigt **Abb. 3. 12**.

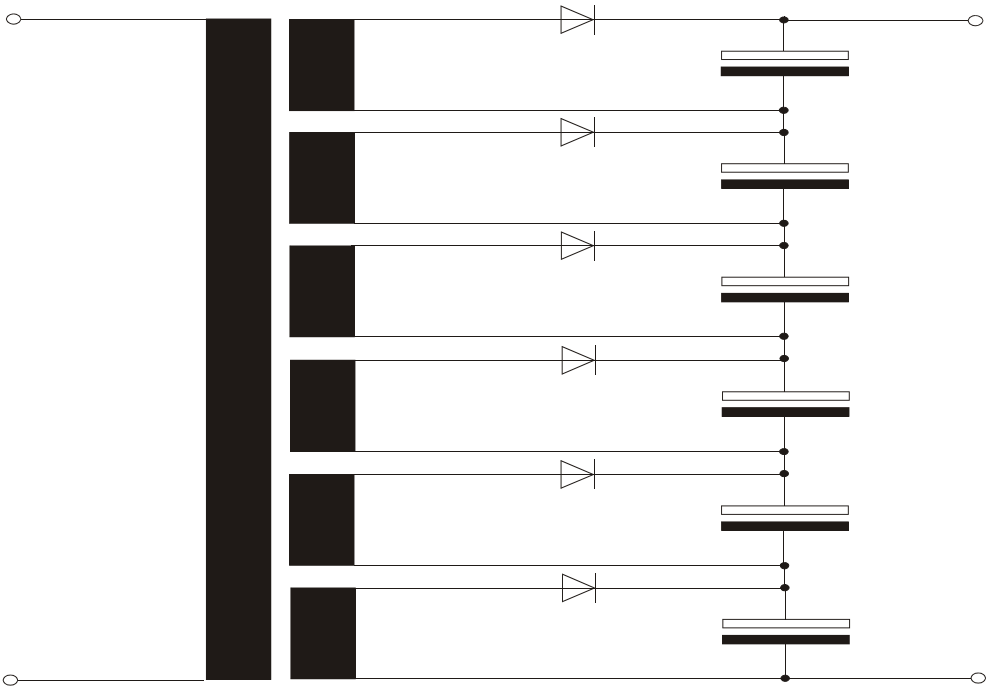


***Abb. 3. 12**: Symmetrierung der Kondensatorspannung durch galvanisch getrennte Spannungsquellen*

Bei in der Praxis vorkommenden komplexeren Modulen ist diese Art der Ladung zu unwirtschaftlich.

Für diesen Fall führt ein passives bypassing nach Abschnitt 3.1.7 zu akzeptablen Ergebnissen. Als passives bypassing wird eine Bypass-Schaltung bezeichnet, bei der der Bypass nicht aktiv durch ein Managementsystem geschaltet wird, sondern permanent geschaltet ist. Die Symme-

trierung der Einzelspannungen der einzelnen Ultracaps erfolgt dann über den Spannungsteiler, der durch die Symmetrierungswiderstände R_{symm} erzeugt wird. Alle R_{Symm} werden gleich dimensioniert und müssen klein gegenüber dem Isolationswiderstand der Ultracaps sein. Der Isolationswiderstand liegt bei ca. 400 Ω. Symmetrierungswiderstände mit R_{Symm} = 200 Ω ergeben bereits ein befriedigendes Verhalten. Passives bypassing ist in **Abb. 3. 13** schematisch dargestellt.

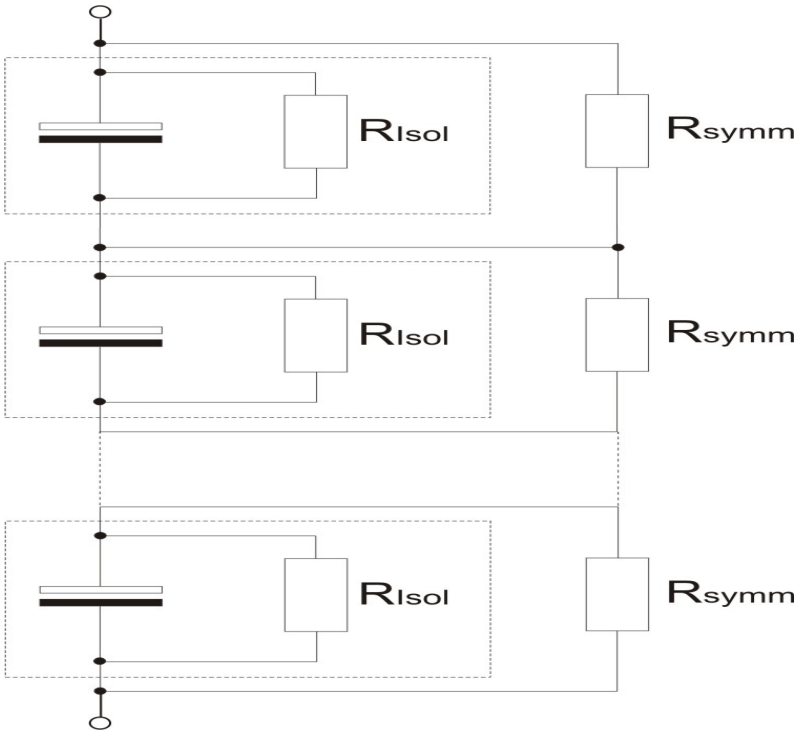


***Abb. 3. 13**: Symmetrierung durch passives bypassing*

Das passive bypassing kann optimiert werden, indem jedem Modul oder Submodul eine geeignete Bypass- Elektronik anstelle des Symmetrierwiderstandes parallelgeschaltet wird. Diese spezielle Schaltung sollte als Kern einen als Komparator beschalteten rail-to-rail Operationsverstärker beinhalten, der über einen weiten Versorgungsspannungsbereich betreibbar ist. Über eine durch äußere Beschaltung einstellbare Hysterese kann der Symmetrierstrom beim Überschreiten einer bestimmten Schwellspannung geschaltet werden. Treibt man mit dem Komparatorausgang einen Schalttransistor mit Kollektorwiderstand, so können beliebige Ströme zur Symmetrierung geschaltet werden. Eine solche aktive Symmetrierung ist im Abschnitt 6.1.2 beschrieben.

3.1.4 Entladeverhalten

Entgegen der Ladung spielt die Gasung bei der Entladung von Bleibatterien bis zur Entladeschlussspannung keine Rolle, so dass bei der Beschreibung des Entladeverhaltens nur die Hauptreaktion betrachtet werden muss. Das BMS wertet die Klemmengrößen und die Tempera-

tur aus. Betrachtet man Konstantstromentladungen bei Bleibatterien, so kann in der Regel der in **Abb. 3. 14** dargestellte Verlauf der Modulspannung beobachtet werden. Gerade bei der Tiefentladung mit geringen Strömen (blaue Kurve) kann die Umpolung einzelner Zellen während der Tiefentladephase nicht durch das BMS detektiert werden.

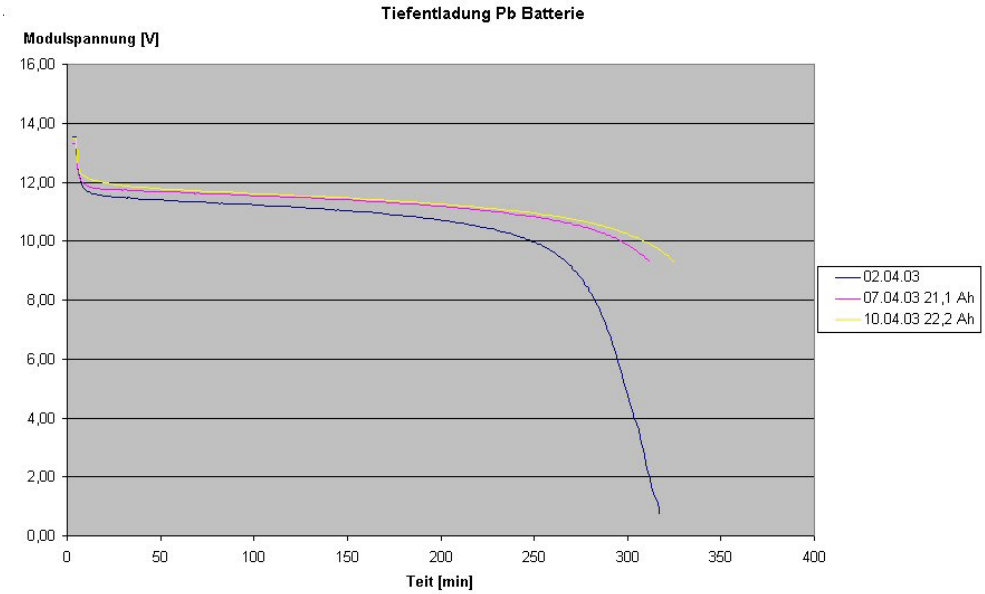


***Abb. 3. 14**: Entladespannungsverlauf bei der Tiefentladung einer Bleibatterie Varta 12 V/ 45 Ah [eigene Messung]*

Abb. 3. 15 zeigt an einer stark gealterten Batterie einen Ausschnitt der Entladecharakteristik.

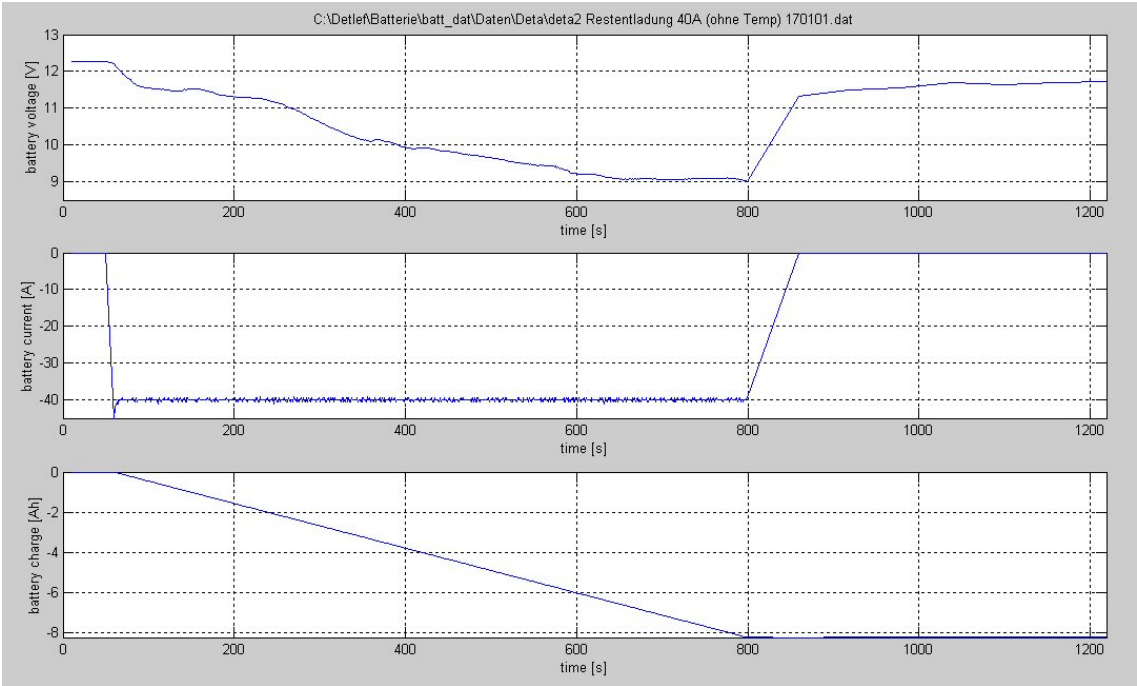


***Abb. 3. 15**: Tiefentladung einer stark gealterten Bleibatterie [eigene Messung]*

Tiefentladungen können zum Abschlammen an der positiven Platte mit nicht reversibler Schädigung der aktiven Masse führen. Die vorher bereits bis an die Entladeschlussspannung entladene Batterie zeigt die Umpolung einzelner Zellen bei einer Konstantstromentladung auf. Der Spannungsverlauf ist jedoch im realen Traktionsbetrieb (**Abb. 3. 16**) nicht geeignet, um auf den Zustand der Einzelzellen schließen zu können. Für Bleibatterien kann der zulässige Entladestrom durch das BMS dementsprechend sicher nur anhand der Momentanwerte der Modulspannungen bestimmt werden. **Abb. 3. 16** zeigt exemplarisch die Verläufe von Strom und Modulspannungen für eine Testfahrt bei 0 ˚C. Der Laststrom ist bei Maximalbeschleunigungen nur über sehr kurze Zeiträume konstant, so dass auch eine Auswertung der Sprungantwort der Modulspannungen nicht möglich ist, da die Einschwingvorgänge deutlich langsamer verlaufen.

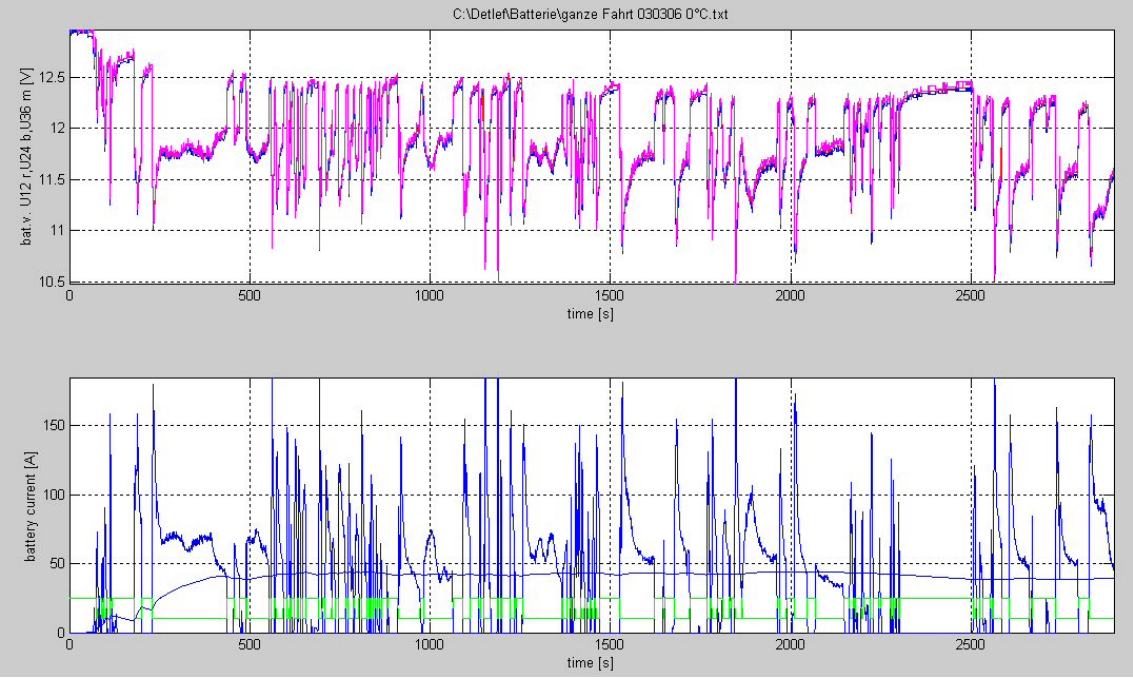


***Abb. 3. 16**: Strom- und Spannungsverlauf bei Testfahrt mit deaktivierter Strombegrenzung (obere Grafik: Modulspannungen, untere Grafik blau: Stromverlauf, grün: High-Signal bei I < 40 A, sonst Low-Signal)*

Ist die werkseitig vorgesehene Strombegrenzung auf einen maximalen Entladestrom von 130 A aktiviert, so ergibt sich ein Lastprofil, das eher Rückschlüsse auf den Ladezustand der Antriebsbatterie zulässt. In **Abb. 3. 17** ist ein solcher Lastfall dargestellt. Anhand der mit einer Abtastrate von 1 s aufgezeichneten Messwerte ist der Ladezustand der einzelnen Module interpretierbar, aber es ist kein Rückschluss auf den Zustand der Einzelzellen möglich. [Scö88] wählt in seinen Untersuchungen einer realen Fahrzeugbatterie sogar eine Abtastrate von 2,5 s. Das BMS muss sich dann an anderen Kriterien orientieren. Im Kapitel 5 werden Möglichkeiten der Vermeidung der Tiefentladung einzelner Module diskutiert und umgesetzt.

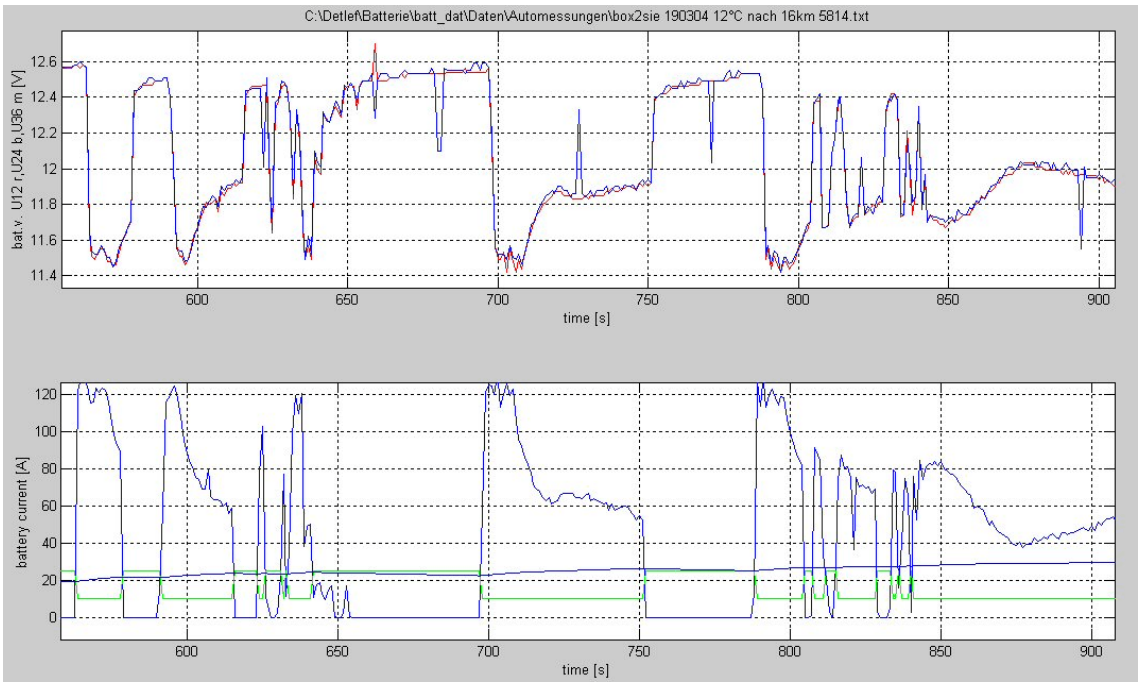


***Abb. 3. 17**: Sprungantwort bei aktivierter Stromabregelung im Versuchsfahrzeug cityEL*

Entlädt man zum Beispiel eine Nickel-basierte Zelle über die Entladeschlussspannung hinaus bis zur Umpolung, so wird an der positiven Elektrode Wasserstoff und an der negativen Elektrode Sauerstoff durch Gasung freigesetzt. Aus der Messung der Einzelzellspannungen wird die Umpolung von Zellen, wie in **Abb. 3. 18** für NiMH dargestellt, messbar.

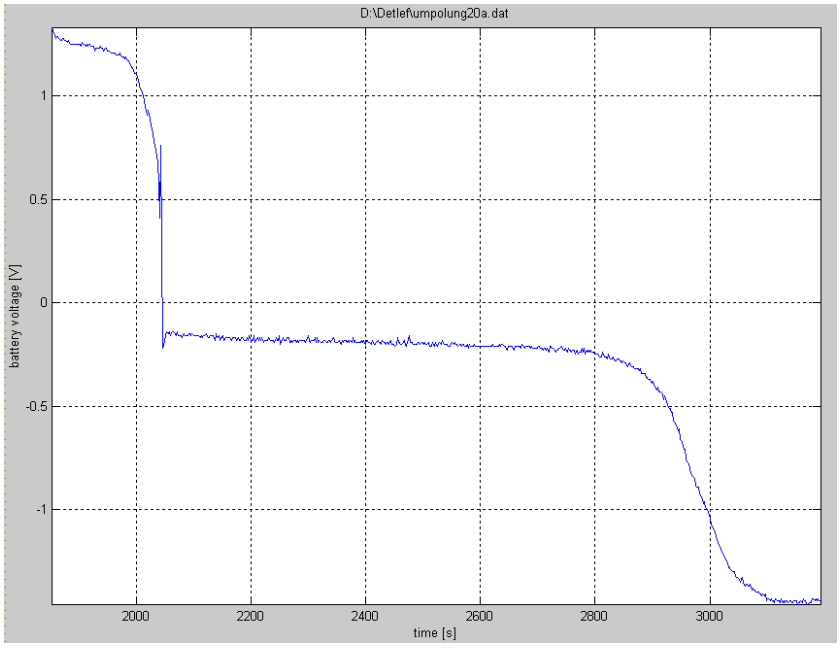


***Abb. 3. 18**: Umpolung einer NiMH Zelle*

Vereinfacht man die Spannungserfassung einer NiCd oder NiMH Batterie in der Form, dass nur noch Modulspannungen gemessen werden, so ist durch den Vergleich der Spannungslage der Module die Umpolung von Zellen durch das BMS anhand des Spannungsverlaufes eines 12 V-Moduls, wie in **Abb. 3. 19** gezeigt, detektierbar.

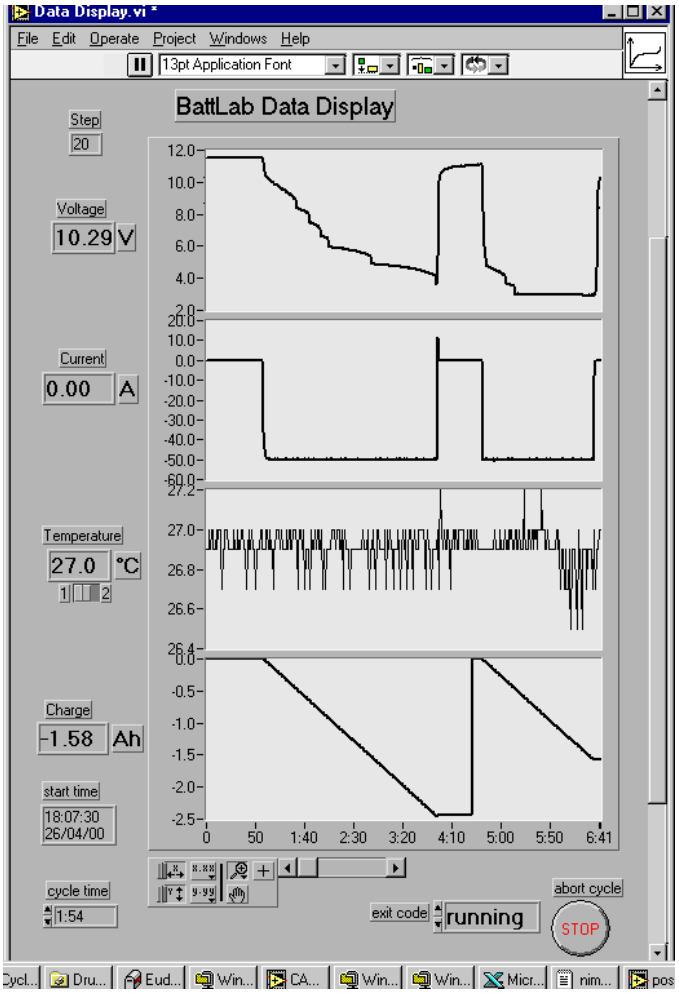


***Abb. 3. 19**: Umpolung von einzelnen NiMH-Zellen eines Moduls bei Tiefentladung*

Die Software kann dabei auf plötzlich auftretende Sprünge der Differenzen zwischen verschiedenen Modulen, oder aber auf große -dU/dt der Modulspannung reagieren. Erschwert wird die Auswertung letzteren Ansatzes jedoch wieder durch die nichtkonstante Last der Batterie im Traktionsbetrieb. Hier erscheint der Vergleich mehrerer Module (eventuell in Verbindung mit -dU/dt) erfolgversprechender.

Am Beispiel der NiMH-Batterie wurde bereits aufgezeigt, dass durch konstruktive Maßnahmen die Entladeeigenschaften beeinflusst werden können. Die Ausprägung zu HE-, HP- oder UHP-Zellen kann durch den Elektrodentyp, die Plattendicke, Plattenanzahl bzw. -oberfläche, den Abstand, die Elektrolytkonzentration oder bestimmte Beimischungen zu den verwendeten Materialien erreicht werden [Köh99]. Die Entladeeigenschaften entziehen sich in der Regel

einer geschlossenen elektrochemischen Beschreibung. Ziel einer Beschreibung des Entladeverhaltens von Traktionsbatterien ist daher weniger die exakte Bestimmung der Spannungslage bei einem vorgegebenen Lastprofil als vielmehr die zuverlässige Vorhersage des Entladeschlusses, also des Zeitpunktes, zu dem die weitere Entladung nicht mehr zulässig ist. Neben den Betriebsbedingungen der Entladung, die durch den Entladestrom und die Temperatur bestimmt sind, hat (gerade bei NiCd-Zellen) die Vorgeschichte einen starken Einfluss auf das Entladeverhalten.

Im Abschnitt 2.2.1 wurden bereits Arbeiten mit dem Ziel vorgestellt das Betriebsverhalten der Batterie mit Hilfe elektrischer Ersatzschaltbilder zu modellieren. Gelingt eine solche Modellierung, so ist der Entladeschluss zuverlässig bestimmbar. Eigene Untersuchungen, die im Abschnitt 4.3.3 näher erläutert werden, zeigen jedoch die Grenzen des Umsetzung dieser Ansätze auf. Die Beobachtung und Auswertung des Entladeverhaltens obliegt im realen Traktionsbetrieb dem Batteriemanagementsystem. Die Messraten der Stromerfassung müssen dabei so gewählt werden, dass auch Stromspitzen erfasst werden können. Dabei ist das Einsatzgebiet des BMS für die gewählte Messrate entscheidend. Der Einsatz in Forschungsfahrzeugen erfordert eine hohe Messrate (ca 1...5 Hz), so dass die erfassten Daten als Steuergröße für Laborversuche genutzt werden können. Zur Umsetzung kostenoptimierter Lösungen scheiden aufwendige Mess- und Beobachtungsverfahren von vornherein aus.

Eine der zentralen Aufgaben des BMS während der Entladung ist die Bestimmung der noch verfügbaren Ladungsmenge. Das erfordert die Einbeziehung des Stromverbrauchs von Kleinverbrauchern an der Traktionsbatterie während der Standzeit oder Ladezeit. Eine Auflösung des Stromes im Bereich ± 50mA...100mA ist dann sinnvoll. Gleichzeitig müssen je nach Fahrzeug Ströme zwischen +100A (Rekuperation)...-500A (Beschleunigung) gemessen werden. Entweder man setzt in diesem Fall einen externen AD-Umsetzer mit hoher Auflösung oder einen internen AD-Wandler mit extern vom Microcontroller umschaltbarer Bereichswahl ein.

3.1.5 Ladezustandsbestimmung

Der Ladezustandsbestimmung von Batterien kommt eine elementare Bedeutung zu. Eine Reaktion des Batteriemanagements auf die Erkennung der Umpolung einer Zelle oder das Unterschreiten der Entladeschlußspannung und die Ergreifung der richtigen Maßnahmen ist ein erster Schritt. Eine vorausschauende Betriebsstrategie setzt aber die möglichst exakte Kenntnis des Ladezustandes (State-of-Charge, SOC) und des State-of-Health (SOH) der Batterie voraus. Im Kapitel 4 werden deshalb klassische Verfahren der Ladezustandsbestimmung ausführlicher diskutiert. Es gibt in diesem Zusammenhang eine Vielzahl von Methoden den Ladezustand einer Batterie zu bestimmen. Der Ladezustand ist in allen Betriebszuständen der Batterie (Ladung, Entladung, Stillstandszeiten) von Bedeutung. Die Klemmengrößen sind am einfachsten einer Auswertung zugänglich. Aus den Klemmengrößen kann unter anderem die Ruhespannung, die widerstandskompensierte Spannungslage oder der differentielle Widerstand untersucht werden.

Nachteilig an allen Verfahren ist die mangelnde Toleranz der Messverfahren für den rauhen Traktionsbetrieb. Teilweise werden eingeschwungene Zustände vorausgesetzt oder die Signalamplituden der aufmodulierten Messströme liegen in der Nähe der Messungenauigkeiten der einzusetzenden Elektronik.

Im Kapitel 4 wird verstärkt auf diese Problematik eingegangen und nach Verfahren gesucht, die während des Fahrbetriebes anwendbar sind. Neben der Ladezustandsbestimmung ist auch die Bestimmung des SOH eine Aufgabe des BMS. Der SOH beschreibt dabei das Alterungsverhalten der Batterie. Sowohl der SOC als auch der SOH haben Auswirkungen auf das Batterieverhalten im Traktionsbetrieb. Im Prinzip können die Auswirkungen des SOC und des SOH wie in **Abb. 3. 20** aufgefasst werden.

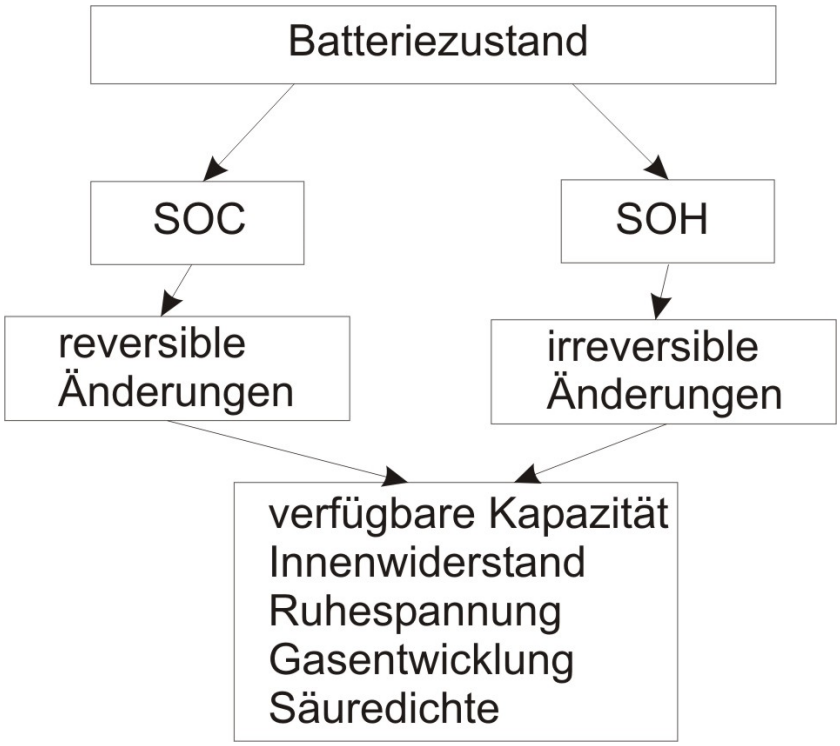


***Abb. 3. 20**: Auswirkungen von SOC und SOH auf Batterieparameter*

Der Ladezustand wird in der Literatur häufig in Form von Konstantstromentladungen bestimmt oder dargestellt. Beim Erreichen der Entladeschlussspannung wird der Entladevorgang abgebrochen und der SOC mit 0 % angenommen. Im Elektrofahrzeug scheint dieser Ansatz nicht praktikabel zu sein. Praktisch ist es im Traktionsbetrieb so, dass beim Erreichen der festgelegten unteren Betriebsspannung, die deutlich oberhalb der Entladeschlussspannung für den maximal vorkommenden Entladestrom liegen kann, die Strombegrenzung einsetzt. In diesem Fall wird die der Batterie entnehmbare Leistung begrenzt. Der SOC soll in den folgenden Abschnitten dann mit 0 % angenommen werden, wenn das Fahrzeug mit wirksamer Strombegrenzung in der Ebene nur noch auf 70 % der Maximalgeschwindigkeit beschleunigt werden kann.

3.1.6 Batterietemperierung

Eine der entscheidenden Funktionen eines BMS ist die des thermischen Managements der Batterie. Die Batterie muss dabei unter allen möglichen Umwelt- und Lastbedingungen in dem

für sie optimalen, bzw. zumindest im zugelassenen, Temperaturbereich betrieben werden.

Dabei ist es schwierig die aktuelle Batterietemperatur genau zu bestimmen. Messungen am Gehäuse oder den Batteriepolen geben noch keinen direkten Hinweis auf die Temperatur im Batterieinneren. Der Einsatz thermischer Modelle, die die Temperatur an der Oberfläche und die inneren Verluste der Batterie in Zusammenhang bringen, führt zu genaueren Annahmen über die reale Temperatur im Batterieinneren.

Neben der eigentlichen Temperierung der Batterie ist es absolut notwendig für einen Temperaturausgleich zwischen den Modulen zu sorgen. Der Ablauf der chemischen Prozesse im Inneren der Batterie ist stark temperaturabhängig, so dass eine Ursache für Unterschiede der Lade- und Entladewirkungsgrade, der entnehmbaren Kapazität und des Alterungsverhaltens in den Unterschieden der Betriebstemperaturen der einzelnen Zellen eines Moduls begründet ist. Die Temperaturunterschiede zwischen den einzelnen Zellen oder Modulen sollten 3...4K nicht überschreiten. Aus fertigungstechnischen Gründen werden Module aus vielen Zellen gebildet, wodurch der mechanische Aufbau der Gesamtbatterie vereinfacht, die Kühlung der Module jedoch verkompliziert wird. Der signifikante Temperaturanstieg der Einzelzellen eines Moduls kann bei unzureichender Kühlung zu einem thermal runaway des gesamten Moduls mit der Folge der Zerstörung einzelner Zellen führen. Es können zwei Hauptwärmequellen bei Hochstromentladungen ausgemacht werden. Zum einen führen die chemischen Vorgänge innerhalb der Zelle zu einer Wärmeentwicklung, die stärkste Quelle befindet sich jedoch an den Anschlusspolen, wo nach [Ren00] ca. 80% der Wärme erzeugt werden. Eigene Messungen haben ergeben, dass die höchsten am Gehäuse messbaren Temperaturen im oberen Bereich, bzw. an der Oberfläche messbar sind. Dabei kann weiterhin festgestellt werden, dass sich die inneren Zellen eines Moduls deutlich stärker erwärmen als die äußeren Module. Typische Messergebnisse nach [Pes99] sind in **Abb. 3. 21** dargestellt.

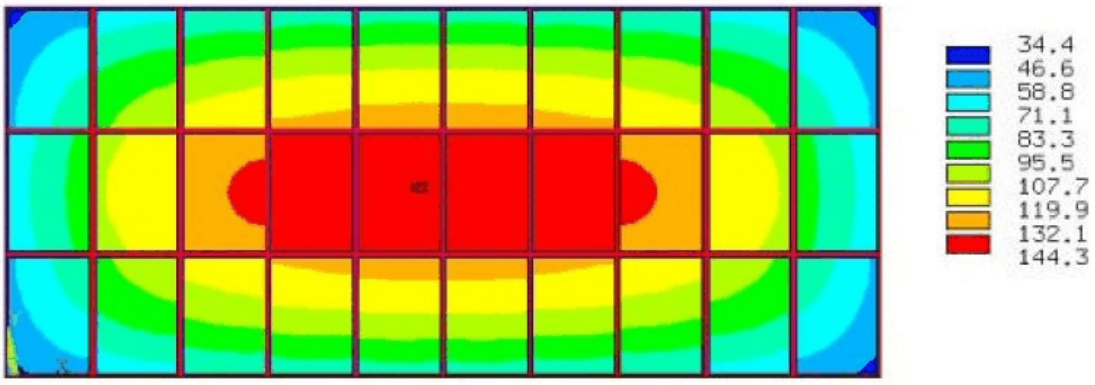


***Abb. 3. 21**: Temperaturverteilung (in [℃]) in einem ungekühlten NiMH System bestehend aus 3x10 Modulen [Pes99]*

Wird das Modul luftgekühlt, so hängt die erreichte Kühlung von der Strömungsgeometrie ab. [Pes99] schlägt die in **Abb. 3. 22** gezeigte Kühlvariante vor. Luft wird von unten nach oben durch den offenen Batterietrog geblasen. Die Module erwärmen sich dann nur noch unkritisch.

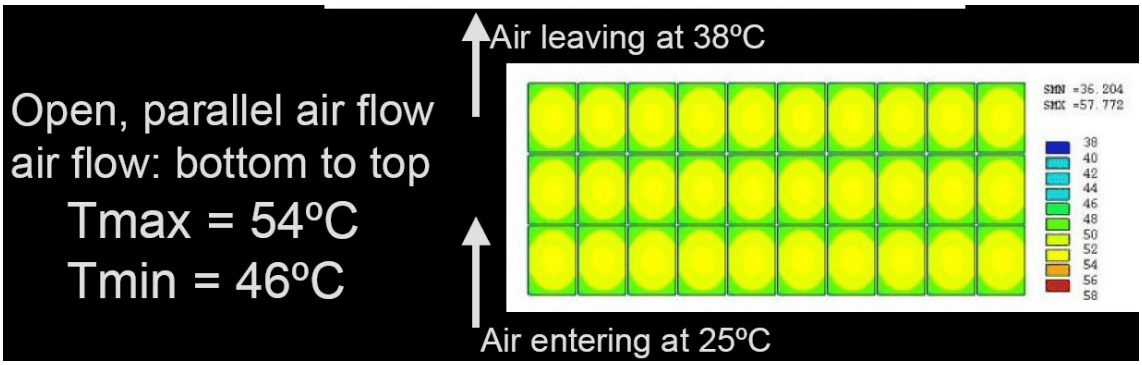


***Abb. 3. 22**: Temperaturverteilung in ℃[C] im nun luftgekühlen Modul bei gleicher Last [Pes99]*

Die Strömungsrichtung hat einen großen Einfluss auf die Kühleigenschaften. Lässt man beispielsweise die Luft seitlich von links nach rechts durch den Batterietrog strömen, so erhält man einen nahezu linearen Anstieg der Modultemperaturen im Bereich 40˚C...58˚C über dem Strömungskanal. Eigene Untersuchungen nach **Abb. 3. 23** an einer Panasonic 12V/95Ah NiMH-Batterie zeigen bei einer passiven Wasserkühlung das gleiche Ergebnis. Die mittleren Zellen erwärmen sich nur unwesentlich stärker, benötigen jedoch auch länger zur Abkühlung.

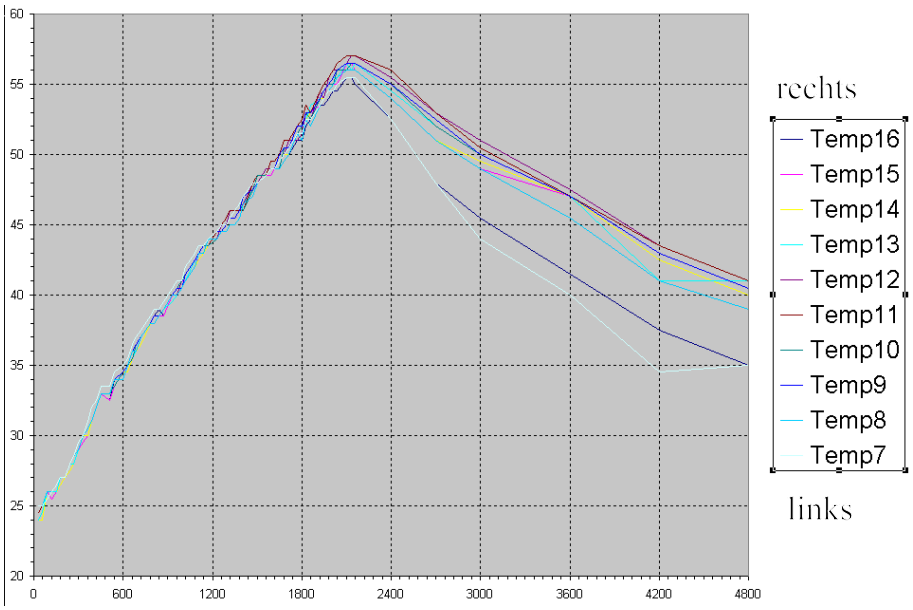


***Abb. 3. 23**: Modultemperaturen über der Entladezeit (in [s]) einer Panasonic 95Ah/12V bei Entladung mit 160A*

Bei abnehmendem SOC steigen die Temperaturen der inneren Zellen stärker an als die der äußeren Zellen. Aufgrund der größeren effektiven kühlbaren Oberfläche kühlen die äußeren Zellen auch deutlich schneller ab. Ein identisches Betriebs- und Alterungsverhalten aller Zellen eines Moduls kann somit aufgrund des physikalischen Aufbaus des Moduls nur durch ein Temperaturausgleichssystem erreicht werden.

Betrachtet man die Möglichkeiten der Realisierung eines Thermischen Management Systems

(TMS) als Subfunktion eines BMS, so gibt es als prinzipielle Möglichkeiten die der Wasserkühlung oder Luftkühlung. Die Luftkühlung hat gegenüber der Wasserkühlung den Vorteil der einfacheren Realisierbarkeit und der geringeren Kosten. Dagegen ist die Wasserkühlung effektiver, so dass sich die Batterie bei gleichem Energieaufwand der Kühlung nicht so stark erwärmt wie bei Luftkühlung. Die prinzipielle Struktur der Wasserkühlung ist in **Abb. 3. 24** dargestellt.

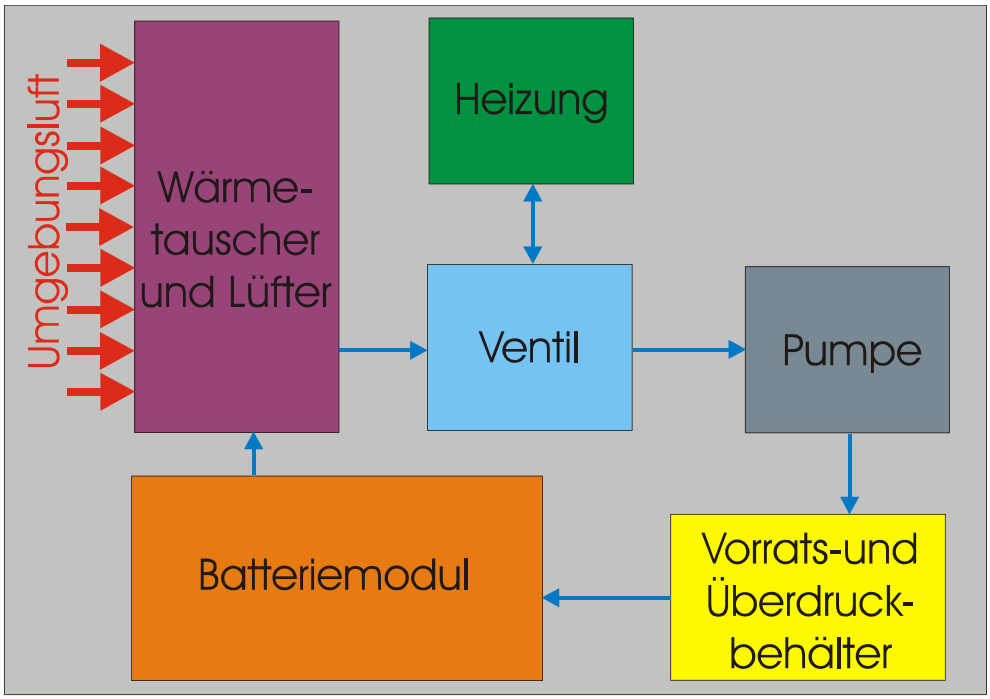


***Abb. 3. 24**: Blockschaltbild der Wasserkühlung eines Batteriemoduls*

Konzeptionen beider Varianten für ein vorgegebenes Batteriesystem [ZED98] zeigen, dass die Luftkühlung zu einem größeren Volumen und geringerem Gewicht des Systems Batterie/Klimatisierung als die Wasserkühlung führt. Die Kosten der Wasserkühlung sind dagegen ungefähr doppelt so hoch wie bei Luftkühlung. Im Rahmen der Projektierung ist zu entscheiden, ob die guten Kühleigenschaften der Wasserkühlung den Aufwand rechtfertigen. Die Wahl der Kühlung ist somit abhängig von der Applikation bzw. den tatsächlichen Lastprofilen für die Batterie. Im Rahmen des thermischen Managements der Antriebsbatterie können folgende Funktionen realisiert werden:

a. aktive Kühlung der Batterie

b. passive Kühlung der Batterie

c. Temperaturausgleich zwischen einzelnen Zellen oder Modulen

d. Batterieheizung

Während des Betriebes heizt sich die Batterie bei Stromfluss auf. Die Wärme wird dabei am Innenwiderstand der Batterie erzeugt. Dieser setzt sich zusammen aus den ohmschen Anteilen und dem Polarisationswiderstand. Beide Anteile des Widerstandes sind dabei stark abhängig

vom entnommenen Strom und vom Ladezustand der Batterie. Heizt sich die Batterie stark auf, so muss sie aktiv gekühlt werden. Bei Luftkühlung bedeutet das, dass die Lüfter betrieben werden müssen, bei Wasserkühlung muss dem Wärmetauscher ebenfalls über Lüfter ein größerer Luftstrom zugeführt werden. Heizt sich die Batterie nur wenig auf, so kann eventuell auf die aktive Kühlung zugunsten der passiven Kühlung verzichtet werden. Bei passiver Kühlung wird die Wärme durch freie Konvektion oder den zugeführten Fahrtwind an die Umgebung abgegeben. Der Algorithmus zur Steuerung der thermischen Betriebszustände ist neben dem gewählten Batteriesystem abhängig vom Einbauort, der Art der Kühlung, dem Lastprofil, dem SOC und dem SOH. **Abb. 3. 25** zeigt die entladestromabhängige Wärmeentwicklung an wassergekühlten NiMH Batterien im Laborversuch. Bei $6*I_2$ erwärmt sich die Batterie sehr stark, bei $4*I_2$ schon weniger stark. Bei $2*I_2$ erfolgt bereits eine Abkühlung auf 37 ˚C, die trotz des Entladeendes auch bei anschließender Entladung mit I_2 gehalten wird. Die Begrenzung des Entladestroms auf 200 A erfolgt beim Erreichen einer Zelltemperatur von 40 ˚C, die weitere Reduzierung auf 100 A beim Überschreiten einer Zelltemperatur von 45 ˚C. Die Reduktion auf 50 A wird bereits nicht mehr durch die Temperaturauswertung, sondern durch das Erreichen der Entladeschlußspannung ausgelöst. Das BMS muss eine batterieschädigende Erwärmung der Batterie durch geeignetes Zusammenspiel von thermischem Management und Leistungsbegrenzung vermeiden.

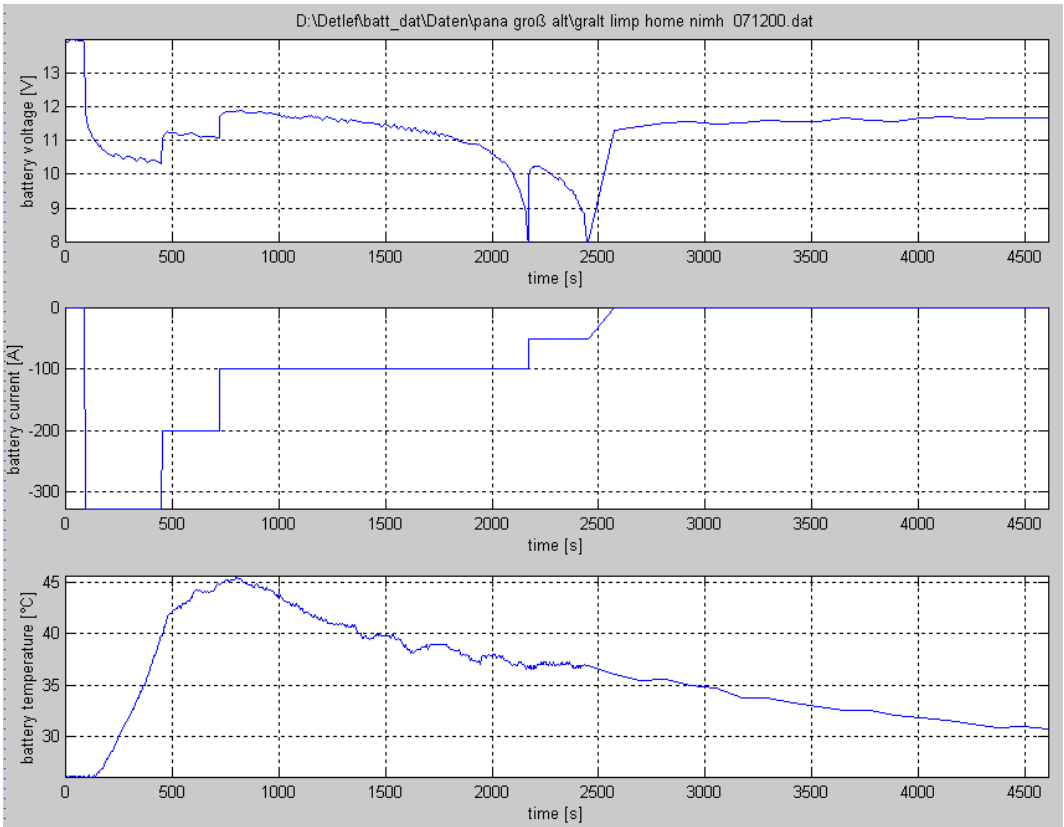


***Abb. 3. 25**: Temperaturentwicklung am 95Ah/12V NiMH-Modul bei Wasserkühlung und temperaturabhängiger Leistungsbegrenzung*

In mehreren Versuchen hat sich herausgestellt, dass die Umschaltung zwischen aktiver und passiver Kühlung über einen Zweipunkt-Regler mit Hysterese erfolgen kann. Die Luftstrom-

regulierung über ein pulsweitenmoduliertes Steuersignal an die Lüftereinheit erbringt keine Vorteile, die den erhöhten Regelungsaufwand rechtfertigen würden.

Bei kalten Außentemperaturen kann die Vorheizung der Batterie sinnvoll sein. Eine solche Vorheizung der Batterie auf eine Betriebstemperatur von zum Beispiel 15˚C kann unterschiedliche Gründe haben.

- höhere entnehmbare Kapazität, keine Eisbildung bei niedrigem SOC
- höhere Spannungslage bei höherer Temperatur -> höhere Leistung entnehmbar

3.1.7 Ladungsausgleich

Gerade bei Traktionsbatterien höherer Spannungen ist eine Vielzahl von Modulen in Reihe geschaltet. In diesen Applikationen wird als Ladungsausgleichsverfahren vorzugsweise das bypassing eingesetzt. Es stellt bei der Suche nach dem Kompromiss aus Raumbedarf, Kosten, Gewicht und Wirkungsgrad des Verfahrens die wirtschaftlich tragfähigste Lösung dar. Eine interessante Variante eines 'Energy-Balancing Systems' veröffentlichte [Cho01] für Li-Ion Batterien. Dabei wird ein Transformator primärseitig aus dem Batteriemodul versorgt getaktet. Sekundärseitig gibt es bei n-Zellen des Moduls n Windungen, so dass jede Zelle einzeln nachgeladen werden kann. Das Prinzip zeigt **Abb. 3. 26**.

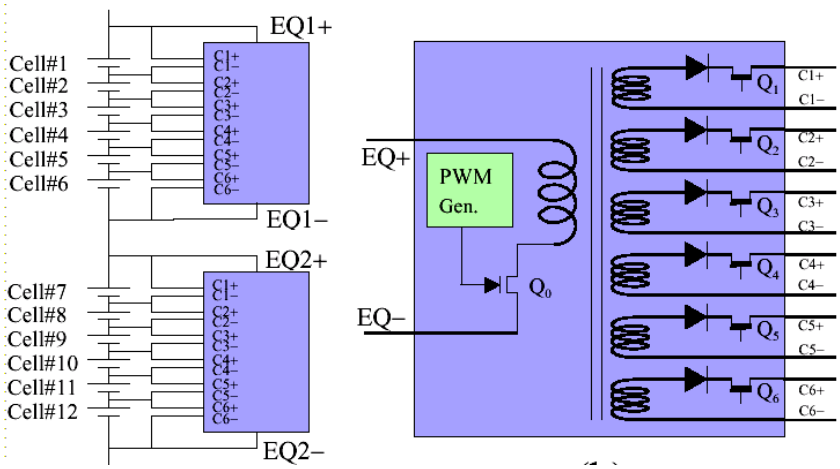


***Abb. 3. 26**: Energy-Balancing System nach [Cho01]*

Dieses System wäre auch bei Bleibatterien in verschiedenen Varianten einsetzbar. Zum einen könnten während der Ladephase einzelne Module eines Modulverbandes individuell aufgefrischt werden. Andererseits können kapazitätsarme Module während des Fahrbetriebs gezielt aus dem Modulverbund nachgeladen werden. Die insgesamt entnehmbare Kapazität der Gesamtbatterie wird größer. Aufgrund der besseren Ausnutzung der aktiven Masse werden auch die kapazitätsstärkeren Module besser zykliert.

Nutzt man das Balancing-System zur Ladung, so kann jedes Modul individuell geladen werden. Nachteilig an dieser Variante ist jedoch der hohe primärseitige Strom, so dass der Ansatz nicht zur Realisierung kommen wird. An die Anschlüsse EQ+,EQ- müßte also eine deutlich höhere

Spannung als die Modulspannung gelegt werden, z.B. die Traktionsspannung. Die Problematik tritt jedoch auch in der oben genannten Applikation des Nachladens schwacher Module während der Fahrt auf. Da die Fahrzeit des Elektrofahrzeuges aufgrund der limitierten Energie der Batterie auf maximal zwei Stunden beschränkt ist, müßten zur Verschiebung von 20Ah dauerhaft 10A transformiert werden. Beim Einsatz als verlustfreier Bypass ist der Aufwand gegenüber dem Widerstands-Bypass jedoch zu hoch. Es wären spezielle Untersuchungen notwendig, die den Einfluss auf den Gesamtwirkungsgrad und damit die Gesamtkosten über die Fahrzeuglebensdauer klären.

Einfachere Verfahren nutzen ein Ladegerät mit einem regelbaren Ladestrom zur gleichzeitigen Ladung aller Module der Traktionsbatterie. Treten nun unterschiedliche Ladezustände der einzelnen Batteriemodule auf, so muss das BMS für einen Ausgleich sorgen. Prinzipiell sind verschiedene Verfahren des Ladungsausgleichs zwischen den Batteriemodulen denkbar. Die **Abb. 3. 27** zeigt einige Varianten.

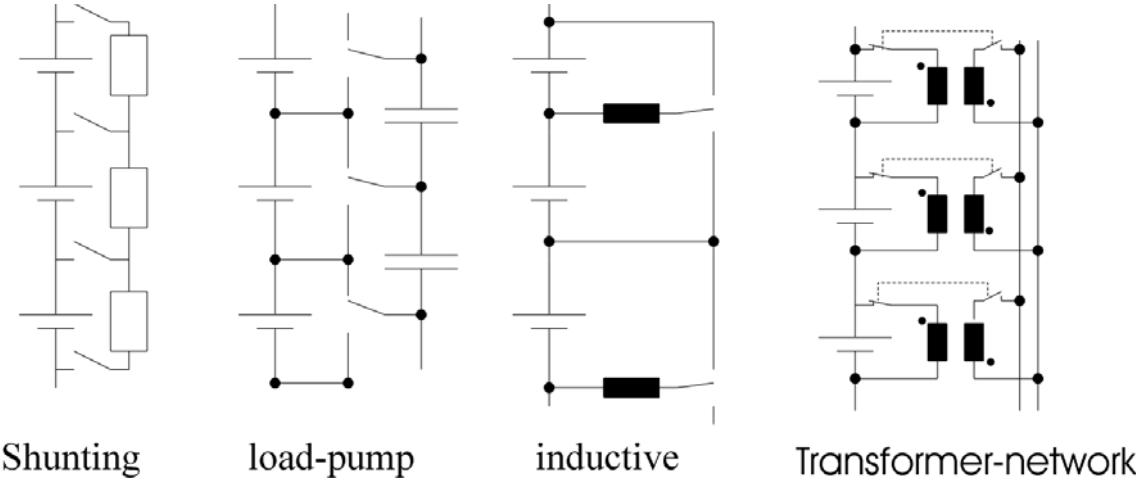


***Abb. 3. 27**: Verschiedene Verfahren des Ladungsausgleiches zwischen Batteriemodulen*

Beim ‘Shunting’, oder auch ‘bypassing’ genannt, wird ein Teil des Ladestromes an den bereits voll geladenen Modulen vorbeigeführt, schwächere Module erhalten weiterhin den höheren Ladestrom. Der Ladewirkungsgrad sinkt mit der Anzahl der Module mit aktivem Bypass. Bei den Verfahren mit kapazitiver Ladungspumpe (load-pump) oder geschalteter Induktivität können Ladungen zum **benachbarten** Modul transportiert werden. Erweitert man dieses Verfahren durch die Integration eines Multiplexer-Schaltfeldes, so kann die Energie an beliebige Zellen weitergeleitet werden. Dieses Verfahren setzt voraus, dass die Ladungsunterschiede zwischen den einzelnen Modulen nur gering sind, da über den Kondensator nur relativ kleine Mengen ‘transportiert’ werden können. Dieses Verfahren bietet sich hauptsächlich für stationäre Anlagen mit längeren Ruhezeiten an.

Ladungsaustausch über beliebige Module kann mit Hilfe eines Transformator-Netzwerkes und einem speziellen Energiebus erzielt werden. Nachteilig wirkt sich hier der große Aufwand aus. Das in Abschnitt 5 beschriebene BMS für das cityEL schafft den Ladungsausgleich durch eine spezielle Bypass-Schaltung in Verbindung mit einer Nachladephase.

Der Ladungsausgleich durch Shunting kann durch unterschiedliche Betriebsstrategien realisiert werden:

- Erreicht ein Modul den Vollladezustand, so wird die Ladung beendet und das Modul wird während der Entladung zusätzlich mit einem Bypass belastet. Während des Ladens werden nicht alle Module vollständig geladen. Die vollständig geladenen Module werden während der Entladung stärker belastet. Dieses Verfahren wirkt nur bei unterschiedlichem SOC aber annähernd gleicher Kapazität aller Module.
- Erreicht ein Modul die maximal zulässige Spannung, so wird dieses Modul mit dem Bypass überbrückt, der Ladestrom wird so lange aufrecht erhalten, bis alle Module mit aktivem Bypass überbrückt sind oder bis bypassing nicht mehr ausreicht, um die Spannungen an der zulässigen Grenze zu halten. Dann wird der Ladestrom in Form der U-Ladung geregelt. Auch bei dieser Betriebsstrategie werden nicht zwangsweise alle Module vollständig geladen.
- Während des Ladens und des Entladens werden Module mit höherer Spannung durch den Bypass zusätzlich belastet. Dieses Verfahren erfordert wieder eine Messung aller Modulspannungen, wobei die Module aus möglichst wenig Zellen bestehen sollten. Die Modulspannungen sind von den Innenwiderständen der Module abhängig. Da diese alterungsabhängig sind, bedeutet eine höhere Spannung während der Ladung nicht zwangsweise einen hohen SOC.
- Aufgrund des im BMS gespeicherten Expertenwissens werden einzelne oder mehrere Module detektiert, die sowohl während der Ladung als auch während der Entladung mit einem aktiven Bypass beschaltet werden können.

Die gewählte Betriebsstrategie ist dabei von verschiedenen Faktoren abhängig. Zum einen ist das eingesetzte Batteriesystem, aber auch die Leistungsfähigkeit des BMS mitbestimmend. Bei NiMH oder NiCd Batterien entfallen die ersten beiden Verfahren, da kein Ladeverfahren existiert, das an absoluten Spannungswerten orientiert ist. Findet bypassing in allen Betriebszuständen statt, so haben Messungen an NiMH Batterien mit 95 Ah ergeben, dass ein Kapazitätsunterschied von 30 % C_{nom} bereits nach sechs Zyklen bei I_{byp}= 1 A ausgeglichen sein kann. Im Dauerbetrieb können bereits Ströme von ca. 50 mA ein Auseinanderlaufen der Zellen verhindern.

3.1.8 Diagnose

In modernen Kraftfahrzeugen aller Art sind die elektronischen Steuergeräte mit ausgeklügelten Diagnosefunktionen ausgestattet. Diese Diagnosemöglichkeiten können klassifiziert werden in solche, die einerseits dem Nutzer des Fahrzeugs Informationen über das Fehlverhalten von Komponenten oder Fahrinformationen visualisieren, andererseits umfangreiche Diagnosemöglichkeiten für den Werkstattbetrieb oder den Hersteller liefern können.

Aus der Sicht des Anwenders können Diagnosedaten in drei Kategorien klassifiziert werden:

- Daten, deren Werte angezeigt werden müssen, z.B. die Geschwindigkeit oder der Ladezustand
- Daten, deren Wert nicht exakt angezeigt werden muss, die jedoch den Fahrer in seiner Fahrweise beeinflussen. Dazu zählen z. B. die Betriebstemperatur der Traktionsbatterie. Diese Daten werden entweder visualisiert oder beim Erreichen eines Grenzwertes mit einem Warnton oder einer Warnlampe mitgeteilt.
- Daten, die dem Fahrer nicht visualisiert werden, wie zum Beispiel Modulspannungen, Statistiken, wie erfolgte Tiefentladungen.

Die Diagnosemöglichkeiten moderner Fahrzeuge werden in der nahen Zukunft drastisch erweitert werden. Neben der Möglichkeit der Fehlererkennung werden vorausschauende Strategien der Diagnose implementiert werden. Gerade im Zusammenhang mit neuen Antriebstechnologien wird eine Verschmelzung der Funktionalitäten der Diagnose aller sicherheitsrelevanten Funktionen und des Energiemanagements einhergehen.

Aufgrund des hohen Kostendrucks werden im Bereich der Diagnose Systeme gefordert sein, die zu einer Verbesserung der gesamten Entwicklungs- und Prozesskette zum Beispiel beim Batteriehersteller führen. Diagnosesysteme müssen nach [Bäk99] also Rückkopplungen zum Entwicklungsprozess, zum Produktionsprozess und der Fertigungsplanung, sowie zum Service aufweisen.(**Abb. 3. 28**).

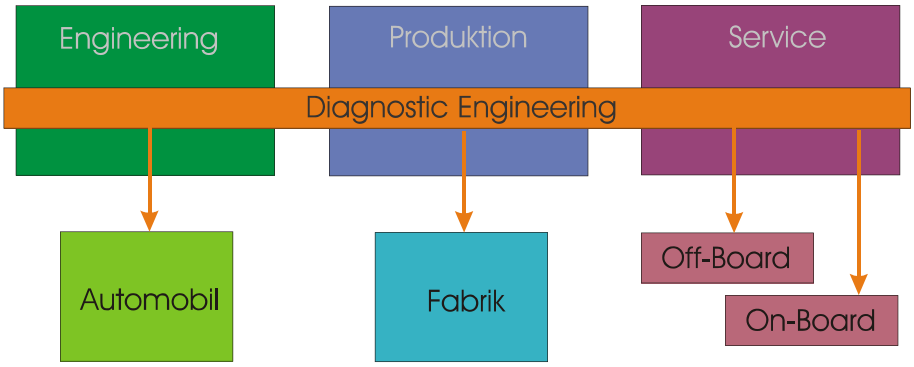


Abb. 3. 28: *Einbindung der Diagnose in den Wertschöpfungsprozeß*

Die Diagnose arbeitet aufbauend auf der Analyse festgestellter Symptome sowie einer modell- und datenbankbasierten Wissensbasis und generiert Fehlermeldungen, die die Art, den Ort und den Grund des Fehlers, verbunden mit der Reaktion auf diesen signalisieren. Der Diagnoseprozess kann nach [Hez99] prinzipiell wie in **Abb. 3. 29** dargestellt werden.

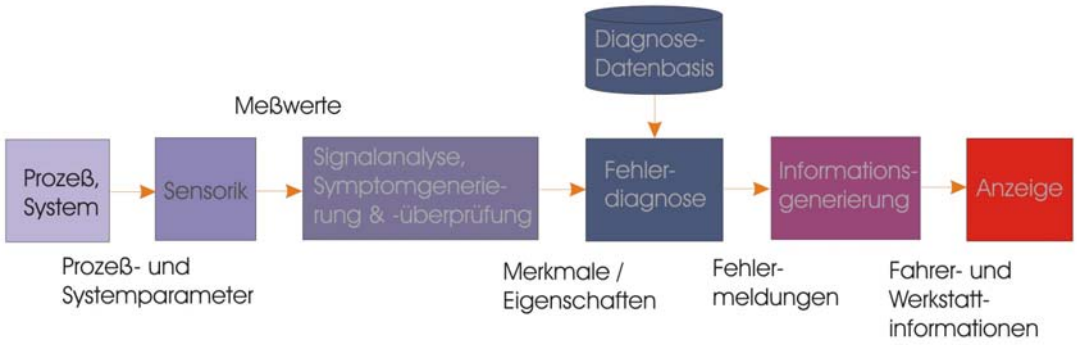


***Abb. 3. 29**: Prinzipielle Darstellung moderner Diagnoseabläufe*

Die in Hybridfahrzeugen vorkommenden hochdynamischen Lastwechsel zwischen den einzelnen Energiespeichern stellen besondere Anforderungen an die verwendeten Steuergeräte und ihre Diagnose sowie die Überwachung der Energiespeicher. Diese müssen sowohl unter funktionalen als auch unter sicherheitsrelevanten Aspekten in Echtzeit überwacht werden. Die unterschiedlichen Funktionsstufen können wie folgt klassifiziert werden:

- reine Information über Betriebsparameter,
- Analyse von Betriebszuständen,
- Fehleranalyse,
- Sicherungsfunktionen im Fehlerfall einleiten.

Im Bereich der Fahrerinformation für Nutzer von Elektrofahrzeugen können über die ‘normalen Bordcomputerfunktionen’ von verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeugen hinausgehende Anforderungen gesehen werden. Zum einen muss eine zuverlässige Energiebilanz des Fahrzeuges über die gesamte Lebensdauer vorliegen. Die Werte der eingeladenen und entnommenen Strommengen müssen manipulationssicher visualisiert und gesichert gespeichert werden. Neben der Nachprüfbarkeit der ‘Verbräuche’ werden diese Daten zur Gewährleistung, gerade beim Batterieleasing, herangezogen.

Ist das Diagnosesystem in der Lage aus Messdaten Rückschlüsse auf das Fahrverhalten zu schließen, so können Fahrerprofile abgespeichert werden, die zum Beispiel beim Einsatz moderner Getriebe die Schaltzeitpunkte individuell steuern und damit den Energieverbrauch senken helfen.

Werkstattinformationen gehen über die Fahrerinformationen hinaus, in der Regel müssen aufgetretene Fehler, auch solche, die dem Fahrer nicht visualisiert werden, über einen bestimmten Zeitraum gespeichert bleiben. Die Werkstattinformationen dienen dem Servicebetrieb zur Eingrenzung und Behebung von Fahrzeugfehlern.

Sowohl für die Fahrer- als auch für die Werkstattinformation sind batteriebezogene Daten zu hinterlegen. Die Verwaltung dieser Daten sollte wegen der Systemverantwortung des Fahrzeugherstellers der Vehicle Management Unit (VMU) obliegen, also losgelöst vom Batteriemanagementsystem sein , welches in der Regel vom Batteriehersteller beigestellt wird. Über verein-

barte Schnittstellen und Protokolle sind Batteriedaten an ein Fahrzeugsteuergerät zu übergeben. Den systemverantwortlichen Fahrzeughersteller interessieren weniger die zellbezogenen Batteriedaten als vielmehr der generelle Gesamtzustand der Batterie.

Daneben müssen auch vom BMS Diagnosedaten aufgezeichnet werden. Im Rahmen der Gewährleistung erhält der Batteriehersteller die Möglichkeit den unsachgemäßen Gebrauch mit Überladungen, Tiefentladungen oder den Betrieb außerhalb definierter Temperaturbereiche nachzuweisen. Die Auswahl der Genauigkeit, der Anzahl und der zeitlichen Tiefe der gespeicherten Daten obliegt dem Batteriehersteller und hängt stark vom Entwicklungsstand der Batterie ab. Allgemein kann konstatiert werden, dass die Auswertung der Diagnosedaten ein verbessertes Wissen über den Zustand der Antriebsbatterie bzw. der einzelnen Module schafft, Service- oder Wartungsarbeiten können bedeutend gezielter durchgeführt werden. Es ist dabei ein klarer Unterschied zwischen einer Batterie, die noch in Praxistests eingesetzt wird, und Batterien, die in Serienfahrzeugen ihren Dienst versehen. Die gewonnenen Daten können nicht nur zur Gewährleistung herangezogen werden, sie können vielmehr zur gesicherten Beobachtung des Batterieverhaltens über die gesamte Lebensdauer herangezogen werden. Damit gewinnt der Batteriehersteller Informationen über das Alterungsverhalten unter realen Betriebsbedingungen und kann zum Beispiel über aus den Daten gewonnene Datenbänken die Fertigungsprozesse optimieren.

3.2 Anwendungsgebiete für Batteriemanagementsysteme

Im Abschnitt 3.1 wurden die allgemeinen Anforderungen an BMS erläutert. Abhängig von der Applikation unterscheidet sich die Betriebsführung der eingesetzten Batteriesysteme teilweise gravierend. Die Lastprofile stellen somit individuelle Anforderungen an die BMS. Dadurch besteht die Notwendigkeit der Anpassung des Batteriemanagementsystems an das jeweilige Applikationsfeld. Selbst im Bereich der Elektrofahrzeuge liegen je nach Typ des Fahrzeuges unterschiedliche Anforderungen an das BMS vor. Die Batteriehersteller optimieren ihre Batteriezellen jeweils auf die Anwendung. Im Kapitel 2 wurde das bereits für die unterschiedlichen Ausprägungen ‘High Energy’, ‘High Power’ und ‘Ultra High Power’ verdeutlicht. Aber auch im Bereich der Bleibatterie gibt es im gleichen Leistungsbereich unterschiedliche Modultypen, zum Beispiel für Starterbatterien, Traktionsbatterien oder Photovoltaikbatterien. Die von der Applikation abhängigen Anforderungen an die BMS beschreibt dieser Abschnitt.

3.2.1 Traktion

Im Bereich batteriebetriebener Traktionsanwendungen sind zur Zeit unterschiedliche Ausprägungen in der Diskussion. Bis ca. 1998 wurden als Elektrofahrzeuge solche Fahrzeuge definiert, die über einen Elektroantrieb und eine Traktionsbatterie als Energiespeicher verfügen. Spätestens mit dem Markterfolg des Toyota Prius und den pessimistischen Marktbeurteilungen rein batteriebetriebener Elektrofahrzeuge hat das Hybridfahrzeug zunehmend an Bedeutung gewonnen. Heute kann ein Fahrzeug als Elektrofahrzeug definiert werden, wenn es unter anderem über einen Elektroantrieb verfügt. Damit sind sowohl Brennstoffzellenfahrzeuge als

auch konventionelle Fahrzeuge mit Integriertem Starter Generator (ISG) im möglichen Boostbetrieb in die Kategorie E-Fahrzeuge einzuordnen. Den ISG-Applikationen ist im Abschnitt 3.2.2 Raum gewidmet, die Ähnlichkeit der Systemstruktur zu dem im Kapitel 5 vorgestellten Energiemanagementsystem zum power-assist batteriebetriebener E-Fahrzeuge rechtfertigt diese Betrachtung.

In diesem Abschnitt soll auf Elektrofahrzeuge und Hybridfahrzeuge eingegangen werden. Die Struktur eines batteriebetriebenen Elektrofahrzeuges kann wie in **Abb. 3. 30** dargestellt beschrieben werden.

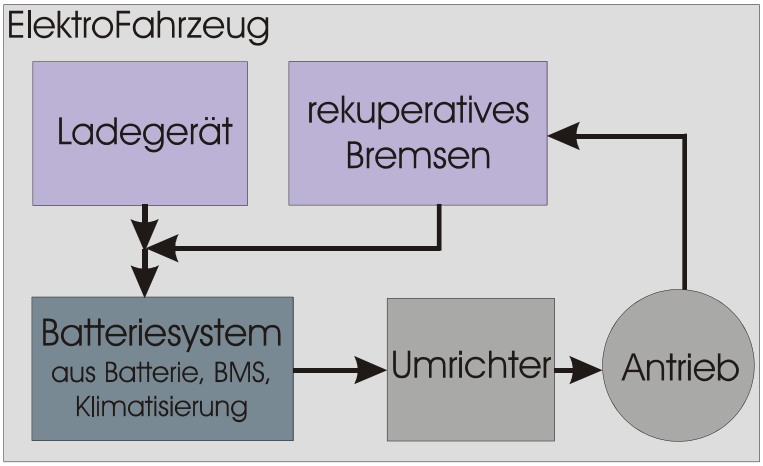


Abb. 3. 30: Prinzipielle Struktur eines batteriebetriebenen Elektrofahrzeugs

Das BMS eines reinen Elektrofahrzeuges muss den Zustand der Antriebsbatterie beurteilen können. Diese Aussage gilt natürlich auch für das BMS eines Hybridfahrzeugs. Die Unterschiede für die BMS unterschiedlicher Fahrzeugkonzepte sind in den voneinander abweichenden Baugrößen, aber auch den unterschiedlichen Lastprofilen mit dem resultierenden unterschiedlichen Batterieverhalten begründet. Beim VW Golf II CitySTROMer des Institutes für Energie- und Automatisierungstechnik der TU Berlin ist eine Traktionsbatterie bestehend aus 16 Batteriemodulen à 6 V/160 Ah in Blei-Gel Technologie im Fahrzeug integriert. Diese 16 Batteriemodule sind räumlich im Fahrzeug verteilt. Zehn Module sind unterhalb des Kofferraumes in einem Batterietrog untergebracht, weitere sechs Module befinden sich unter der Rücksitzbank (**Abb. 3. 31**).

***Abb. 3. 31**: Batterietröge beim Golf II CitySTROMer*

Bei anderen Fahrzeugen ist die Traktionsbatterie auch in zwei Teilbatterien aufgeteilt, wobei zum Beispiel eine Teilbatterie im Motorraum und der andere unterhalb des Kofferraumes untergebracht ist. Im vorliegenden Fall des Golf II CitySTROMers wurde das BMS dezentralisiert aufgebaut. Das bedeutet, dass die einzelnen physikalischen Messwerte gemäß **Abb. 5.4** von separaten Steuergeräten erfasst und über ein gemeinsames Bussystem (CAN) kommuniziert werden. Eine weitere, wie oben bereits erwähnte, räumliche Trennung von Batteriemodulen kann bereits zu einer völlig unterschiedlichen Realisierung der Steuergeräte führen.

Das Lastprofil ist gekennzeichnet durch Beschleunigungen mit Strömen in der Größenordnung (-2...-4) * I_2, Rekuperationen mit (0,5...1,0)* I_2 und einem durchschnittlichen Entladestrom von (-0,5...-1)* I_2 (hier entsprechend dem Strom für Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit von 50km/h) . Ein solches Lastprofil ist in **Abb. 3. 32** als Ausschnitt aus einer innerstädtischen Fahrt mit dem Golf II CitySTROMer dargestellt.

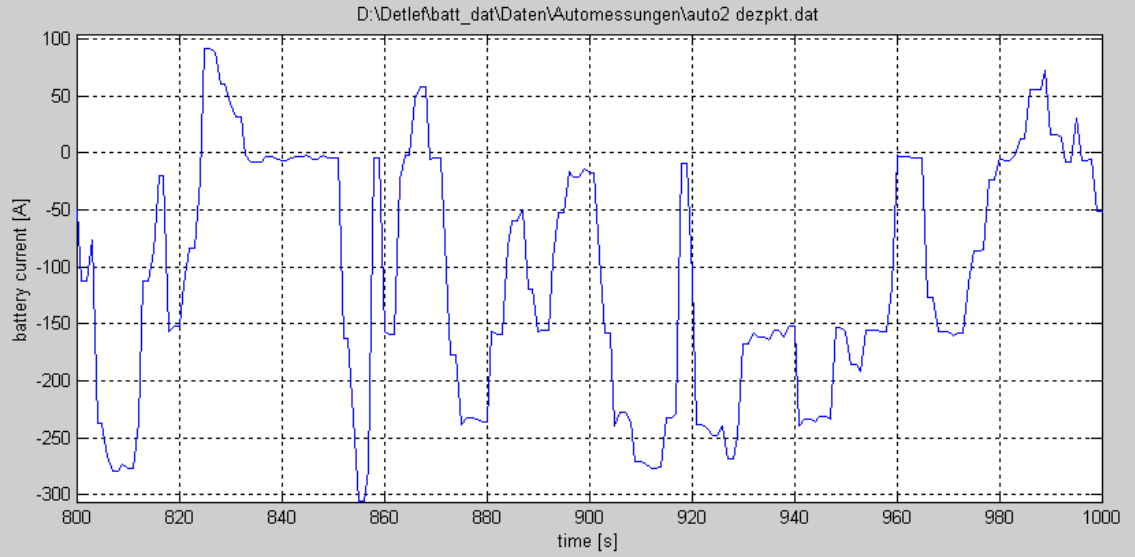


***Abb. 3. 32**: Laststrom-Ausschnitt aus innerstädtischer Fahrt mit Golf II CitySTROMer*

Prinzipiell kann an diesem Lastprofil gesehen werden, dass jede Lastphase für in der Regel 5...10s relativ konstant ist. Das BMS muss nicht mit hohen Messraten betrieben werden. Wie bereits erläutert haben sich Messraten von f_{mess} = 1 Hz bei Strom- und Spannungsmessungen als ausreichend genau erwiesen. In **Abb. 3. 33** wird nochmals ein Ausschnitt aus einem innerstädtischen Fahrzyklus gezeigt. Dieser ist dem anderen untersuchten Fahrzeug vom Typ cityEL der CITYCOM AG im rein batterieelektrischen Betrieb entnommen. Dieses Fahrzeug verfügt über kein Getriebe, wodurch das Lastprofil aufgrund fehlender Schaltvorgänge nochmals geglättet ist. Der Maximalstrom ist bei diesem Fahrzeug werkseitig auf 130 A(2,6* I_2) begrenzt. Im ausbeschleunigten Zustand wird die Batterie mit einem Strom von 50-60 A ((1,0...1,2)*I_2) bei einer Maximalgeschwindigkeit von 50 km/h belastet. Rekuperation ist bei diesem Fahrzeug im Auslieferungszustand nicht vorgesehen. Maximalbeschleunigungen dauern beim cityEL abhängig von der Batterietemperatur ungefähr 10-15 s. Betrachtet man im Traktionsbetrieb den Durchschnittsstrom seit Beginn der Fahrt, so fällt auf, dass bei einer konstanten Fahrweise nach einem gewissen Einschwingen zum Beginn der Fahrt ein nahezu konstanter Durchschnittsstrom vorliegt. Diese Erkenntnis wird im Kapitel 4 bei der Beschreibung des Fuzzy-SOC-meters eine wesentliche Rolle spielen. **Abb. 3. 33** zeigt den Durchschnittsstrom seit Beginn der Fahrt bei einem realen Lastprofil.

Beim cityEL erfolgt die Speisung des Antriebes aus drei Batteriemodulen mit je 12 V/100 Ah. Aufgrund kleinen Bauraumes und aufgrund der wenigen zu messenden Signale wurde das BMS für dieses Fahrzeug entsprechend anders strukturiert. Das Batteriemanagement ist bei diesem Fahrzeug in ein einziges Steuergerät integriert.

Dieses Prinzip wird im Kapitel 6 deutlich, dort wird die zusätzliche Integration eines power-assist Speichers in das Fahrzeug beschrieben. Sämtliche Steuergerätefunktionen des resultierenden Energiemanagementsystems sind softwaremäßig in einem Steuergerät implementiert.

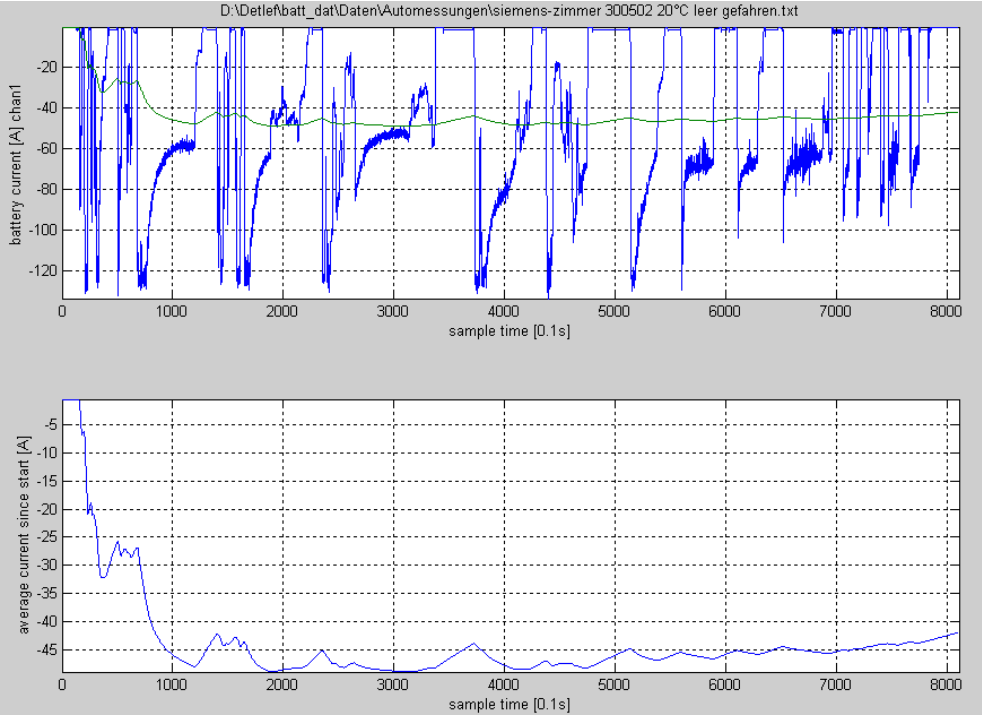


***Abb. 3. 33**: Verlauf des Laststromes (blau) und des Durchschnittsstromes (grün) über der Zeit beim cityEL*

3.2.2 Hybridfahrzeug

Mittlerweile arbeiten alle großen Fahrzeughersteller an eigenen Lösungen zur Hybridisierung des Antriebsstranges. Hybridantriebe können in zwei unterschiedliche Gruppen unterteilt werden:

- Serieller Hybrid,
- Paralleler Hybrid,
- Leistungsverzweigter Hybrid

Beim seriellen Hybrid arbeitet der Verbrennungsmotor auf einen Generator, der einen Elektromotor antreibt. Dieser arbeitet auf die Antriebswelle. Die Kombination Generator/E-Motor dient als Getriebe, welches gleichzeitig Drehmoment und Drehzahl wandelt. In Kombination mit einer Batterie kann der Verbrennungsmotor ständig in einem optimalen Betriebspunkt gehalten werden.

Der parallele Hybrid setzt sich aus einem konventionellen Antriebsstrang und einem zusätzlich als Antriebskraftquelle dienenden Elektromotor zusammen. Der Elektromotor wird vor dem Getriebe ‘parallel’ zum Verbrennungsmotor additiv betrieben.

Als ein Mischsystem kann der leistungsverzweigende Hybrid angesehen werden. Dieses Prinzip wird zum Beispiel im Toyota Prius als Toyota Hybrid System (THS) in hohen Stückzahlen

eingesetzt. Das im Kapitel 5 vorgestellte hybride Antriebssystem für Elektrofahrzeuge weist einige Parallelen zur Electronic Control Unit (ECU) des THS auf, so dass dieses sehr variable System kurz erläutert wird.

Der Verbrennungsmotor arbeitet hier, wie in **Abb. 3. 34** dargestellt, auf ein leistungsverzweigendes Planetengetriebe. Von dort kann Leistung mechanisch auf das Radsatzgetriebe oder auf den Generator geleitet werden. Vom Generator erzeugte elektrische Leistung wird über einen Gleichrichter in den Gleichspannungszwischenkreis eingespeist und von dort entweder in die Batterie oder über den Wechselrichter in den Fahrmotor geleitet. Zum Anfahren oder für niedrige Geschwindigkeiten wird der Verbrennungsmotor abgeschaltet und rein elektrisch aus der Batterie gefahren (A). Bei durchschnittlichem Leistungsbedarf, dem normalen Fahrbetrieb, wird die vom Verbrennungsmotor gelieferte Leistung sowohl über den mechanischen (B) als auch den elektrischen Pfad (C) geleitet. Bei Anforderung von Volllast wird dem Elektromotor zusätzliche Energie aus der Batterie zugeführt. Jede Verringerung der Geschwindigkeit führt zum Generatorbetrieb des E-Motors und damit einer Rückspeisung in die Batterie (Pfad A rückwärts). Sollte der SOC der Batterie unter ein bestimmtes Niveau fallen, so wird die Batterie über den Pfad D nachgeladen [Kil99].

Insgesamt kommunizieren fünf Steuergeräte innerhalb des THS:

1. Hybrid ECU
2. Motor ECU
3. Engine ECU
4. Brake ECU
5. Battery ECU

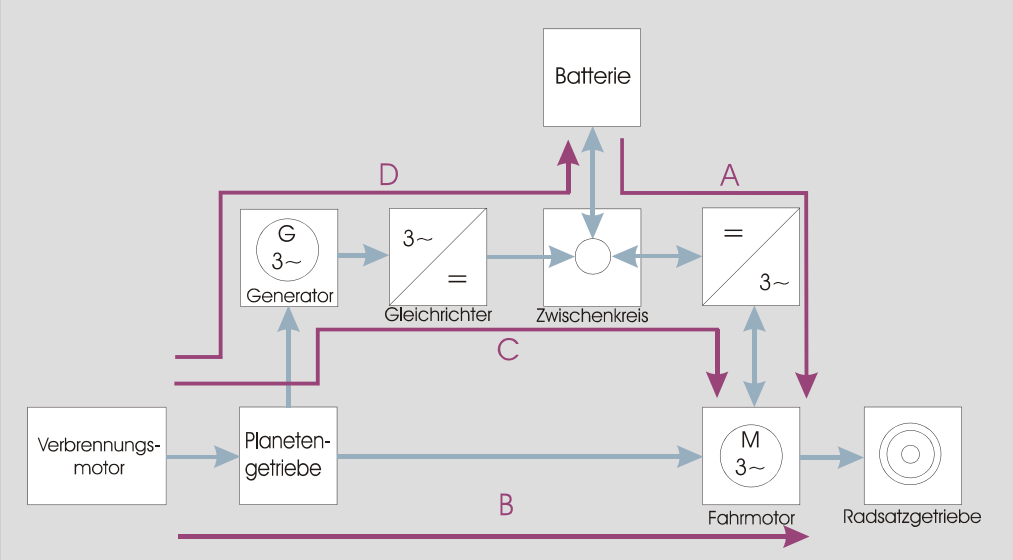


Abb. 3. 34: ***Toyota Hybrid System [Buc98]***

Die Hybrid ECU steuert das Gesamtsystem, indem Führungsgrößen an die anderen ECUs

kommuniziert werden. Die Inverter für den Gleichrichter und den Fahrmotor werden von der Motor ECU gesteuert, diese empfängt von der Hybrid ECU z.B. als Führungsgröße das Drehmoment des Fahrmotors. Die Engine ECU ist das klassische Motorsteuergerät des Verbrennungsmotors und erhält als Führungsgröße von der Hybrid ECU die Drehzahl als Führungsgröße vorgegeben. Die Brake ECU regelt die Verzögerung in Abhängigkeit des Bremspedals, so dass regeneratives Bremsen vom Verhalten her dem der hydraulischen Bremse entspricht. Der Battery ECU ist es vorbehalten für den optimalen SOC der Batterie zu sorgen. Die größten Belastungen erfährt die Batterie beim power-assist, wenn die Bereitstellung der Spitzenlast erfolgt, und bei der Verzögerung. Da die Batterie immer nur in einem bestimmten SOC-Fenster betrieben wird, kommt der Bestimmung des SOC in Echtzeit eine besondere und schwer zu realisierende Bedeutung zu. Dabei muß der SOC so genau bestimmt werden, dass der SOC immer so hoch ist, dass Beschleunigungen problemlos aus der Batterie gefahren werden können und regeneratives Bremsen in die Batterie vollständig ermöglicht wird. Dazu kann die Battery ECU Anforderungen zum Nachladen und Entladen an die Hybrid ECU absenden. Neben der SOC-Regelung muß das Betriebsverhalten der Batterie optimiert werden [Hir01]. Dazu werden von der Battery ECU mehrere Messungen zur Feststellung unerlaubter Betriebszustände der Batterie durchgeführt. Im Fehlerfall wird eine Fehlermeldung generiert, bei gefährlichen Fehlern wird die Batterie physikalisch von den anderen Systemen getrennt.

3.2.3 Bordnetz

Im konventionellen Fahrzeug mit Verbrennungsmotor zeichnen sich Veränderungen der elektrischen Anlage ab. Seit mehr als 30 Jahren hat sich die 12 V Batterie im 14 V Bordnetz etabliert. Diese ist eingeführt worden, als sich die bis dahin eingesetzte 6 V Batterie als zu leistungsschwach erwiesen hat. Unter allen Automobilherstellern ist man sich einig, dass zukünftige weitere Leistungssteigerungen nur mit einer Erhöhung der Bordnetzspannung erreicht werden können. Die heute üblichen Standardisierungen und der Einsatz ähnlicher Komponenten bei unterschiedlichen Fahrzeugherstellern haben dazu geführt, dass mehrere Automobilhersteller zwei Arbeitskreise (Forum Bordnetzarchitektur, MIT Automotive Consortium) gründeten, die eng miteinander zusammenarbeitend eine Norm für das Bordnetz entwerfen. Auch für das neue Bordnetz zeichnet sich keine Einheitslösung ab, da die Veröffentlichungen einzelner Hersteller und Zulieferer sowohl in der Bedarfskalkulation als auch in den Zielvorstellungen divergieren. BMW [Pfa99] rechnet damit, dass die Grenze im 14 V-Netz bei Generatoren mit 100/180 A Nennstrom liegen wird. Damit wären Leistungen bis 2,5 kW erreichbar, ein Wert, der momentan noch nicht erreicht ist. Die sich im Fahrzeug durchsetzenden Innovationen werden allerdings einen Leistungsbedarf von 4...5 kW erfordern. Einige der neuen Systeme erfordern zwangsläufig das 42 V-Netz. Die noch vor wenigen Jahren angekündigte schnelle Einführung des 42 V-Netzes wird sich allerdings verzögern. Aufgrund vieler bewährter Komponenten, die nur schwer ins 42 V-Netz zu übertragen sind, wird das 42 V-Netz als Zwei-Spannungs-Netz in das Auto einziehen. Die mögliche Struktur dieses Zwei-Spannungs-Netzes ist in der folgenden **Abb. 3. 35** dargestellt, wobei das System um einen Doppelschichtkondensator (Ultracap) ergänzt wurde und damit prinzipiell zu einem Drei-Spannungs-Netz erweitert wurde.

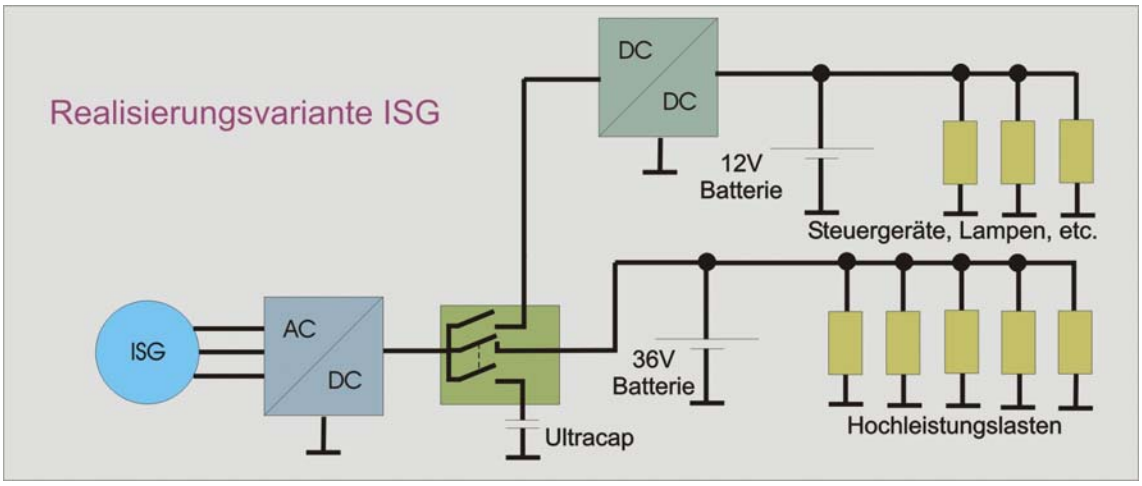


***Abb. 3. 35**: Mögliches Zweispannungsnetz mit Integriertem Starter Generator (ISG) in zukünftigen Systemarchitekturen*

Die neue Architektur strebt neben der Ermöglichung neuer Komponenten auch eine Erhöhung des Wirkungsgrades an. Durch die Erhöhung der Spannung und die Verlagerung der Hochlastverbraucher auf die Nennspannung von 42 V werden zum Beispiel die Gleichrichterverluste beim Generator gedrittelt. Auch durch die Reduzierung der Ströme werden Einsparungen möglich, da eine Reduzierung der Querschnitte möglich wird und der Einsatz von Halbleiterschaltern sowie kleineren Steckverbindern die Systemkosten verbilligt. Das erforderliche Bordnetzmanagement wird die Verfügbarkeit und Betriebssicherheit erhöhen. Der bidirektionale DC/DC-Wandler und die Redundanz der Energiespeicher ermöglichen in der Zukunft den Einsatz sicherheitskritischer Systeme wie zum Beispiel die x-by-wire-Anwendungen. Der Generator muß im System auf die größte auftretende Dauerlast ausgelegt werden [SIC97].

Das Bordnetzmanagement (BNM) hat die notwendige Spitzenleistung durch ein intelligentes Lastmanagement zu minimieren. Dieses kann sowohl über die zeitgesteuerte Schaltung einzelner Verbraucher wie auch über die Ansteuerung der Verbraucher mit PWM-Signalen erreicht werden. Das BNM hat die Aufgaben der Überwachung der Ladezustände der Energiespeicher (durch Kenntnis oder Bestimmung) und die Energieanforderungen zu koordinieren. Der Bestimmung des Ladezustandes kommt wegen der angesprochenen sicherheitskritischen Applikationen eine gesonderte Rolle zu. Ob die SOC-Bestimmung durch das BNM oder ein separates BMS durchgeführt wird, hängt im Wesentlichen von der Wahl des Batteriesystems ab. Im Hochlastbereich wird zur Zeit NiMH favoritisiert, bestimmte Hersteller denken aber auch an den Einsatz von Ultracaps zur Bereitstellung und Aufnahme von Leistungsspitzen. Für diesen Fall müßte der Ultracap entgegen der Darstellung in der obigen Abbildung im 42 V PowerNet implementiert werden. Dort stellt der Ultracap eine aus dem 42 V Netz losgelöste Variante dar und steht ausschließlich zur Versorgung/Rekuperation des ISG zur Verfügung. Die Variante den Ultracap in das 42 V Bordnetz zu integrieren wurde im Versuchsfahrzeug cityEL realisiert und ist im Kapitel 6 beschrieben.

Bei abgeschaltetem Motor betriebene Verbraucher der 42 V Seite müssen vom BNM abschaltbar sein. Starthilfe erfordert gesonderte Steckverbinder um gefährliche Zustände durch die

Verbindung eines konventionellen 12 V Fahrzeuges mit einem 42 V Fahrzeug zu vermeiden.

Problematisch bei der Simulation der Lastmomente ist die Tatsache, dass der Energiebedarf neuer Komponenten teilweise nur abschätzbar ist. Für bestimmte Komponenten müssen diese Schätzungen Grundlage von Simulationen in Referenz-Fahrzyklen sein (z.B. Lenkhäufigkeit bei elektrischer Servolenkung).

In der eingangs genannten Topologie ist die 12 V Seite klassisch gestaltet, der Generator mit ca. 4,5 kW wurde auf die 42 V Seite verlagert und sitzt weiterhin am Riementrieb. Die Speisung des 12 V-Netzes erfolgt über den DC-DC Wandler. Auf der 42 V-Seite wird ein Powermodul integriert, welches für das Energiemanagement des gesamten Bordnetzes verantwortlich ist . Es hat somit für ein ausgewogenes Lastverhalten der Summe der Hochstromverbraucher, für den Energiefluss ins 12 V-Netz und die Sicherstellung eines Mindestladezustandes des Energiespeichers in Kommunikation mit dem BMS der 36 V-Batterie zu sorgen. Der DC-DC Wandler muss aus Kostengründen ein möglichst kleines Volumen haben. Die Leistung sollte deshalb 1 kW nicht überschreiten. Das erfordert allerdings die Umstellung von 12 V Komponenten auf 42 V. In der Umstellungsphase entstehen Kosten durch eine größere Variantenvielfalt an Systemen, da die 12 V Systeme weiterhin gepflegt werden müssen, neue Komponenten jedoch eingeführt werden. Die Einführung scheint eher evolutionär zu erfolgen, somit kann die Bandbreite innerhalb einer Baureihe gezielt bedient werden. Am Beispiel zweier eher trivaler Aggregate kann die Notwendigkeit des 42 V-Netzes erkannt werden. Der Kühlerlüfter ist in modernen Fahrzeugen der Mittel- oder Unterklasse zumeist elektrisch betrieben. In Oberklassefahrzeugen wären Kühlleistungen von ca. 1 kW erforderlich, zu viel für das momentane Bordnetz. Als weiteres Beispiel kann man PTC-Zusatzheizungen anführen, die aufgrund des hohen thermischen Wirkungsgrades moderner DI-Motoren zur Versorgung des Innenraumes notwendig werden. Alternativ zur elektrischen Zuheizung könnte eine konventionelle Standheizung eingebaut werden, diese Variante ist jedoch teurer als die elektrische. Die elektrische Heizung könnte in das Heiz-Klimagerät integriert werden. Durch dieses Aggregat werden vom Bordnetz während kurzer Phasen über 1 kW entnommen. Prinzipiell werden auch im 42 V-Netz unterschiedliche Kapazitäten der Batterie vorzufinden sein. Kommt das Basismodell einer Baureihe eventuell noch ohne 42 V-Netz aus, so kann das Topmodell bereits einen großen Energiebedarf aufweisen. Die Batterien müssen also in der Kapazität skalierbar sein, das BMS muss dann auf die Batterie abgestimmt werden. Das BMS muss in diesem Zusammenhang entweder vollständig in die Batterie integriert sein, oder aber an jede denkbare Batterie adaptierbar sein. Größte Bedeutung gewinnt die Bestimmung des SOC und des SOH gerade dann, wenn sicherheitsrelevante Systemkomponenten integriert werden. Daneben ist die Hauptaufgabe die der Bereitstellung der angeforderten Energie. Hier wäre es denkbar das Lastmanagement direkt vom BMS zu steuern. Sämtliche Verbrauer würden ein ‘Last-Request’ mit spezifizierter Last an das BMS senden. Dieses kann mit einem Acknowledge (ACK), einem bedingten Acknowledge (BACK) oder einen negativen Acknowledge (NAK) quittieren. Im Falle des BACK kann eine reduzierte Leistungszuweisung z.B. für die Innenraum- oder die Sitzheizung erteilt werden. Der technische Aufwand des BMS wird gegenüber der Struktur beim EV reduziert sein, der Softwareaufwand jedoch dementsprechend wachsen. In ***Tab. 3.1*** sind wesentliche elektrische Verbraucher des 42 V-Netzes mit ihren maximalen und den typischen Lasten angegeben.

Tab. 3.1: *Typische Lasten von ausgesuchten Verbrauchern im 42 V Bordnetz*

Verbraucher	Pmax [W]	Ptyp. [W]	Verbraucher	Pmax [W]	Ptyp. [W]
Starter	2500	2500	Wasserpumpe	300	300
Katalysatorvorheizung	3000	3000	brake-by-wire	2000	250
aktive Dämpfung	3000	3000	Motormanagement	300	220
Power Steering Pump	1000	1000	ABS/TC	600	600
heizbare Frontscheibe	1000	500	Lampen	600	600
Motorlüfter	800	500	Türmodul	400	400
Innenraumgebläse	500	220	Sitzheizung	180	15

3.2.4 Photovoltaik als stand-alone Lösung

Photovoltaiksysteme können zur Einspeisung ins Netz oder als stand-alone Lösungen realisiert sein [Har98]. Stand-alone Lösungen erfordern ein BMS. Häufig werden VRLA-Bleibatterien eingesetzt [Exi06]. Die Batterien werden anders zykliert als zum Beispiel in Elektrotraktionsanwendungen. Typischerweise werden sie tagsüber geladen und in den Abendstunden entladen. Der Vollladezustand muss dabei nicht erreicht werden. Abhängig von den Lichtverhältnissen kann der Vollladezustand über längere Zeiträume nicht erreicht werden, im schlimmsten Fall werden die Batterien über einen längeren Zeitraum bei minimalem SOC betrieben, was eine erhöhte Sulfatisierung hervorruft. Die Ladung der Batterien erfolgt mit Ladeströmen, die wieder vom Lichteinfall abhängig sind, so dass kein optimiertes Ladeverfahren genutzt wird. **Abb. 3. 36** zeigt einen angenommenen Verlauf des SOC während eines Monats [Dur01].

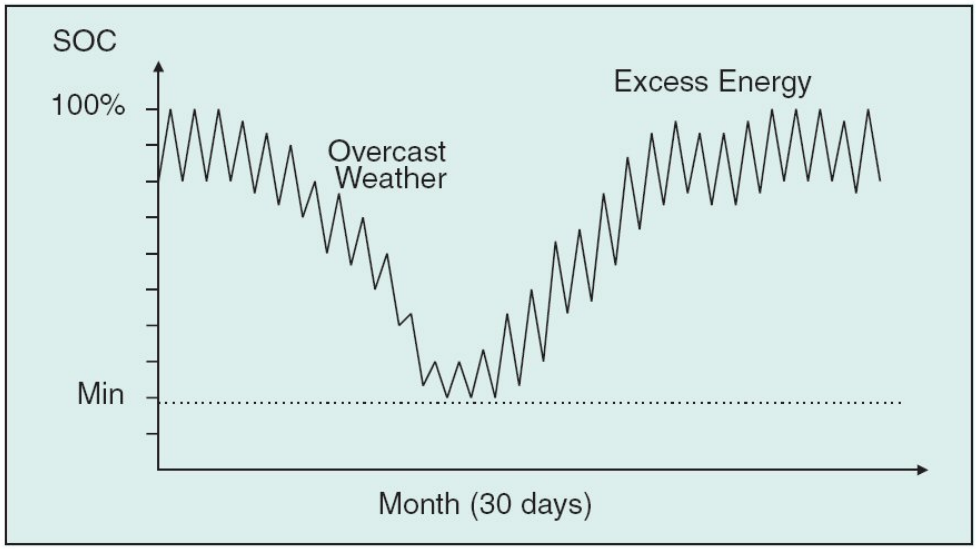
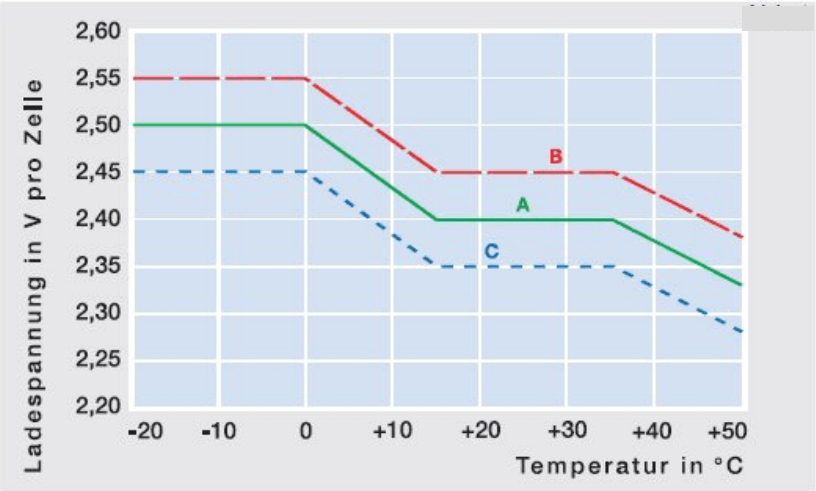


Abb. 3. 36*: Verlauf des SOC einer PV Batterie während eines Monats [Dur01]*

Während bewölkter Phasen ist die nachgeladene Ladungsmenge kleiner als die durch die Lasten abgeführte Ladungsmenge. In diesem Fall wird der SOC im Tagesmittel sinken. Erreicht der SOC einen unteren minimalen Wert, so muss das Batteriemanagementsystem eine weitere Ladungsentnahme mit resultierender Tiefentladung verhindern. Das BMS hat somit bei niedrigem SOC keinen direkten Einfluss auf die zur Verfügung stehende Ladung, es kann nur die Entnahme von Ladung verhindern. Im schlimmsten Fall sind die Batterien damit über längere Zeiträume mit einem niedrigen SOC kalten Temperaturen ausgeliefert, woraus eine Schädigung der Batterie resultiert. Exide schreibt für seine VRLA Bleibatterie der Baureihe Sonnenschein SOLAR das in **Abb. 3. 37** gezeigte Ladeprinzip vor.



Ladeverfahren

1.) mit Umschalter (2-Punkt Regler)
- Laden an Kurve B (max. Ladespannung) für max. 2h/Tag
  dann Umschaltung auf Dauerladen - Kurve C

2.) Standardladung (ohne Umschaltung) - Kurve A

3.) Starkladung (Ausgleichsladung mit externem Generator)
- Laden an Kurve B für max. 5h/Monat,
  dann Umschaltung auf Kurve C

Abb. 3. 37: *Ladeverfahren fürSonnenschein SOLAR Batterien nach [Exi06]*

Das Ladeverfahren kann natürlich nur umgesetzt werden, wenn mindestens so viel Ladestrom zur Verfügung steht, dass die Ladespannungen auch erreicht werden. Die Bestimmung des SOC ist bei Photovoltaik Applikationen erschwert, da Rekalibrierungen über die Vollladung unregelmäßig erfolgen. In diesem Fall muss die Selbstentladung der Batterie in alle Berechnungen einbezogen werden, eine reine Ladungsbilanzierung führt zu sehr großen Abweichungen zwischen berechnetem und tatsächlichem SOC. Eine Rekalibrierung des SOC über eine temperaturkompensierte Messung der Ruhespannung ist dann durchaus sinnvoll. Diese Methode ist im

Kapitel 4 beschrieben. Wird nur die Modulspannung zur Vermeidung der Tiefentladung herangezogen, so werden durch geringe Entladeströme hervorgerufene kritische Betriebszustände nicht erkannt [Gar00].

3.2.5 Portable Geräte

Die Forderung nach immer längeren Laufzeiten batteriebetriebener Geräte wie zum Beispiel Notebooks, PDAs, Mobiltelefonen, Camcordern oder digitalen Fotoapparaten hat zur Einführung von Batteriemanagementfunktionalitäten auch in diesen Geräten geführt. In diesen Bereichen ist eine ständige Miniaturisierung bei gleichzeitiger Kostenreduktion zu beobachten. Für die Realisierung des Batteriemanagementsystems stehen nur wenige Quadratzentimeter zur Verfügung. Somit ist eine Fokussierung auf wenige hochintegrierte Bausteine notwendig. In den genannten portablen Geräten werden zumeist Lithium-Systeme eingesetzt. Die Anzahl der Zellen kann dann von einer Zelle bei Fotoapparaten oder Mobiltelefonen (z.B. 3,6 V/700 mAh) bis zu vier Zellen bei Notebooks (z.B. 14,8 V/4,3 Ah) betragen. Kernforderungen an das Batteriemanagement sind hier die Betriebssicherheit, die Zuverlässigkeit, ein schonendes Lademanagement und eine akkurate Restenergie- und Restlaufzeitanzeige. Eine genaue Erfassung des Stromes und der Temperatur sind notwendig. Gerade bei Mobiltelefonen kann der Laststrom im Stand-by bei wenigen mA und im Gespräch bei über 500 mA liegen. Den Strom in diesem weiten Bereich genau zu erfassen ist eine der Kernaufgaben des Batteriemanagements [Fun98]. Für diese Anwendungsfälle werden von einigen Halbleiterherstellern Lösungen als Monitoring- [Jac05] und Lade-IC [For98] angeboten. **Abb. 3. 38** [FfE03] zeigt das Lastprofil eines Notebooks bei typischer Officeanwendung.

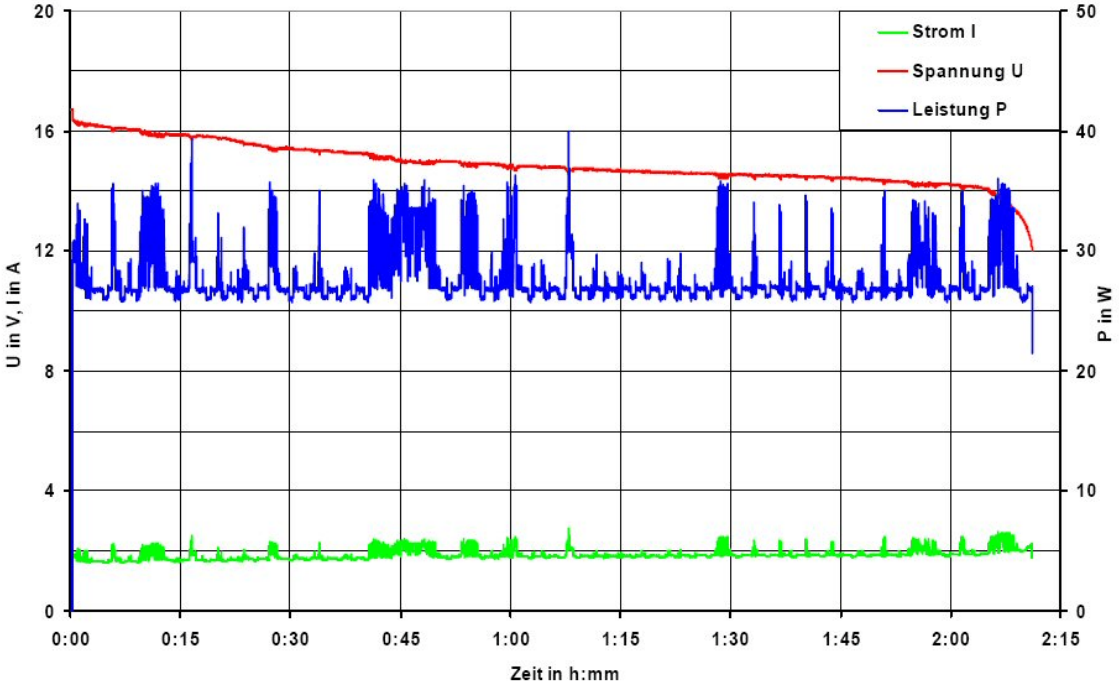
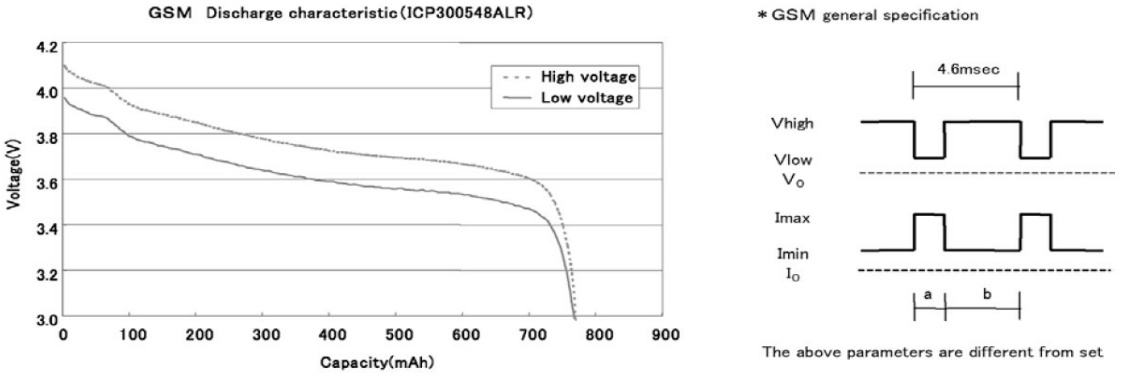


***Abb. 3. 38**: Typisches Lastprofil eines Notebooks bei Officeanwendungen nach [FfE03]*

Die Entladekennlinie und das dynamische Lastprofil einer Lithium-Ion Mobiltelefonbatterie zeigt **Abb. 3. 39** nach [Tak03].



(a) Discharge curve at 20°C (Left). (b) GSM pulse pattern (Right).

***Abb. 3. 39**: Entladeverhalten einer Li-Ion Batterie bei GSM-Profil nach [Tak03]*

Das Package aus Zelle und Batteriemanagement in **Abb. 3. 40** wird nach [Tak03] an der gleichen Batterie verdeutlicht.

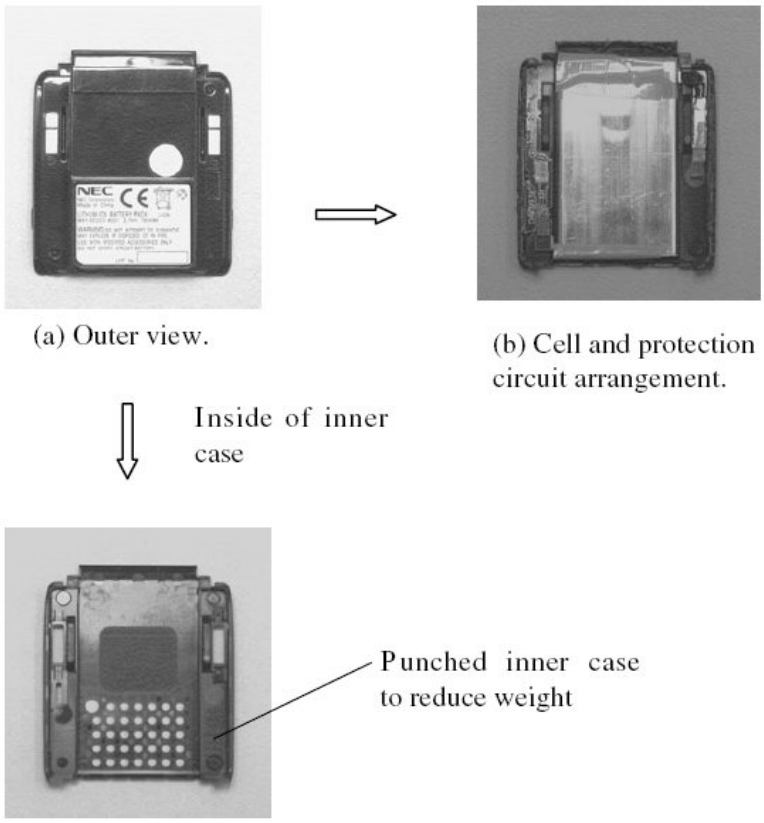


***Abb. 3. 40**: Konstruktiver Aufbau einer Li-Ion Mobiltelefonbatterie von NEC nach [Tak03]*

Das BMS muss in diesem Applikationsfeld aufgrund der räumlichen Beschränkungen hochintegriert sein. Prinzipiell müssen Lösungen verwendet werden, die die Messdatenerfassung und Messdatenverarbeitung auf einem Chip realisieren.

Seit ca. 2003 sind auf dem Markt aus Asien kommend viele Plagiate und Nachbauten der offiziell eingesetzten Batterien zu finden. Diese Plagiate weisen oftmals nicht die bei Lithium-Ion unbedingt notwendigen elektronischen Sicherheitsmechanismen auf. Im Falle von Überladungen entstehen Gefährdungen durch möglicherweise explodierende Gerätebatterien. Eine explodierte Lithium-Ion Batterie zeigt **Abb. 3. 41** nach [Bat04].

***Abb. 3. 41**: Auswirkungen bei nicht vorhandenem oder unzureichendem Batteriemanagements*

3.3 Strukturen von Batteriemanagementsystemen für unterschiedliche Batteriesysteme am Beispiel von Traktionsanwendungen in ESF

Allgemeine Anforderungen an Batteriemanagementsysteme wurden bereits im Abschnitt 3.1 ausführlich dargestellt. Abschnitt 3.2 hat verdeutlicht, dass das Batteriemanagement unterschiedliche Aufgaben bei unterschiedlichen Anwendungsbereichen im Gebiet Automotive gestellt bekommt. An dieser Stelle soll verdeutlicht werden, wie das Batteriemanagement auf die zu managende Batterie zugeschnitten werden muss. Dabei ist die Struktur klar durch das eingesetzte Batteriesystem definiert, da jedes Batteriesystem über besondere Anforderungen an das managende BMS verfügt.

3.3.1 Grundlegende Struktur von Batteriemanagementsystemen

Allen Systemen kann die Notwendigkeit der Auswertung von Spannung, Strom und Temperatur zugeschrieben werden. Dieses Grundprinzip ist in **Abb. 3. 42** dargestellt. Für die einzelnen Batteriesysteme ist dann zu klären, wie viele Spannungen oder Temperaturen ausgewertet werden müssen und wie viele Zellen in einem Modul integriert werden. Zum Beispiel geht man davon aus, dass beim Lithium-Ion System jede einzelne Zellenspannung überwacht werden muss. Aufgrund gesteigerter Fertigungsqualität ist heute absehbar, dass zukünftig zwei Zellen zu einem Submodul zusammengefasst werden können.

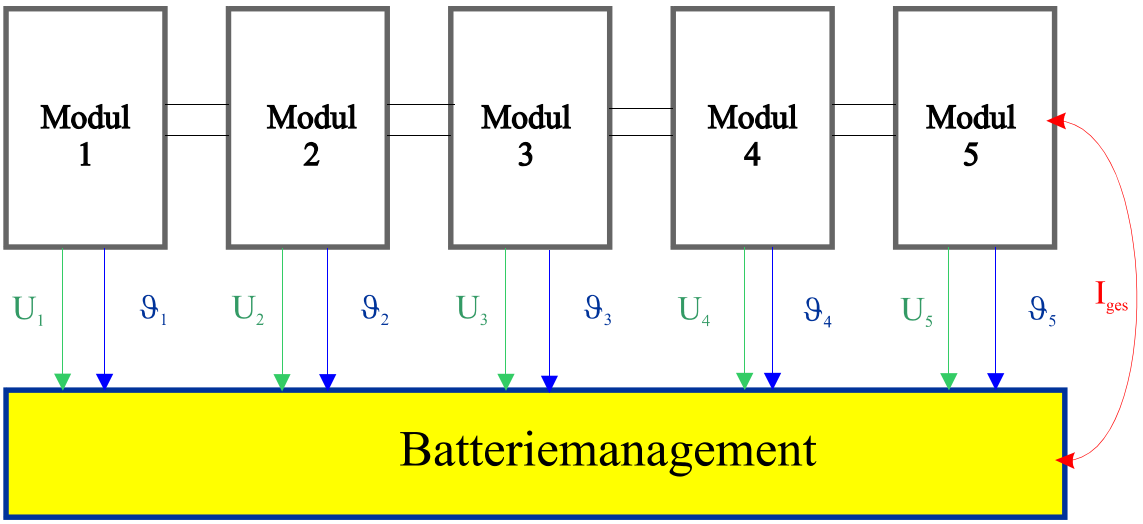


Abb. 3. 42: *Grundlegendes Prinzip des Batteriemanagements*

Die niedrige Zellenspannung des NiMH Systems erfordert zum Beispiel in realen Fahrzeuganwendungen die Gliederung in anderen Modulen, als das beim Li-Ion System möglich ist. Fasst man zum Beispiel 10 NiMH zu einem 12V Modul zusammen, so kann das bereits als Resultat eine andere Struktur des BMS bedingen, als wenn man 20 Zellen zu einem 24V Modul zusammenfasst. Lädt man NiMH Module nach dU/dt Abschaltkriterium, so wird das Maximum beim inhomogenen 10-zelligen Modul eher und stärker ausgeprägt sein als beim 20-zelligen.

Bis ca. Mitte der 90er Jahre waren elektrische Straßenfahrzeuge in der Regel als ‘pure electric vehicle’ im ‘conversion design’ ausgeführt. Als Batteriesystem wurden aus Kostengründen zumeist Blei Systeme eingesetzt. Batteriemanagementsysteme waren damals in der Regel nicht vorgesehen, sie konnten nachgerüstet werden, wurden aber nicht von den Batterieherstellern bereitgestellt, sondern von kleineren Ingenieurbüros entwickelt und vertrieben.

Weit verbreitet war damals das Gerät BADICHEQ der Firma mentzer electronic [Men96], nachrüstbar zum Einsatz mit Bleisystemen. Über eine Relaismatrix wurden nacheinander die einzelnen Modulspannungen und der Fahrstrom gemessen. Die noch verfügbare Ladungsmenge wurde bestimmt und mit dem Fahrstrom über ein vier-stelliges 7-Segment Display ausgegeben. Über eine RS232 Schnittstelle konnten bereits Diagnosedaten an einen PC übermittelt und dort visualisiert werden. Nachteilig war das zeitsequentielle Messverfahren der Modulspannungen, welches für einen Messvorgang mehrere Sekunden benötigte und deshalb keine direkt vergleichbaren Messwerte der Modulspannungen erzeugte. Trotzdem konnten kapazitätsarme Module sicher erkannt werden. BADICHEQ war selbst in der Lage das Bordladegerät zu steuern und über einen integrierten Zusatzlader Ausgleichsladungen für nicht voll geladene Module durchzuführen.

In modernen Konzeptionen des Batteriemanagements ist das BMS auf die Integration in ein Gesamtfahrzeugkonzept zugeschnitten. Das BMS liefert dann Daten an übergeordnete Steuergeräte wie das Energiemanagementsystem oder das zentrale Fahrzeugsteuergerät. In diesen Fällen liefert das BMS zum Beispiel bei batterieschädigenden Zuständen entsprechende Warnmeldungen an das übergeordnete Gerät ohne selbst in den Traktionskreis einzugreifen. Die übergeordneten Steuergeräte fassen Informationen aller Fahrzeugverbraucher zusammen bzw. werten diese aus. Aus den gewonnenen Informationen wird dann gemäß der Betriebsstrategie eine Leistungsreduktion einzelner Komponenten, nicht zwangsläufig des Antriebes, veranlasst. Eine solche moderne Fahrzeugstruktur eines batteriebetriebenen Elektrofahrzeuges zeigt **Abb. 3. 43**.

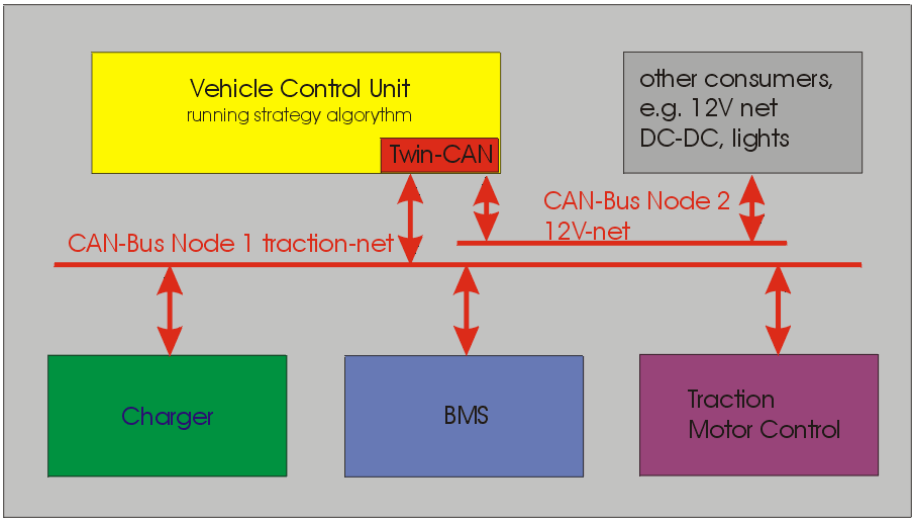


***Abb. 3. 43**: Beispielkonfiguration elektronischer Steuergeräte im Elektrofahrzeug*

Das BMS stellt in einer solchen Struktur Batteriedaten zur Verfügung. Aufgrund des Aufbaus des CAN-Bus kann jeder Teilnehmer die gesendeten Nachrichten empfangen und individuell

reagieren. Somit kann zum Beispiel die Traction Motor Control (TMC) direkt auf Tiefentladungsmeldungen des BMS reagieren und eine Leistungsbegrenzung des Antriebes initiieren. Aufgrund der Vielzahl der unabhängigen Gerätefunktionen im Fahrzeug ist diese dezentrale Lösung jedoch unvorteilhaft. Es macht vielmehr Sinn, dass alle Komponenten mit der Vehicle Control Unit (VCU) als übergeordnetem Master kommunizieren und diese gemäß ihrer Betriebsstrategie die einzelnen Geräte verwaltet. Die Verteilung der Informationen auf unterschiedliche logische CAN-Netze bietet zudem Vorteile bezüglich der logischen Zuordnung der Systemkomponenten. Eine ähnliche Struktur ist zum Beispiel beim e-KA von Ford realisiert worden. Die Betriebsstrategie wird in diesem Fall nur von einem Steuergerät überwacht, ist also einfacher zu realisieren.

Bei notwendiger Limitierung der zu entnehmenden Leistung kann die VCU neben dem Antrieb auch andere Komponenten des Fahrzeugs kurzzeitig deaktivieren, so dass eine Beschränkung der Antriebsleistung weniger ins Gewicht fällt. Die Interaktion mit dem Fahrer, seien es Eingaben des Fahrers oder Fahrerinformationen über das Display, wird in diesem Fall ebenfalls von der VCU durchgeführt.

Die TMC kann in dieser Struktur autonom arbeiten, d.h. die Zündung, das Gas- und das Bremspedal auswerten und dementsprechend die Antriebsmomente realisieren. Einzig über die zyklische Kommunikation mit der VCU können Limitierungen veranlasst werden.

Das Ladegerät wird stromgeführt und lädt die Batterie mit den Strömen, die vom BMS über die VCU angefordert werden. Im Hybridfahrzeug mit Verbrennungsmotor übernimmt der Generator die Funktion des Ladegerätes.

Anhand dieser Systembeschreibung wird deutlich, dass das reine Batteriemanagement durch das BMS sich zunehmend auf die reine Batterieüberwachung konzentriert und die übergeordneten Algorithmen in anderen Steuergeräten ablaufen. Verdeutlicht werden kann das auch am Beispiel eines Hauptschalters, der bei Fehlfunktionen die Batterie vom Fahrzeug trennt. Die Auslösung kann prinzipiell durch jede der dargestellten Komponenten des CAN-Nodes 1 erfolgen.

In den folgenden Abschnitten angesprochene Strukturen von Batteriemanagementsystemen sind also immer nach ihren logischen Funktionen gegliedert, um dann eine sinnvolle physikalische Struktur für die spezifische Applikation zu finden.

3.3.2 Blei-Gel-Batteriesystem

Das Blei System stellt das am einfachsten zu managende Batteriesystem dar. Es ist deutlich ausgereifter als NiMH oder Li-Ion und einfacher zu handhaben als NaNiCl. Das Grundprinzip eines BMS für Blei Systeme zeigt **Abb. 3. 44**. Dieses Prinzip basiert auf dem in Abschnitt 3.3.1 beschriebenen Grundprinzip. Das BMS arbeitet in dieser Konstellation autark und ist nicht in ein modernes Fahrzeugkonzept eingebettet. Eine indirekte Kommunikation mit der Antriebssteuerung erfolgt über den Eingriff in den Fahrreglerkreis. Die Messung aller Modultemperaturen kann vereinfacht werden, wenn die Temperaturverteilung innerhalb des Batterietroges bekannt ist. Bleibatterien stellen in der Regel nur die Klemmenspannungen der Module zur Verfügung. Damit wird immer nur die mittlere Zellenspannung des Moduls erfasst.

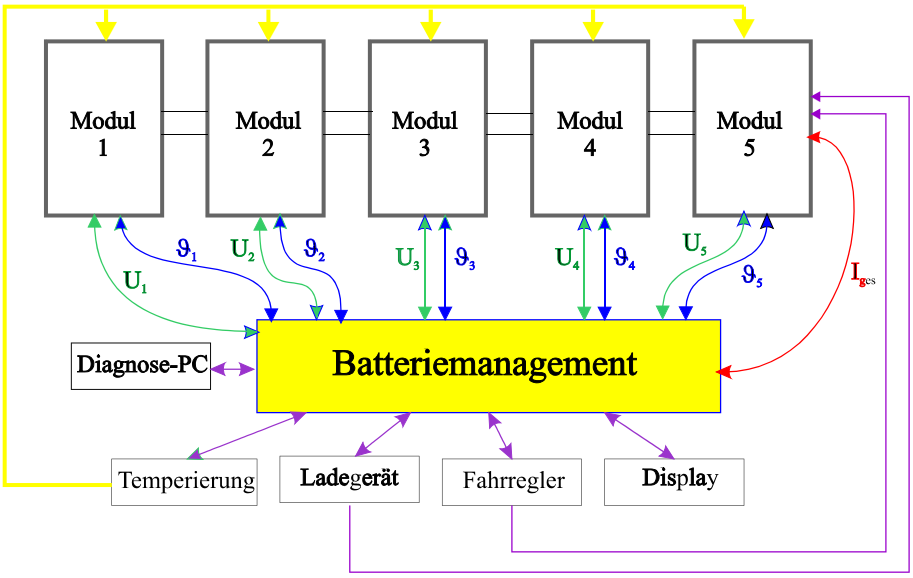


Abb. 3. 44: *Prinzipielle Struktur eines BMS für Bleibatterien*

Das BMS sollte die einzelnen Modulspannungen zeitgleich erfassen können. Diese zeitgleiche Erfassung garantiert, dass alle Modulspannungen unter gleichen Lastbedingungen erfasst werden und damit eine Vergleichbarkeit der Messwerte gegeben ist.

Der Temperierung kommt gerade bei größeren Batterien eine entscheidende Rolle zu, da die einzelnen Module sich elektrochemisch nur dann nicht unterscheiden, wenn eine ausgeglichene Temperaturverteilung vorliegt. Untersuchungen am VW Golf CitySTROMer A2 in der ersten Hälfte der neunziger Jahre haben die Sinnhaftigkeit eines Temperaturausgleiches bewiesen. Damals wurde ein sogenanntes Wassertaschenprinzip in die Fahrzeuge integriert. Über dieses Wassertaschenprinzip konnte sowohl eine Klimatisierung, als auch der Temperaturausgleich realisiert werden. Die Lebensdauer des gesamten Batteriesatzes wurde erhöht.

Die Auswertung aller Modulspannungen ermöglicht die Bestimmung der Tiefentladung einzelner Batteriemodule. Sollten einzelne Module die lastabhängige Entladeschlußspannung erreichen, so muss das BMS neben einer Benachrichtigungsfunktion für den Fahrer einen Eingriff in den Fahrreglerkreis durchführen. In heutigen modernen Fahrzeugkonzepten sendet das BMS einfach eine CAN-Message an die Vehicle Control Unit mit der Nachricht des Erreichens der Entladeschlußspannung. Die Motorsteuerung wird dann veranlasst den Strom so lange zu reduzieren, bis sich die Modulspannungen wieder im erlaubten Betriebsbereich befinden.

Die Steuerung des Ladegerätes muss in Abhängigkeit des ermittelten Ladezustandes über das BMS gesteuert werden. Das BMS muss dabei die Temperaturkompensation der Gasungsspannung durchführen und die Ladekennlinie optimal auf die Batterie- und die Außentemperatur abstimmen. Aufgrund der geringen Anzahl von zu messenden Spannungen (in der Regel kleiner 30 bei bleibasierten ESF) kann das BMS zentral strukturiert werden. Das in Abschnitt 5 vorgestellte BMS für Bleibatterien basiert auf der oben gezeigten logischen Struktur, wurde aber aufgrund der räumlichen Verteilung der Aggregate im Fahrzeug modularisiert. Macht man den

Schritt vom CitySTROMer A2 zum A3, so würde man wieder ein anderes System erhalten, da bei diesem Fahrzeug ein Teil des Batteriesatzes unter dem Kofferraum, ein anderer jedoch im Motorraum untergebracht ist. Die logische Struktur entspricht aber wieder der oben gezeigten.

3.3.3 NiMH-Batteriesystem

Aufgrund der geringen Nennspannung von nur 1,2 V werden viele NiMH Zellen zum Aufbau einer Traktionsbatterie benötigt. Diese Zellen werden zu Modulen konfektioniert. Die einzelnen Module weisen häufig Modulspannungen von 12 V, 24 V oder 36 V auf. Im Abschnitt 3.3.1 wurde bereits erwähnt, dass das BMS in Abhängigkeit der Modulgröße strukturiert werden muss. Vom thermischen Management betrachtet sollten die einzelnen Module aus einer möglichst überschaubaren Anzahl von Zellen bestehen. Der Aufwand für den Temperaturausgleich von maximal 5 K Differenz zwischen der wärmsten und der kältesten Zelle steigt mit der Anzahl der Zellen innerhalb eines Moduls. Beim in Abschnitt 3.3.2 vorgestellten System für Bleibatterien wirkt das Batteriemodul nach außen wie ein einziges Element. Weder die Zellenspannungen innerhalb des Moduls, noch die Zelltemperatur sind einer Messung oder separaten Beeinflussung zugänglich. Anders beim NiMH-Modul. Hier kann und muss aktiv für ein gleichmäßiges Betriebsverhalten gesorgt werden. NiMH Zellen sind bezüglich einer Tiefentladung toleranter als Blei- oder Lithiumsysteme. Das bedeutet aber nur, dass sie nicht zerstört werden, der Alterungsprozess läuft bei Tiefentladungen trotzdem beschleunigt ab. Die Struktur eines BMS für Traktionsanwendungen rein batteriebetriebener Fahrzeuge muss sich wieder am Batteriesystem orientieren. **Abb. 3. 45** zeigt die Struktur eines solchen BMS.

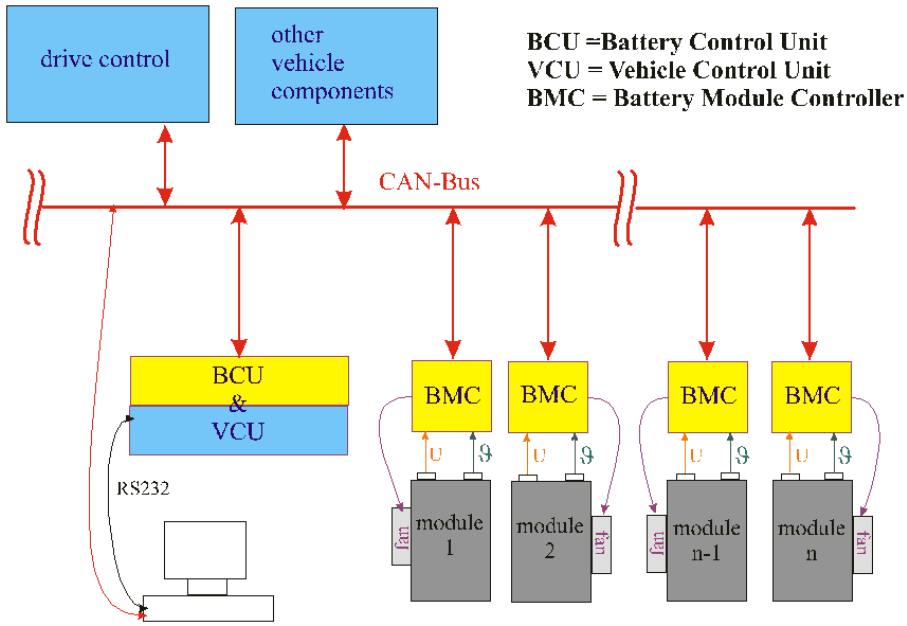


***Abb. 3. 45**: Prinzipielle Struktur eines BMS für NiMH Batterien [Hei99]*

In dieser Struktur wird jedes NiMH Modul durch einen separaten Battery Module Controller

(BMC) überwacht. Alle BMC werden mit einem Master über den CAN-Bus verbunden. Die Battery Control Unit (BCU) übernimmt die zentrale Steuerungs- und Datenerfassungsfunktion. Alle Modulspannungen werden von den einzelnen BMC gesendet. Durch einen Vergleich der Modulspannungen kann die BCU schwache Module detektieren. Eine modulinterne Diagnose kann von jedem BMC durchgeführt werden. Ob die BMC die einzelnen Zellenspannungen überwachen oder aus der Auswertung der Modulspannung auf den Ladezustand der einzelnen Zellen schließen, hängt von der Fertigungsqualität der Zellen ab. Im Fehlerfall senden die BMC Statusmeldungen zur BCU, die dann zum Beispiel Stromlimitierungen im Falle von Übertemperaturen oder drohenden Tiefentladungen veranlassen kann. Im Falle weniger Module, die zu einer Traktionsbatterie verschaltet sind, kann auf die BCU verzichtet werden. Die Intelligenz der BCU muss dann aber in jedem BMC umgesetzt werden. Das thermische Management wird von jedem BMC für das zugeordnete Modul durchgeführt. Bei extremen Schnelladungen wird der Druckanstieg einzelner Masterzellen vom BMC ausgewertet, um die Ladung für die Gesamtbatterie zu terminieren.

Aufgrund der Struktur des CAN-Bus können die von der BCU verwalteten Diagnosedaten jederzeit von einem an den CAN-Bus angeschlossenen Diagnose-PC abgerufen werden, unabhängig von dem augenblicklichen Betriebszustand der Batterie.

Ein Batteriemodul versteht sich in diesem Zusammenhang als eine physikalische Einheit aus Batteriezellen, Lüfter/Klimatisierung, BMC und Gehäuse. Prinzipiell ist die oben skizzierte Struktur auch für Hybridanwendungen denkbar. Der Grad der Hybridisierung bestimmt die Größe der Traktionsbatterie und damit auch die Modulstruktur.

Die Bedeutung der Batterieklimatisierung wurde bereits im Abschnitt 3.1.5 ausgeführt.

3.3.4 Li-Ion-Batteriesystem

Aufgrund der sicherheitsbedingten Notwendigkeit der Vermeidung der Überladung einzelner Li-Ion Zellen und der geringen zulässigen Toleranzen kommt dem Batteriemanagement bei der Li-Ion Technologie eine besondere Bedeutung zu. Neben der genauen Detektion der Zellspannungen muss die Temperatur gemessen werden und ein passives bypassing ist vorteilhaft.

Im Abschnitt 3.3.3 wurde bereits ein modulares System zur Überwachung und Vernetzung von Batteriemodulen vorgestellt. Diese Struktur ist auch für Lithium-Systeme sinnvoll. Unterschiede zum Beispiel im Ladeverfahren der Li-Ion Batterien im Unterschied zur NiMH Batterie erfordern bei gleicher Gesamtstruktur an das Li-Ion System angepasste Batteriemodulcontroller (BMC).

Da die Überladung äußerst gefährlich ist, benötigen Li-Ion Batterien in jedem Fall ein mehrstufiges Batteriemanagement zur Überwachung sämtlicher Zellenspannungen. **Abb. 3. 46** zeigt dieses Prinzip der Überwachung auf Zellebene, Modulebene und Gesamtbatterieebene.

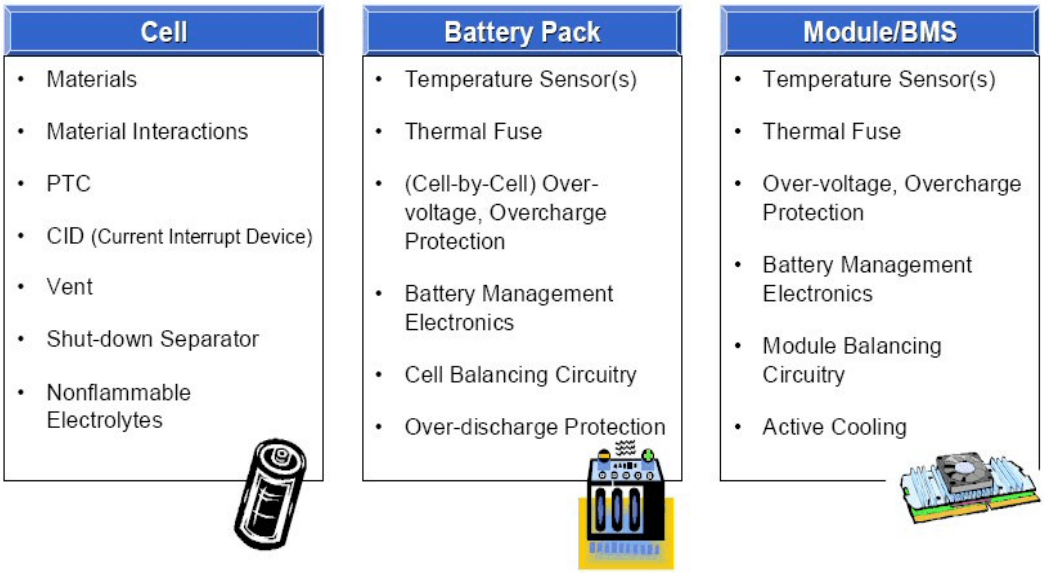


***Abb. 3. 46**: Sicherheitsrelevante Maßnahmen für Li-Ion Batterien auf Zell-, Pack- und Modulebene [Köh05]*

Ein natürlichen Balancing-Effekt wie bei Blei- oder NiMH Systemen [Sex99] [Cor94] gibt es bei Li-Ion Systemen nicht. Deshalb muss der Ladungsausgleich durch das Batteriemanagementsystem initiiert werden [Moo05]. [Scw05] beschreibt das Batteriemanagementsystem für eine Li-Ion Batterie für Hybridanwendungen bestehend aus 80 Zellen mit einer Nominalspannung von 288 V und 7,5 Ah. Die prinzipielle Struktur des BMS entspricht exakt der Modulstruktur, wie sie in Abschnitt 3.3.3 für NiMH Batterien vorgestellt wurde. Jeweils 10 Zellen werden von einem als Slave bezeichneten BMC überwacht. Es werden alle Zellspannungen und je Submodul zwei Temperaturen bestimmt. Der Ladungsausgleich wird von den einzelnen Slaves gesteuert, es findet bypassing mit 40 mA Anwendung. **Abb. 3. 47** zeigt das komplette Modul mit den Zellen, den BMS Komponenten und den Lüftern für das thermische Management.

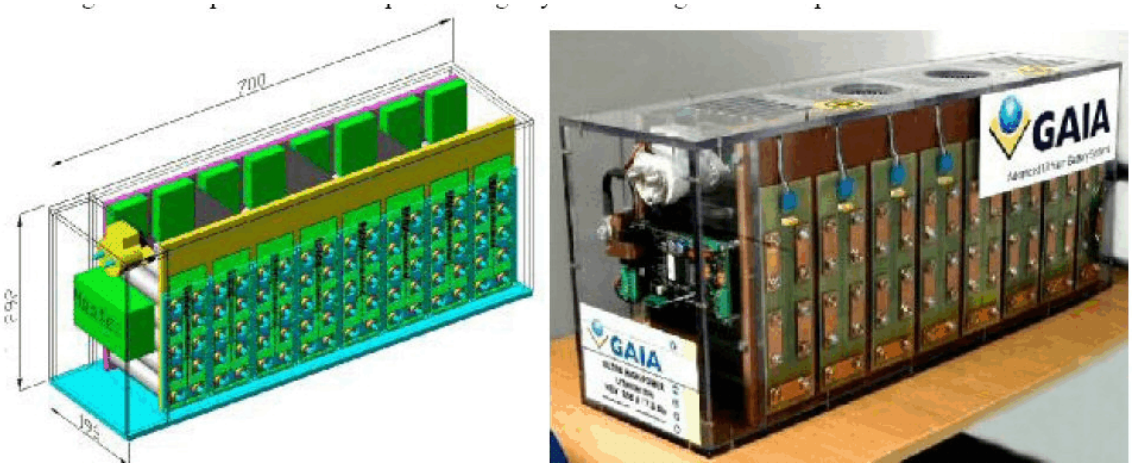


***Abb. 3. 47**: Lithium-Ion Batterie bestehend aus Zellen, BMS und thermischem Management*

Die Steuerung der Batterieklimatisierung erfolgt dabei in Abhängigkeit des Betriebsmodus. So definiert zum Beispiel SAFT für seine Li-Ion EV-Batterien folgende Temperaturbereiche:

- im Ladebetrieb 0˚C bis +40˚C
- im Fahrbetrieb -10˚C bis +55˚C
- im stand-by bzw. Lagerbetrieb -40˚C bis +65˚C

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Systemstrukturen in Bezug auf die Hardware des BMS bei NiMH Batterien und bei Li-Ion Batterien nahezu identisch sind. Aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen der beiden Batteriesysteme müssen die ablaufenden Algorithmen an die jeweilige Batterie angepasst werden.

3.3.5 NaNiCl-Batteriesystem

Im Gegensatz zu Herstellern von Bleibatterien haben die Entwickler der ZEBRA-Batterie von Anfang an das Batteriemanagement als Teil der Batterie verstanden. Die Funktionen des Batteriemanagements bei ZEBRA-Batterien sind in **Abb. 3. 48** dargestellt.

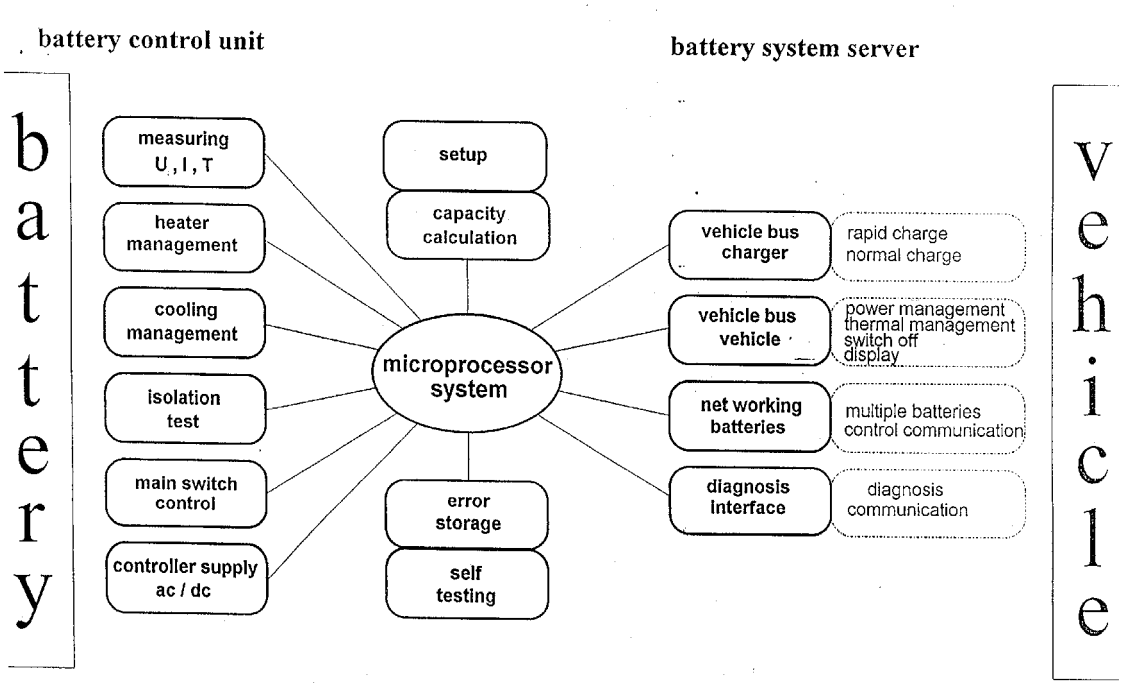


***Abb. 3. 48**: Funktionen des Batteriemanagements der ZEBRA-Batterie [Böh96]*

Das Lade- und Entlademanagement stellt sowohl den Lade- als auch den Entladeschluss fest, führt eine Ladungsbilanzierung durch und bestimmt den Innenwiderstand der Batterie. Diese Messungen in Verbindung mit der Ladungsbilanzierung lassen Voraussagen über die zur Verfügung stehende Energie zu. Das BMS kann aufgrund der Spannungslage der Gesamtbatterie Ausfälle einzelner Zellen feststellen. Es übermittelt dem Ladegerät stets optimierte Maximalwerte für Spannung bzw. Strom.

Zum Ausfall von Zellen kann es durch Tiefentladungen kommen. Zum Schutz der Zellen ist im Überschuss Natrium in die Anode eingelagert. Dieses reagiert im Fall von Tiefentladungen mit dem flüssigen Elektrolyten, so dass für einige Ah Tiefentladung eine reversible Reaktion der Zerstörung entgegenwirkt. Steht kein Natrium mehr in der Zelle zur Verfügung, so wird die Polarität der Zelle umgekehrt, die Keramik bricht und die Zelle fällt niederohmig aus [Dus96]. Der Ausfall von Zellen kann durch die Messung der Leerlaufspannung bestimmt und vom Batteriemanagementsystem entsprechend bei der Ladung und der Entladung berücksichtigt werden.

Bei Überladungen greift der zweite Elektrolyt in die Ladereaktion ein. Diese Reaktion ist reversibel, hat ein höheres Potenzial und lässt den Innenwiderstand ansteigen, so dass der Ladestrom reaktionsbedingt sinkt, was einen systembedingten Schutzmechanismus gegen Überladungen darstellt [Böh96].

Der Bestimmung des Innenwiderstandes der Zelle kommt beim ZEBRA-System besondere Bedeutung zu. Es lassen sich sowohl Alterungseffekte und die Restlebensdauer abschätzen. Das Lebensdauerende gilt bei Batterien allgemein als erreicht, wenn die entnehmbare Kapazität auf 80 % der Nominalkapazität gesunken ist. Als weitere Kriterien gelten hier der Ausfall von 5 % der Zellen und ein Anstieg des Innenwiderstandes auf 120 % seines Nominalwertes bei 80 % Depth of Discharge (DOD) [Til97]. Aus dem Innenwiderstand der Batterie kann auf den Ladezustand geschlossen werden. **Abb. 3. 49** zeigt den Verlauf des Innenwiderstandes einer Zelle [Böh98]. Dabei wird deutlich, dass der Innenwiderstandsverlauf während der Entladung durch den Verlauf des Widerstandes der positiven Elektrode geprägt ist. Der Zelltyp ML1 weist eine größere Oberfläche und damit einen niedrigeren Innenwiderstand als Typ SL09 auf.

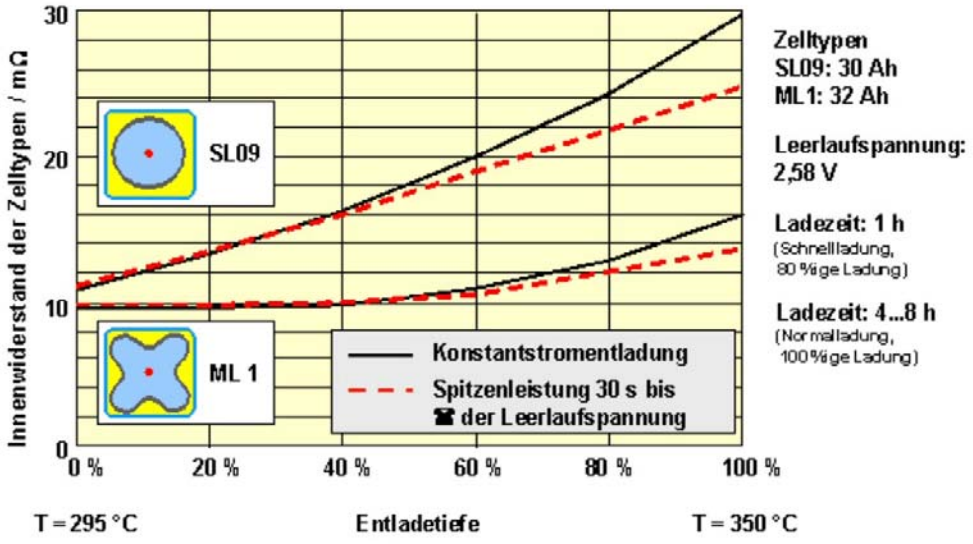


***Abb. 3. 49**: Innenwiderstandsverlauf der ZEBRA Zelle in Abhängigkeit des SOC für die Zelltypen SL09 und ML1*

Hochtemperaturbatterien benötigen zum Betrieb zwingend ein thermisches Management. Einerseits müssen sie ständig auf Betriebstemperaturen vorgeheizt sein, andererseits müssen sie

wegen der Auslegung auf hohe Entladeströme im Fahrbetrieb in der Regel gekühlt werden. Aus dieser systeminternen Regelungsaufgaben wird bereits die Notwendigkeit eines eigenen Steuergerätes ersichtlich. Das Heizungs- wie auch das Kühlsystem werden als Zweipunktregler realisiert. Prinzipiell ist die ZEBRA Batterie einsetzbar, wenn der Elektrolyt oberhalb von 157 ˚C geschmolzen ist und damit eine elektrochemische Reaktion ermöglicht ist. Jedoch ist der Innenwiderstand der Zelle dann noch zu hoch, so dass der Hersteller ein zulässiges Betriebsfenster von 270 ˚C bis 350 ˚C festgelegt hat.

Ein großer Vorteil der Hochtemperaturbatterie ist die Tatsache, dass aufgrund der hohen Betriebstemperatur ein jahreszeitunabhängiges Betriebsverhalten der Batterie vorliegt. Auf eine PTC-Fahrraumheizung kann verzichtet werden, da die im Betrieb zusätzlich erzeugte Wärme im Rahmen der Batteriekühlung an den Innenraum abgegeben werden kann.

Die Isolation der Traktionsbatterie gegen das Chassis wird ständig vom BMS geprüft. Daneben werden weitere Selbsttest- und Diagnosefunktionen vom Steuergerät durchgeführt und protokolliert. Beim Einsatz in Nutzfahrzeugen können mehrere ZEBRA-Batterien in einem Fahrzeug eingesetzt werden. Die Batteriemanagementsysteme der einzelnen Batterien werden über den CAN-Bus miteinander vernetzt, wobei ein Steuergerät die Masterfunktion übernimmt. Für den Benutzer erscheint durch diese Vernetzung nur **eine** Gesamtbatterie.

3.3.6 Ultracaps

Ultracaps werden im Fahrzeug zur Aufnahme der Bremsenergie und zur kurzzeitigen Abgabe hoher Leistungen für Lastspitzen eingesetzt. Daraus resultieren applikationsbedingt bestimmte Anforderungen an das Ultracap Management System (CMS). Aufgrund des Betriebes der Ultracaps in Zeitfenstern deutlich unterhalb des Minutenbereiches (typisch 5...15 s) muss das CMS die Daten der Ultracaps mit höherer Messrate erfassen, als es zum Beispiel im reinen Traktionsbetrieb bei Blei-Gel Batterien notwendig ist. Wie bereits im Kapitel 2 ausgeführt, ist eine Tiefentladung von Ultracaps unkritisch, da sie aufgrund der Forderung nach hoher Leistungsabgabe immer im Bereich zwischen $0{,}5 * U_{max} < U_{cap} < U_{max}$ betrieben werden. Zu einer Umpolung einzelner Ultracaps wird es also im Betrieb nicht kommen.

Als sehr kritisch kann jedoch die Überladung einzelner Ultracapzellen angesehen werden. Diese ist mit größtmöglicher Wahrscheinlichkeit zu verhindern. Gerade im aktuellen Produktstadium muss noch von größeren Streuungen in den Zellkapazitäten zwischen -10 % und +30 % ausgegangen werden. Prinzipiell entsteht daraus die Forderung nach einer Einzelzellenüberwachung in Bezug auf die Zellenspannung. Die entstehenden Systemkosten bei Anwendungen wie zum Beispiel dem ULTRACAPBUS von MAN fordern die Suche nach kostenminimierten und sicheren Lösungen. Untersuchungen an unterschiedlichen Ultracapmodulen haben die in **Abb. 3. 50** exemplarisch dargestellten Abweichungen bezüglich der Zellspannungen ergeben. Insgesamt wurden drei unterschiedliche 42 V Module untersucht, nämlich 42 V/67 F, 3x 14 V/200 F in Reihe und 42 V/150 F. **Abb. 3. 50** zeigt den Verlauf der Zellenspannungen beim Modul 42 V/67 F. Dabei blieb die Temperatur der Zellen ohne Kühlung über den Messzeitraum konstant. Es ist zu erkennen, dass die Abweichungen zwischen maximaler und minimaler Zellspannung am Anfang der Messung ca. 150 mV und zum Ende nicht signifikant größer sind.

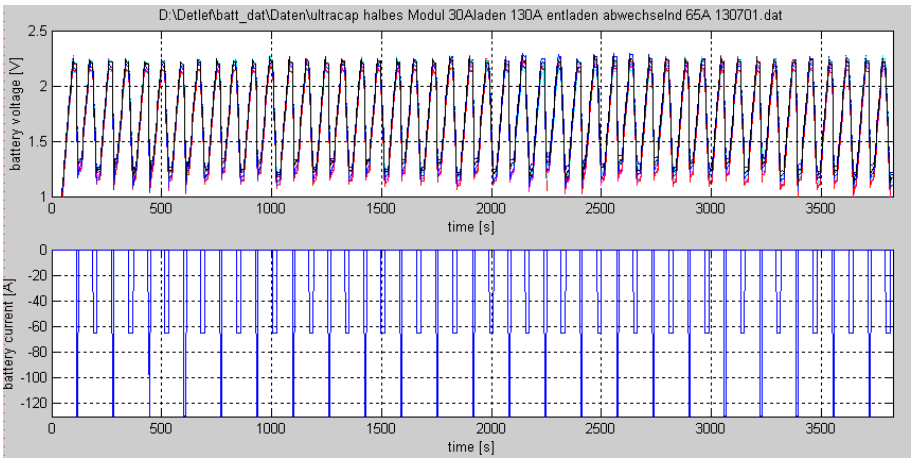


***Abb. 3. 50**: Einzelzellspannungen am Modul 42V/67F im Pulsbetrieb*

Aus den Messungen, die auch für höhere Entladeströme durchgeführt wurden, kann geschlossen werden, dass innerhalb der Ultracapmodule insgesamt ein ausgeglichenes Zellspannungsverhalten vorliegt. Bei höheren Entladeströmen ist jedoch ein in **Abb. 3. 51** dargestellter, signifikanter Temperaturanstieg zu beobachten. Das Modul wurde während der Messung im vom Hersteller vorgesehenen Plastikgehäuse belassen, der obere Verschlussdeckel war offen, es wurde außer der Möglichkeit der freien Konvektion keine zusätzliche Kühlung aktiviert. Die maximale Spannung des Moduls von 30 V in der dargestellten Abbildung ist auf Limitierungen des Teststandes zurückzuführen.

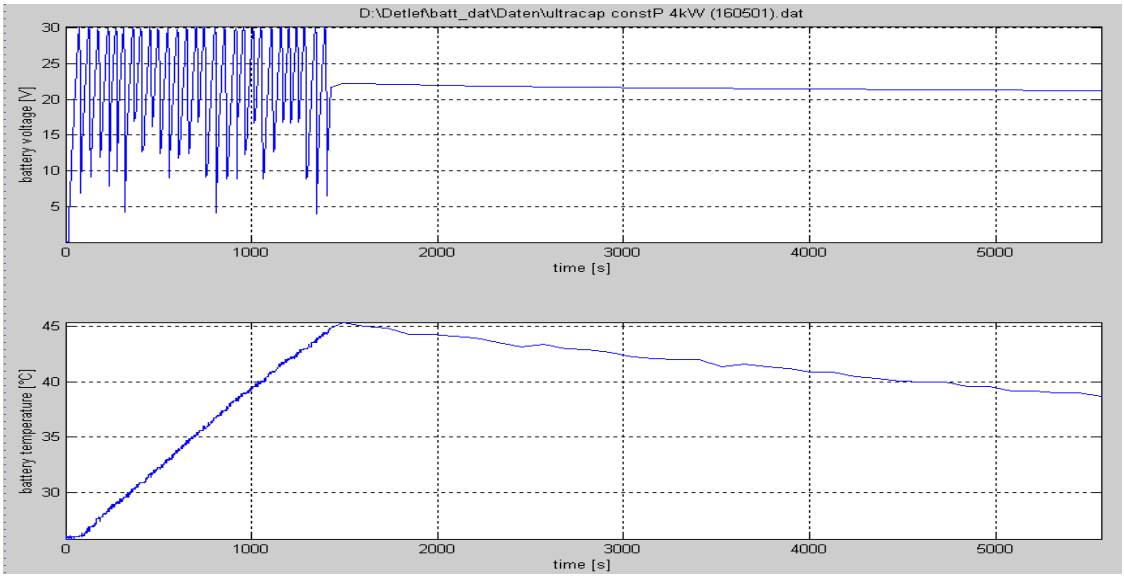


***Abb. 3. 51:** Temperaturverhalten des Moduls 42 V/67 F im Pulsbetrieb mit 4 kW Entladeleistung und anschließender Abkühlung*

Im harten Zyklenbetrieb mit hoher Pulsleistung kann ein Anstieg von 1 K/Entladepuls konstatiert werden. In diesem Fall ist eine Zwangskühlung der Ultracaps vorzusehen, die vom CMS

geregelt werden muss. Alternativ kann natürlich bei höheren Temperaturen eine Reduzierung der entnehmbaren Leistung durch das CMS veranlasst werden, was jedoch dem Einsatz der Ultracaps widerspricht.

Die aktuellen Module von EPCOS werden in einem vergossenen Gehäuse ausgeliefert, bei dem die Zellspannungen gar nicht mehr zur Verfügung stehen. Das EMS muss in diesem Fall die Einhaltung der Nennspannung überwachen. Eigene Untersuchungen haben ergeben, dass die temporäre Aufladung der Zellen auf eine Spannung von 2,8 V in der realisierten Applikation keinerlei Beeinträchtigungen nach sich zieht. Ein Ladungsausgleich nach dem Prinzip des aktiven bypassings mit Strömen im Bereich 0,6 A reicht zum sicheren Betrieb vollkommen aus. Über längere Zeiträume sollen Ultracaps jedoch nicht auf Spannungen oberhalb der Nominalspannung geladen sein.

4 Ladezustandsbestimmung als Funktion von Batteriemanagement-systemen für Blei-Gel Batterien im Traktionsbetrieb

In den vorangegangenen Kapiteln wurde bereits auf die zentrale Bedeutung der Ladezustandsbestimmung im Rahmen des Batteriemanagements eingegangen. Die Verfahren der Bestimmung wurden dort in drei Kategorien eingeteilt:

- Auswertung der Klemmengrößen,
- Auswertung der Elektrolytgrößen und
- Gasungsmessung

Die Bestimmung des Gasungsverhaltens der Batterie (beim Laden) läßt bei vorhandener Gasung auf den Ablauf der Nebenreaktionen schließen. Die Bestimmung des Gasungsverhaltens ist besonders zur Erkennung des Vollladezustandes geeignet. Durch den Vergleich der Messungen unterschiedlicher Module kann auch das Auseinanderlaufen des Betriebsverhaltens von Modulen erfaßt werden. Während der Entladung sind die Ergebnisse nicht aussagekräftig. Die verwendeten Fahrzeuge nutzen verschlossene Batterien, so dass das Gasungsverhalten in diesem Rahmen nicht weiter untersucht wurde.

Zur Auswertung von Elektrolytgrößen gibt es verschiedene Untersuchungen. Sie setzt aber bei flüssigem Elektrolyten eine vorhandene Elektrolytumwälzung voraus, damit innerhalb der Batterie homogene Zustände existieren. Das Hauptproblem stellt die Entwicklung von Sensoren dar, die über die gesamte Lebensdauer der Batterie gegen den Elektrolyten beständig sind. Einer Messung zugänglich sind der Auftrieb, Brechungsindex, hydrostatischer Druck oder die Leitfähigkeit. Kindscher [Kin95] bestimmt den Ladezustand durch ein als induktive Leitfähigkeitsmessung bezeichnetes Verfahren. Es basiert auf der Messung des temperatur- und ladegradabhängigen elektrischen Widerstands des Elektrolyten. Die verwendeten Batterien sind für Verfahren der Auswertung der Elektrolytgrößen nicht geeignet.

Die Klemmengrößen stehen dem Batteriemanagementsystem permanent zur Verfügung. Deshalb konzentriert sich diese Arbeit auf die Ladezustandsbestimmung über die Auswertung der Klemmengrößen. Aus der Beschreibung möglicher Verfahren soll dann ein Verfahren entwickelt werden, dass für den Traktionsbetrieb realisiert und in das entwickelte Batteriemanagementsystem übernommen werden kann.

4.1 Problematik

Die einzelnen vorgestellten Verfahren können im Laborbetrieb oder beim Nachfahren von Normzyklen gute Ergebnisse liefern, im Traktionsbetrieb werden die Ergebnisse jedoch deutlich schlechter. Das liegt zum einen an der hohen Dynamik der Lastprofile im Traktionsbetrieb, andererseits aber auch am nichtperiodischen Verlauf des Lastprofils im Gegensatz zur Konstantstromentladung, Pulsentladung oder Entladung durch Normzyklen, die den vorgestellten Verfahren meistens zu Grunde liegen. So kann sich das Lastprofil zum Zeitpunkt

t_w innerhalb eines Entladezyklusses plötzlich ändern. Solche Änderungen können durch die Fahrweise bedingt sein, durch den Verkehrsfluss vorgegeben sein, durch das Streckenprofil aufgezwungen werden oder durch Fahrzeugparameter beeinflusst werden. So kann durch Versuche am Fahrzeug cityEL beobachtet werden, dass die erzielbare Reichweite extrem von variablen mechanischen Parametern des Fahrzeugs, wie den verwendeten Reifen und bei einer Reifensorte extrem vom gefahrenen Luftdruck abhängt. Beim cityEL ist der empfohlene Reifendruck mit 2,8 bar angegeben. Versuchsfahrten mit einem Reifendruck von 7 bar haben ergeben, dass bei gleicher Strecke, Verkehrsfluss und Fahrweise bei hohem Reifendruck nahezu eine 20% -ige Erhöhung der Reichweite möglich ist.

Daraus kann abgeleitet werden, dass Verfahren, die eine Restreichweite des Fahrzeugs anzeigen, all diese Parameter berücksichtigen müßten bzw. von vornherein mit einem gewissen Fehler behaftet sind. Es handelt sich bei Restreichweitenvorhersagen immer nur um Abschätzungen, die davon ausgehen, dass sich die Parameter bis zum Ende der Entladung nicht ändern. Seriöser erscheint daher eine Bestimmung der der Batterie noch entnehmbaren Ladungsmenge, da zu deren Vorhersage weniger Parameter in die Bestimmung eingehen.

Abschnitt 4.3 beschäftigt sich mit der Simulation von Blei-Gel Batterien. Anhand eines elektrischen Ersatzschaltbildes wird dort der Versuch unternommen den Klemmenspannungsverlauf bei unterschiedlichen Entladeströmen exakt nachzubilden. Es zeigt sich, dass die Beschreibung der Batterie durch ein solches Ersatzschaltbild eingeschränkt möglich ist, dieses Verfahren jedoch in der Praxis einen viel zu hohen Rechenaufwand und eine ständige Adaptierung jedes Moduls bedeuten würde. Anhand dieser Untersuchung sind jedoch Erfahrungswerte entstanden, die in die im Abschnitt 4.4 beschriebene Ladezustandsbestimmung mit einem Fuzzy-Modell eingehen. Auch die in Abschnitt 4.2 vorgestellten Verfahren können in den Fuzzy-Ansatz teilweise integriert werden.

4.2 Traditionelle Verfahren der Ladezustandsbestimmung

An dieser Stelle sollen einige Verfahren vorgestellt werden, die zur Bestimmung des Ladezustandes für Bleibatterien entwickelt und untersucht wurden. Alle Verfahren der Ladezustandsbestimmung erfordern in bestimmten Zeitabschnitten eine Rekalibrierung des Wertes der entnehmbaren 'Normkapazität'. Als 'Normkapazität' sei hier eine der Batterie unter festgelegten Betriebsbedingungen entnehmbare Ladungsmenge definiert. Im Kapitel 2 wurde bereits der prinzipielle Verlauf der Normkapazität über der Zyklenzahl gezeigt. Die Normkapazität bewegt sich dabei in einem weiten Korridor, so dass dem BMS keine verlässlichen Daten über die zukünftige Entwicklung der entnehmbaren Batteriekapazität vorliegen. Das Absinken der entnehmbaren Kapazität hat neben der durch die Zyklierung bedingten Gitterkorrosion als unvermeidliche Alterung auch andere Gründe. [Hön94] nennt als Haupteinflussfaktoren vorzeitiger Alterung:

- häufiges Überladen,
- Tiefentladungen und
- langandauernde Teilzyklierung.

Durch Teilzyklierung können Bleisulfatkristalle entstehen, die die 10...20 -fache Größe normaler $PbSO_4$ Kristalle (normal 0,5µm). Diese nehmen nicht mehr an der Reaktion teil und verhalten sich hochohmig [Scö88]. Auch bei der Tiefentladung tritt dieser, als Sulfatation bezeichnete, Vorgang auf.

Auf jeden Fall muss das gemessene Alterungsverhalten des Batteriesatzes zur permanenten Rekalibrierung der Ladezustandsanzeige herangezogen werden. Zur Erhöhung der Kundenzufriedenheit muss diese Bestimmung des SOH im normalen Fahrbetrieb erfolgen und nicht über aufwendige Rekalibrierungszyklen unter Laborbedingungen.

4.2.1 Ladezustandsbilanzierung

Die Ladungsbilanzierung ist das klassische Verfahren der Ladezustandsbestimmung im Fahrzeug. Die Ladungsbilanzierung setzt zur Rekalibrierung den Vollladezustand voraus. Während des Betriebes wird die entnommene Ladung berechnet über

$$Qe = \int_{t=0}^{te} I(t)\, dt \quad . \tag{4.1}$$

Der Ladezustand (SOC) wird dann

$$SOC = (1 - \frac{Q_e}{Q_{nom}}) * 100\% \quad . \tag{4.2}$$

Der Nachteil an diesem Verfahren ist die nicht konstante entnehmbare Kapazität Q_{nom} der Batterie. Diese hängt unter anderem von der Temperatur, dem Entladestrom, dem Lastprofil und dem Alterungsverhalten ab. Während längerer Standzeiten ist weiterhin die Selbstentladung zu berücksichtigen. [Ple05] fügt den Coulombschen Wirkungsgrad in seine Ausgangsbetrachtung für die Ladungsbilanzierung ein, eigene Messungen legen jedoch nahe Q_{nom} in Verbindung mit einem als entladestromabhängigen Faktor im Sinne von Peukert zu interpretieren.

Trotz unbekannter oder schwer abschätzbarer Einflussfaktoren bringt die Ladungsbilanzierung gute Ergebnisse, wenn sie durch andere Verfahren unterstützt bzw. rekalibriert wird. In einfacher Näherung wird bei der Standardladungsbilanzierung die entnehmbare Ladung über den im Abschnitt 2.1.1 definierten Ladefaktor bestimmt. Entlädt man die Batterie bis zur Tiefentladungsgrenze, so kann über die wieder eingeladene Ladung und den bekannten, und als konstant angenommenen, Ladefaktor in erster Näherung auf die entnehmbare Ladung C_{nom} geschlossen werden.

Auch die in Abschnitt 4.3.3 vorgestellte Modellierung der Blei-Gel Batterie mit einem elektrischen Ersatzschaltbild nutzt einen erweiterten Ladungsbilanzierungsansatz. In diesem

Verfahren wird der Restladegrad der Batterie aus den aktuellen Betriebsbedingungen bestimmt. Dieser Restladegrad entspricht quasi dem prozentualen Anteil aufgrund der Betriebsbedingungen nicht umwandelbarer aktiver Masse. Bei Hochstromentladungen ist aufgrund der elektrochemischen Vorgänge nur eine gegenüber C_5 herabgesetzte Ladungsmenge bis zur Tiefentladungsgrenze entnehmbar. Gelingt es den voraussichtlichen Restladegrad p_r zu bestimmen, so wird die oben genannte Gleichung zu

$$SOC = \frac{Qe}{Qnom * (1 - p_r)} * 100\% \qquad \textbf{(4.3)}$$

4.2.2 Ruhespannungsbestimmung

Im Abschnitt 2.2.1 wurde bereits auf den Zusammenhang zwischen der Ruhespannung und dem Ladegrad hingewiesen. Die Nernst'sche Gleichung nach Gl. 2.7 ist aufgrund des unbekannten Verhältnisses der Aktivitätsprodukte für praktische Anwendungen ungeeignet. Zur Vereinfachung werden unterschiedliche Näherungen angegeben. Nach [Scl82] gilt näherungsweise für $\rho > 1{,}05$ kg/l

$$\frac{U_0}{V / Zelle} = 1{,}865 + 0{,}91\left(\frac{\rho_{Elektrolyt}}{kg / l} - 1\right) \qquad \textbf{(4.4)}$$

Häufig findet man auch

$$\frac{U_0}{V / Zelle} = 0{,}84 + \frac{\rho_{Elektrolyt}}{kg / l} \qquad \textbf{(4.5)}$$

Während der Entladung diffundiert Schwefelsäure vom freien Elektrolytraum in die Poren. Endet der Stromfluss, so gleichen sich die Konzentrationsdifferenzen der Schwefelsäure aus. Während dieses Ausgleiches nähert sich die Klemmenspannung nach einer Exponentialfunktion der Ruhespannung an, sie ist faktisch erst nach sehr langer Beruhigungszeit von mindestens 5 Stunden ermittelbar. Für Photovoltaikanlagen mit längerer Ruhephase (>20 min) gibt es experimentelle Untersuchungen von [Hön94], die zu befriedigenden Ergebnissen bei der Extrapolation zur Ruhespannung führen. Damit kann dieses Verfahren nach längeren Standzeiten herangezogen werden, nicht aber während kurzer stromloser Phasen im Fahrbetrieb. Versuche der Approximation der Ruhespannung während stromloser Phasen, z.B. während der Rotphasen an Ampeln, können unterstützend einbezogen werden, weisen aber sehr große Ungenauigkeiten auf.

Abb. 4.1 zeigt die Ruhespannung in Abhängigkeit vom Ladegrad nach Untersuchungen von [Sti05]. Diese Werte wurden im Labor bestimmt, wobei die Batterie in Schritten 10 % C_{nom}

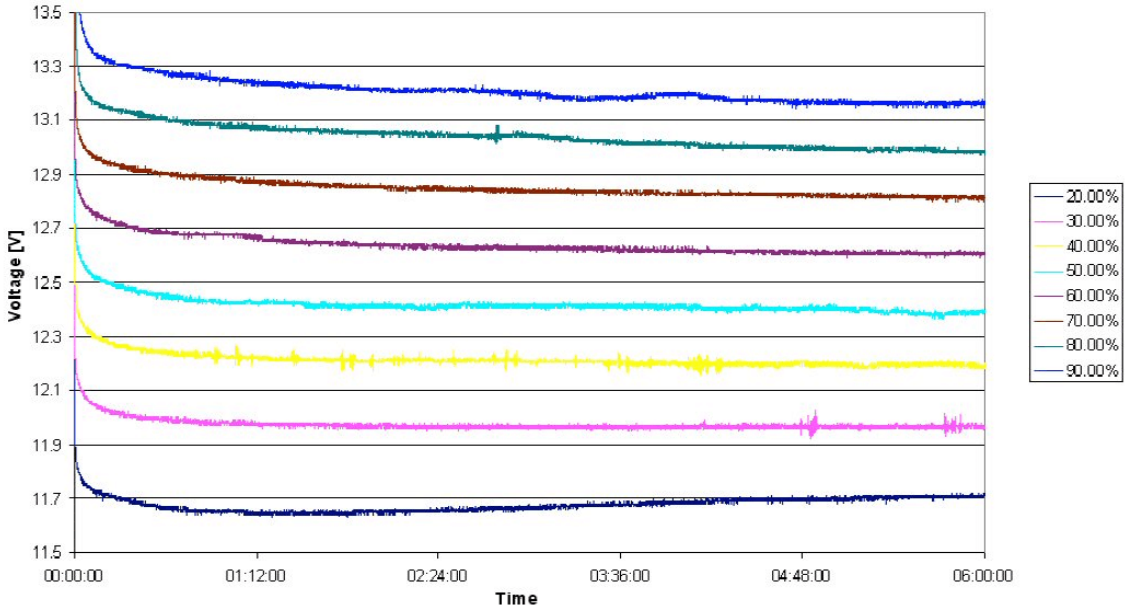


***Abb. 4.1**: Ruhespannung in Abhängigkeit des Ladegrades nach [Sti05]*

aufgeladen wurde. Zwischen den Impulsen lagen 6-stündige stromlose Phasen. Die erreichbare Ruhespannung ist nach [Sti05] auch davon abhängig, ob dem Einschwingvorgang in die Ruhespannung eine Lade- oder eine Entladephase vorausging. Er hat an den von ihm genutzten Batterien die in **Abb. 4.2** gezeigten Ruhespannungen nach einstündigem Einschwingen feststellen können.

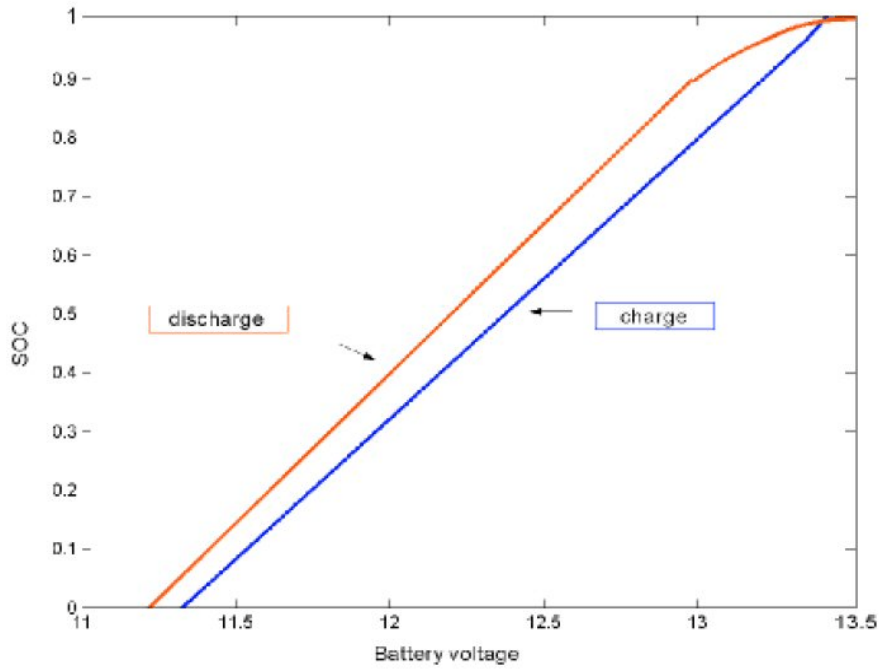


***Abb. 4.2**: Ruhespannung nach einstündigem Einschwingen aus der Lade- bzw. Entladephase heraus [Sti05]*

Diese Beobachtungen können auch für Li-Systeme gemacht werden [Ple04] und erschweren die Ladezustandsbestimmung anhand der Ruhespannung erheblich. Die Ausprägung der Hysterese ist zudem abhängig von Dauer und Betrag der letzten Lade- oder Entladephase.

Die Ruhespannung der Bleibatterie ist aber nicht nur von der Elektrolytkonzentration abhängig, sondern auch von der Batterietemperatur, der durch Alterung geprägten Kristallisationsform des Bleidioxyds der positiven Elektrode, dem Zelldruck und der Elektrolytschichtung. Zur Elektrolytschichtung gibt [Tup91] exemplarisch folgende Elektrolytdichten an:

Tab. 4.1: *Elektrolytschichtung bei Bleisystemen*

Elektrolyttyp	Dichte oben	Dichte unten	relative Differenz
flüssig	1,17	1,29	9,76%
Vlies	1,20	1,26	4,88%
Gel	1,232	1,24	0,65%

Bei flüssigem Elektrolyten kann durch die unterschiedlichen Konzentrationen bei vorhandener Säureschichtung ein Ausgleichsstrom vom unteren in den oberen Bereich fließen. Die Lade-Überspannung des oberen Teils ist dabei größer als die Entlade-Überspannung des unteren Teils, was zu einer höheren Klemmenspannung führt.

Andere Ansätze bestimmen den differentiellen Widerstand, definiert als die Spannungsänderung bei einer vorgegebenen Laständerung, verbunden mit einer Temperaturkompensation. Im ESF sind die Ruhephasen jedoch zu kurz und die Signale zu verrauscht bzw. unstetig. **Abb. 4.3** zeigt reale Meßwerte aus dem cityEL. Die Kurvenverläufe lassen keine Auswertung dahin gehend zu, dass der genaue Ladezustand aus den Kurven bestimmt werden kann. Das Batterieverhalten liefert aber Informationen, die einer auf Expertenwissen basierenden Ladezustandserkennung nützlich sind.

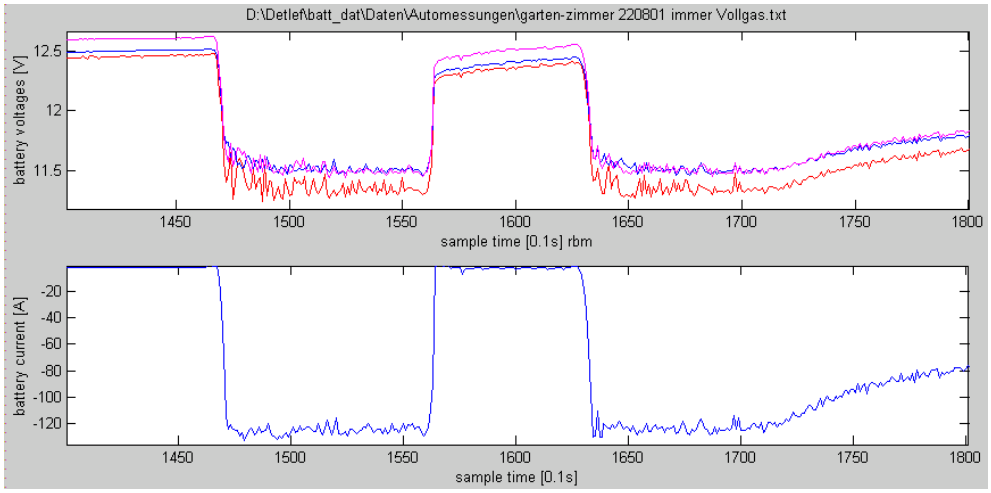


Abb. 4.3*:* *Spannungsverlauf Übergang zur Ruhespannung im realen Fahrzyklus (oben: Modulspannungen, unten: Entladestrom)*

4.2.3 Impedanzspektroskopie

Batterien lassen sich als elektrische Zweipole auffassen und sind daher durch ihr Wechselspannungsverhalten beschreibbar. Bereits Nernst und Wien haben Ende des neunzehnten Jahrhunderts erste Messungen an Batterien mit Wechselspannungen durchgeführt. Warburg beschreibt die Frequenzabhängigkeit der Diffusionsprozesse in Elektrodengrenzschichten. Neueren Datums sind Untersuchungen, die mit Hilfe der Impedanzspektroskopie Aussagen über den Ladezustand von Batterien treffen wollen [Hön94]. Nach [Gop79] soll das durch das Anregungssignal am Messobjekt hervorgerufene Signal 10 mV nicht überschreiten, muss auf jeden Fall unterhalb der Temperaturspannung liegen, die mit

$$U_T = RT/F = kT/e$$

ungefähr 25 mV bei 25 ˚C beträgt. Am häufigsten wird mit einem Sinussignal angeregt und dann Betrag und Phase des resultierenden Stromes gemessen. Die Anregung mit einer Sprungfunktion ist sehr fehleranfällig bei den kleinsten zu bestimmenden Frequenzen, die Anregung mit einem Zufallssignal erfordert eine hohe Güte desselben. Nach [Eul72] soll der zu untersuchende Frequenzbereich im Bereich 0,01 Hz ... 50 kHz liegen. [Hön94] hat an unterschiedlichen Batterien das Admittanzverhalten untersucht und eine Ladegradabhängigkeit feststellen können.

Dieses Verfahren ist auf den Traktionsbetrieb nur mit großem Aufwand implementierbar, da es auf eingeschwungenen Zuständen basiert. Während der kurzen Beruhigungsphasen im ESF würde der Einschwingvorgang zur Ruhespannung die Messung bereits unzulässig verfälschen. Weiterhin wäre der hochgenaue Messaufbau für Automobiltechnik viel zu kostenintensiv. Für Batterieuntersuchungen an Batterietestständen bietet sich das Verfahren aber durchaus an. Die sich im onboard-Betrieb ändernden Parameter, wie zum Beispiel die Batterietemperatur, lassen dieses Verfahren im Fahrzeug derzeit nicht aussichtsreich erscheinen.

4.3 Modellierung des Batterieverhaltens

Batteriemodelle dienen dazu, das elektrische Verhalten von Batterien zu beschreiben. Mit Hilfe eines Batteriemodells kann der Verlauf der Klemmenspannung oder der Temperatur bei willkürlich festgelegten Lastprofilen vorausberechnet werden und damit zum Beispiel der Entladeschluß vorherbestimmt werden. Die Bestimmung des Verlaufes der Klemmenspannung oder des Temperaturverlaufes ermöglicht neben der Bestimmung des Ladezustandes auch die Bestimmung des SOH, da in Abhängigkeit des Lastprofils ein Vergleich des Augenblicksverhaltens mit Referenzkurven oder Kurven aus vorhergehenden Messungen vorgenommen werden kann. Eine modellbasierte Bestimmung des Batteriezustandes im Fahrzeug während des Fahrbetriebes (real-time-Bestimmung) erfordert eine hohe im Fahrzeug installierte Rechenleistung. Diese kann bei ausgesuchten Testfahrzeugen installiert werden, aufgrund des hohen Kostendrucks in Serienfahrzeugen erscheint der Einsatz kostengünstigerer Verfahren wahrscheinlicher. Der Modellierung wird jedoch gerade beim Einsatz teurerer Batteriesysteme mit erheblich höheren Sicherheitsanforderungen als es Bleisysteme aufweisen, eine erheblich

größere Aufmerksamkeit geschenkt werden.

Einige der in den folgenden Abschnitten genannten Modelle wurden bereits in vorangegangenen Abschnitten erwähnt. Dort dienten sie zur Erläuterung spezieller Batteriecharakteristiken, hier soll systematisch die Entwicklung eines eigenen Ansatzes aus einem bestehenden Modell heraus erläutert werden.

4.3.1 Anforderungen an Batteriemodelle

Ein Batteriemodell soll unabhängig von den herrschenden Betriebsbedingungen (Strom, Temperatur, Leistungsverlauf) beim Laden und beim Entladen zuverlässige Voraussagen über

- den Entladegrad,
- den momentanen Ladezustand,
- den Zeitpunkt des Entladeschlusses,
- die noch verfügbare Ladung oder Energie,
- den Spannungsverlauf und
- den Temperaturverlauf

treffen. Einflüsse auf die entnehmbare Ladung durch z.B. Pulsbelastung, Selbstentladung, Nutzbremsung oder Temperaturänderungen müssen berücksichtigt werden, Alterungseffekte müssen identifiziert werden und das Modell entsprechend adaptiert werden. Während der Ladung soll das Ladeende vorherbestimmt werden [Sch82].

4.3.2 Bekannte Modellierungsansätze

Bereits im 19. Jahrhundert wurden Ansätze zur Modellierung des Batterieverhaltens unternommen. Im Abschnitt 2.2.1 wurde bereits auf die Arbeit von Peukert verwiesen.

Das *Hoxie*-Modell gibt die Entladezeiten einer positiven Platte bei verschiedenen Strömen an. Es berücksichtigt Beruhigungszeiten und kann deshalb im Gegensatz zur Peukert-Gleichung bei veränderlichen Strömen eingesetzt werden.

Bei der "*Airesearch*"-Näherung wird der augenblickliche Entladezustand als Funktion des momentanen Entladestromes i(t) sowie der bestimmten entnehmbaren Ladungsmenge und des bisher ermittelten mittleren Entladestromes bestimmt. Problem hierbei ist, dass bei diskontinuierlichem Entladestrom der Entladezustand ebenfalls diskontinuierlich wird.

Das Modell von *Martin* geht von der Peukert-Gleichung aus. Der vorhersagbare erreichbare Entladegrad q_E des Akkumulators ist hier aber kein konstanter Wert, der vom Konstantstrom abhängt, sondern folgt mit einer Verzögerung 1.Ordnung dem vorhersagbaren Entladegrad, der in Abhängigkeit vom jeweiligen Strom steht. Der Bereich der Zeitkonstante liegt zwischen 2 und 5 Minuten [SCH-82].

Die Verfahren bestimmen aufgrund der gemessenen Klemmengrößen näherungsweise den Ladezustand, es findet jedoch bei keinem der Modelle eine Nachbildung der Klemmenspannung statt. Diese ist von Interesse, wenn der SOH einer Batterie untersucht werden soll. Aus dem Vergleich eines aktuellen Batterieverhaltens mit einem hinterlegten Sollverhalten lassen sich vom Batteriemanagementsystem Rückschlüsse über Innenwiderstände und Alterung ziehen. Die Komplexität solcher Modelle ist jedoch beträchtlich, so dass die Bestimmung unter Realzeitbedingungen sehr aufwendig ist. Es sollen weiter unten Ansätze aufgeführt werden, die in diese Zielrichtung gehen.

Shepard stellt eine Beziehung für die Klemmenspannung u in Abhängigkeit vom Strom i und vom Entladegrad q her. Die Shepard-Gleichung gilt für Entladungen und Ladungen. Fehler treten bei der Sheperd-Gleichung vor allem bei dynamischen Vorgängen auf, da Einschwingvorgänge und Beruhigungszeiten nicht berücksichtigt werden.[RUN-74][SCH-82].

Mit Hilfe einer Gleichung und eines elektrischen Ersatzschaltbildes, das aus der Reihenschaltung einer Ruhestromquelle, eines Kondensators und eines Widerstandes besteht, beschreibt *Kleckner* die Klemmenspannung. Angewendet wird dieses Modell auf den Bleiakkumulator und Nickel-Cadmium-Akkumulator. Für die Beschreibung der mathematischen Zusammenhänge wird mehrfach die Gauß´sche Fehlerfunktion eingesetzt. Dieses Modell kann bei veränderlichen Entladeströmen eingesetzt werden.

Heldt/Canders bringen in ihrem Modell die Leistung, die Klemmenspannung, den Strom, die entnommene Ladung und den Entladegrad in Zusammenhang. Zusätzlich gehen Erholung und Nutzbremsung in das Rechenmodell ein. Temperatureinflüsse bleiben unberücksichtigt. Die Parameter werden empirisch bestimmt und im Rechenmodell numerisch verarbeitet [SCH-82].

Stein berechnet mit einem einfachen Diffusionsmodell für Bleiakkumulatoren für die Entladung Konzentrationsprofile in porösen Elektroden. Dafür nimmt er zylindrische Poren senkrecht zur Plattenoberfläche an. Bei großen Stromdichten wird eine gute Übereinstimmung zwischen Rechnung und Experiment erzielt [RUN-74][SCH-82].

Ein gegenüber Stein erweitertes Diffusionsmodell führt *Runge* ein (**Abb. 4.4**). Dazu gibt er ein elektrisches Ersatzschaltbild an, das beim Entladen mit beliebigen Strömen gilt.

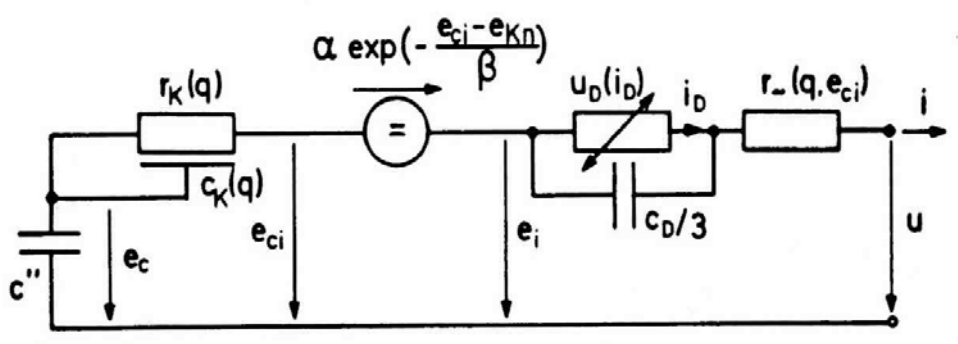


***Abb. 4.4**: Elektrische Ersatzschaltung des Bleiakkumulators nach Runge [RUN-74]*

mit

e_c	Ruhespannung
u	Klemmenspannung
i	Strom
c	relative Kondensatorkapazität
r_K, c_K	Elemente der Konzentrationsüberspannung
α, β, e_{Kn}	Konstanten zur Beschreibung des Spannungszusammenbruches am Entladungsende
u_D, c_D	Beschreibung der Durchtrittsüberspannung
$r_\sim$	Wechselstromwiderstand

Die einzelnen Elemente dieses Ersatzschaltbildes werden stellvertretend für das Ruhespannungsverhalten, die Konzentrations- und die Durchtrittsüberspannung sowie für den ohmschen Widerstand angegeben.

Der Spannungszusammenbruch des Bleiakkumulators am Entladeende wird durch das exponentielle Verhalten der Spannungsquelle beschrieben. Dem bei Hochstromentladungen auftretenden frühzeitigen Spannungszusammenbruch wird durch die Wahl der Konstanten α, β und e_{Kn} Rechnung getragen, wobei e_{Kn} aus der Ruhespannungskennlinie entnommen wird. Die RC-Schaltung bildet die Durchtrittsüberspannung nach. Der Wechselstromwiderstand $r_\sim$ erfasst die ohmschen Verluste des Bleiakkumulators. Abhängig ist dieser von der Säuredichte und der Porenstruktur der Platten.

Aufgrund experimenteller Untersuchungen und theoretischer Überlegungen entwarf *Gretsch* ein elektrisches Ersatzschaltbild für Bleiakkumulatoren (**Abb. 2.5**), das sowohl für die Entladung als auch für die Ladung gilt. Gretsch hat die einzelnen Ersatzelemente bestimmt und ihre Abhängigkeiten von Strom, Temperatur, Entladegrad und Alterung angegeben. Diese Abhängigkeiten sind nichtlinear und in Diagrammen dargestellt. Typisch ist das Fallen der Widerstandswerte bei steigender Temperatur und das progressive Ansteigen der Lade- bzw. Entladewiderstände am Ende der Ladungs- bzw. Entladungsphase [GRE-79][SCH-82].

Die Modelle von Runge und Gretsch erfassen den Spannungszusammenbruch am Entladeende. Das Modell von Gretsch erfasst die Gasung und Selbstentladung und ist für die Lade- und Entladephase geeignet [SCH-82][RUN-74][GRE-79].

Tab. 4.2 vergleicht die aufgeführten Batteriemodelle.

Tab. 4.2: *Vergleich der genannten Batteriemodelle*

Kriterium	Peukert	Hoxie	Airesearch	Martin	Sheperd	Kleckner	Heldt / Canders	Runge	Gretsch
zeigt Entlade-ende an	•	•	•	•	•	•	•	•	•
bildet Span-nungsverhal-ten nach					•	•	•	•	•
Elektrische Ers.schaltung						•		•	•
empirisch ermittelt	•	•	•	•		•	•		
elektro-chemischer Hintergrund					•			•	•
Gültig für:									
Entladen	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Laden					•				•
veränderliche Ströme		•	[•]	•	[•]	•	•	•	•
Gasung									•
Selbstent-ladung									•
verschiedene Tem-peraturen								[•]	•
Bleiakku-mulator	•	•	•	•	•	•	•	•	•
verschiedene Speicher-systeme					•	•			

[•] mit Einschränkungen

Aus Tab. 4.2 ist zu entnehmen, daß das Modell von Gretsch [GRE-79] die meisten aufgestellten Anforderungen an ein Modell erfüllt. Es wird daher die Basis für die Modellierung der genutzten Traktionsbatterien darstellen. Der nachfolgende Abschnitt erläutert das Gretsch-Modell genauer.

4.3.3 Modellansatz zur Beschreibung einer 6V 160Ah Blei-Gel-Batterie

Zur Modellierung der Blei-Gel Batterien, wie sie im Golf CitySTROMer II eingesetzt wurden, wurde als Basisansatz das Modell von Gretsch genutzt. Dieses für Starterbatterien in KfZ-Bordnetzapplikationen entworfene Modell wurde im ersten Schritt an ein 6V/160Ah Batteriemodul angepasst. Im Anschluss daran wurde das Modell in mehreren Schritten so weiterentwickelt, dass Simulationen befriedigende Übereinstimmungen mit realen Messreihen erbrachten. Die elektrische Ersatzschaltung des Gretschmodells zeigt nochmals die **Abb. 4.5**.

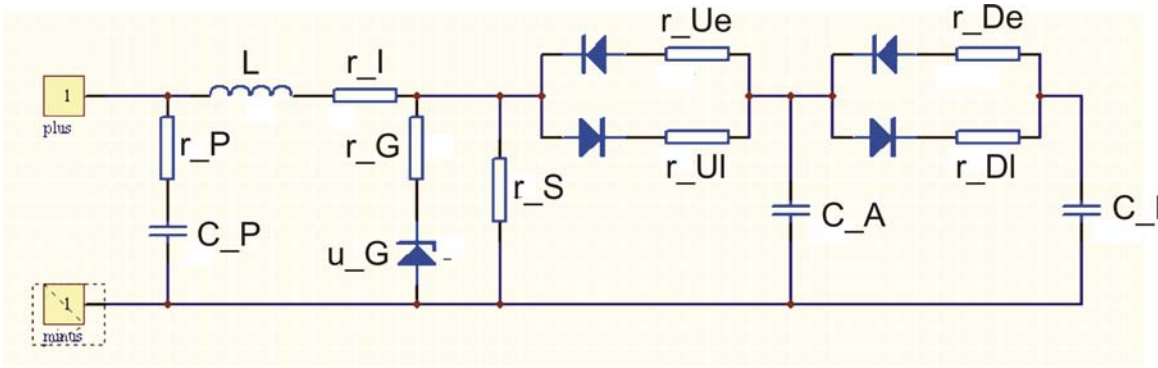


***Abb. 4.5**: Elektrisches Ersatzschaltbild der Bleibatterie nach Gretsch*

mit

c_p, r_p	Polarisationskapazität, - widerstand
L	Induktivität
r_I	transienter Innenwiderstand
r_G, u_G	Gasungswiderstand, Gasungsspannung
r_S	Selbstentladewiderstend
r_U	Umwandlungswiderstand
r_D	Diffusionswiderstand
C_A, C_R	Arbeitskapazität, Ruhekapazität
Indices	e: Entladung, l: Ladung

Der Vorteil des Ansatzes von Gretsch ist der, dass den einzelnen im Akkumulator ablaufenden chemischen Prozessen beim Laden und Entladen getrennte Elemente des Ersatzschaltbildes zugeordnet sind. Die einzelnen Widerstände des Ersatzschaltbildes sind jeweils von unterschiedlichen Parametern abhängig. Generell ist eine Stromabhängigkeit, eine Temperaturabhängigkeit, eine Alterungsabhängigkeit und eine Restladegradabhängigkeit feststellbar. Durch Variation einzelner Parameter hat Gretsch in umfangreichen Messungen die einzelnen Abhängigkeiten bestimmt und in separaten Kennlinien hinterlegt. Jeder Widerstand

setzt sich aus einem konstanten Faktor (Widerstandsbeiwert) und je einem dimensionslosen Faktor je Abhängigkeit gemäß Kennlinie zusammen. Die Bestimmung der Kapazitäten der Ersatzschaltung erfolgt aus dem Spannungsverlauf des Akkumulators bei einer Konstantstromentladung und wird später detailliert beschrieben.

Um unabhängig von der eingesetzten Batterie zu sein werden alle Angaben auf die Einheitszelle mit der Nennspannung U_N = 2 V und der Nennkapazität K_N = 1 Ah bezogen. Dabei entspricht die Nennkapazität der Kapazität der Batterie, die bei einer T_N-stündigen Entladung mit Konstantstrom bei einer Temperatur von 300 K entnehmbar ist. Gretsch hat seine Parameter für Starterbatterien (T_N = 20 h) aufgenommen. Es gilt:

$$K_N = T_N \cdot I_N \Big|_{\vartheta=27°C=\vartheta_N} \tag{4.6}$$

In dem auch häufig zur Ladezustandsbestimmung eingesetzten Verfahren der Ladungsbilanzierung wird der Ladegrad p einer Batterie definiert als

$$p = 1 - \frac{\int_0^{t_E} I_E \cdot dt}{K_N} = 1 - \frac{Q_E}{K_N} = 1 - q \quad . \tag{4.7}$$

Bei einer vollgeladenen Batterie gilt dementsprechend p = 1, nach der Entnahme der Nennladung wird p = 0. Arbeitet man mit den hier verwendeten normierten Größen und bezieht sich bei der Ladegradbestimmung auf die Nennkapazität, so wird man in Folge zum Beispiel höherer Ladeströme als I_N, tieferer Temperaturen als der Nominaltemperatur oder aufgrund zunehmender Alterung nicht immer die volle Nennkapazität entnehmen können. Das bedeutet, dass die Entladeschlußspannung U_{Emin} vor der Entnahme von K_N erreicht wird, somit verbleibt ein von den genannten Parametern abhängige Restladung in der Batterie und man definiert einen Restladegrad

$$p_r = 1 - \frac{Q_{Es}}{K_N}\Big|_{u=U_{E\,\min}=1{,}75V} \quad . \tag{4.8}$$

Der Restladegrad hat in der Regel ein positives Vorzeichen, nur bei höheren Temperaturen und gleichzeitig geringen Entladeströmen kann ein negativer Restladegrad erzielt werden. Das Verhältnis von bereits entnommener Ladung Q_E zur bis zum Entladeschluß entnehmbaren Ladung Q_{Es} wird als relativer Entladegrad q^* definiert, was allgemein dem SOC entspricht:

$$q^* = \frac{Q_E}{Q_{Es}} = \frac{1 - p}{1 - p_r} \tag{4.9}$$

Akkumulatoren beliebiger Nennspannungen und Nennkapazitäten kann man sich als Kombination von Reihen- und Parallelschaltungen von Einheitszellen vorstellen.

Wie bereits beschrieben setzt sich ein Widerstand der elektrischen Ersatzschaltung des Gretsch-Modells folgendermaßen zusammen:

$$r_x = r_{x0} \cdot r_{x\vartheta} \cdot r_{xI} \cdot r_{xq} \qquad \textbf{(4.10)}$$

Dabei entspricht r_x dem Widerstand gemäß der Schaltung, r_{x0} ist der konstante Faktor mit der Einheit [Ω], $r_{x\vartheta}$, r_{xI} und r_{xq} sind die dimensionslosen Faktoren, die die Temperaturabhängigkeit, die Stromabhängigkeit und die Ladegradabhängigkeit darstellen. Für die letztgenannten Faktoren hat Gretsch in umfangreichen Messungen Funktionsverläufe der Abhängigkeiten ermittelt. Diese Funktionsverläufe wurden mit Hilfe von Matlab in Polynomfunktionen überführt. Jeder Widerstand im Modell nach Gretsch läßt sich in PSPICE als eigenes Modell darstellen.**Abb. 4.6** zeigt als Beispiel das Modell des Diffusionswiderstandes der Entladung.

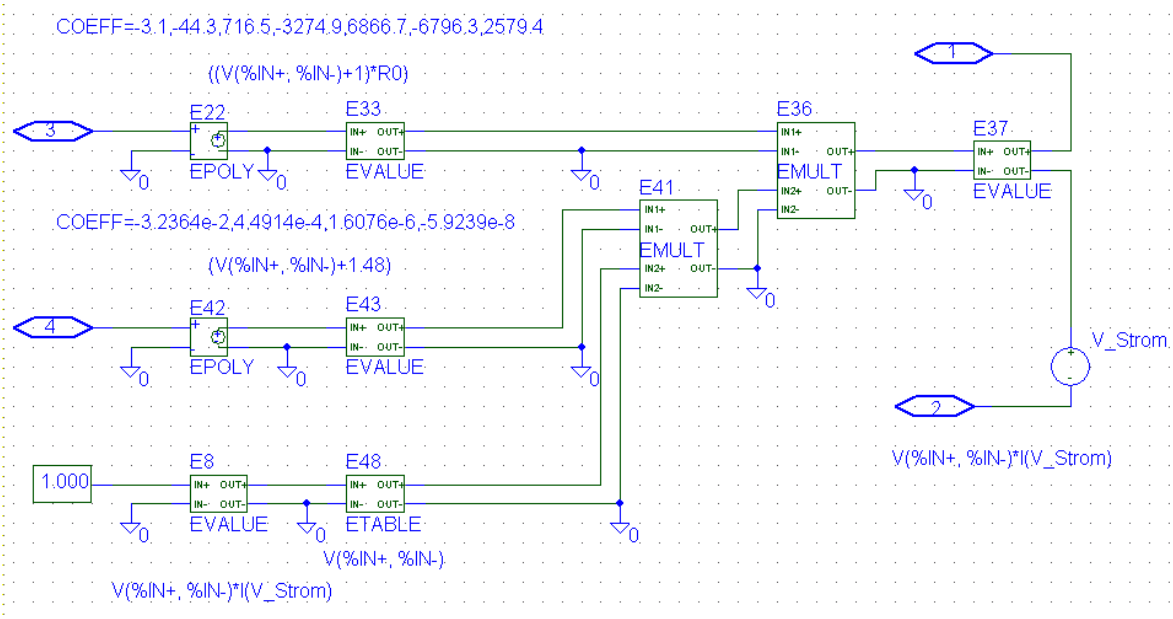


***Abb. 4.6**: Modell des Widerstandes r_{dE} in PSpice*

Die Anschlüsse 1 und 2 entsprechen denen, über die effektiv der Strom fließt. Über Anschluss 3 wird der Restladegrad auf das Modell aufgeschaltet und mit der Polynomfunktion multipliziert. Anschluss 4 nimmt nach dem gleichen Schema das Steuerungssignal für den temperaturabhängigen Widerstand auf. In E33 wird der konstante Einheitswiderstand nach Gretsch mit in die Schaltung einbezogen. Der Ausgang von E37 spiegelt den momentanen Diffusionswiderstand wider, der muss dann noch mit dem Strom multipliziert werden, um den Spannungsabfall am Widerstand zu erhalten. Es entsteht somit das neue Modell eines steuerbaren Widerstandes mit vier Anschlüssen, wobei zwei Anschlüsse den Widerstand

nachbilden und zwei Anschlüsse als Parametriereingänge dienen. Diese neuen Modelle werden dann nach **Abb. 4.7** in die Gesamtschaltung integriert.

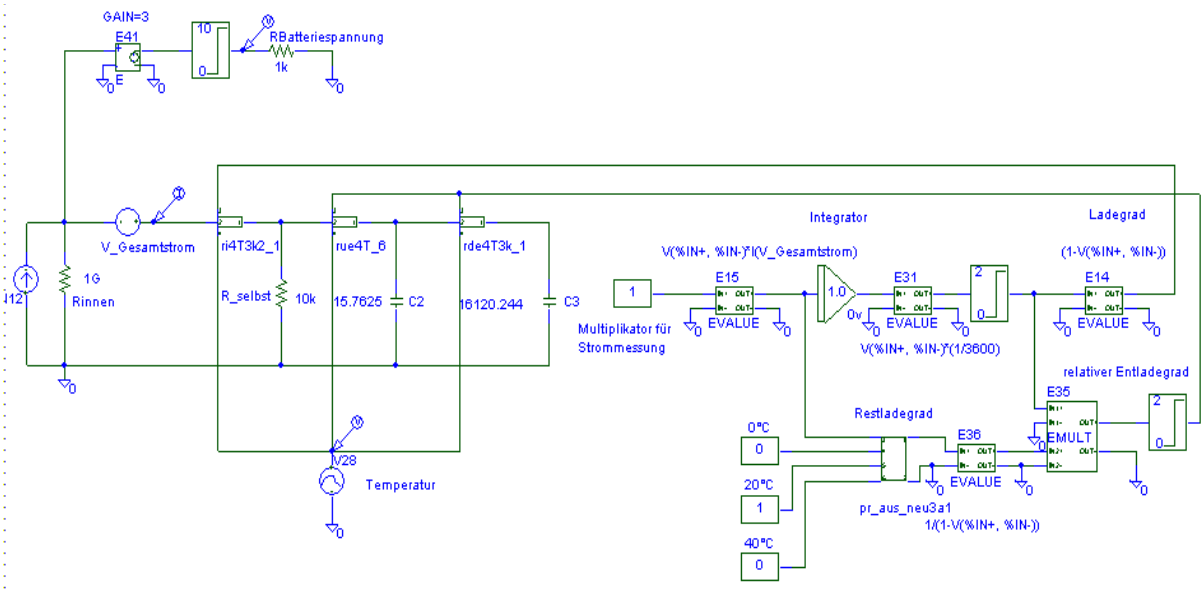


Abb. 4.7: *Gesamtschaltung zur Simulation des elektrischen Ersatzschaltbildes nach Gretsch*

Im linken Teil ist die eigentliche Schaltung nach Gretsch unter Vernachlässigung der Ladung erkennbar. Diese simuliert prinzipiell die Einheitszelle. Zur Anpassung an das reale Verhalten wird noch eine Verstärkung um die Anzahl der Zellen im Modul eingeführt. Der gesamte rechte Teil der Schaltung dient der Bestimmung des Ladegrades des transienten Innenwiderstandes bzw. der Bestimmung des relativen Entladegrades des Umwandlungs- und des Diffusionswiderstandes.

Die Schaltung wird mit den von Gretsch postulierten Werten und Kurven simuliert. Die Simulationsergebnisse sind völlig unbefriedigend und zeigen, dass eine Anpassung des Modells an die wirklichen Batterien zwingend notwendig ist. Im nächsten Schritt wurden die Kurvenverläufe der Parameterabhängigkeiten beibehalten und die konstanten Faktoren der Widerstände aus eigenen Messreihen von Konstantstromentladungen bestimmt. Dazu wurden Entladungen mit unterschiedlichen Strömen (10A, 30A, 60A, 100A, 150A, 200A) bei jeweils unterschiedlichen Temperaturen (0˚C, 20˚C, 40˚C) herangezogen. Die Bestimmung der konstanten Faktoren erfolgte aus den ermittelten Spannungsverläufen nach dem in **Abb. 4.8** gezeigten Prinzip.

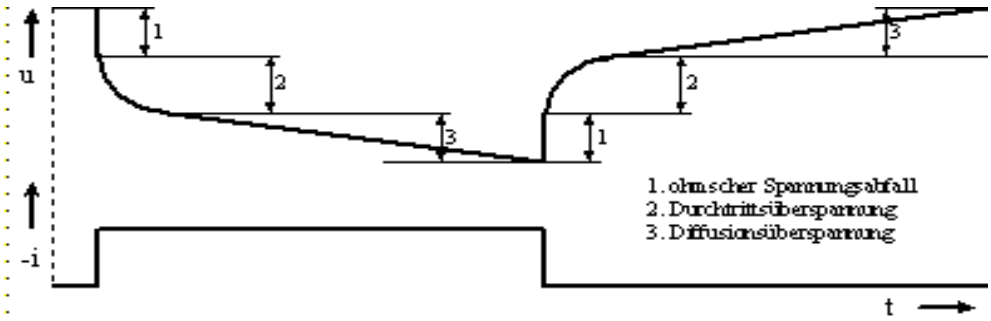


***Abb. 4.8**: Bestimmung der Überspannungen aus Meßreihen*

Die Bestimmung des Restladegrades wurde nicht mehr nach den Kurven gemäß Gretsch durchgeführt, sondern aufgrund der (bereits zur Bestimmung des konstanten Faktors jedes im Modell vorkommenden Widerstandes) verwendeten Konstantstromentladungen durchgeführt. Das Modell des Restladegrades zeigt **Abb. 4.9**.

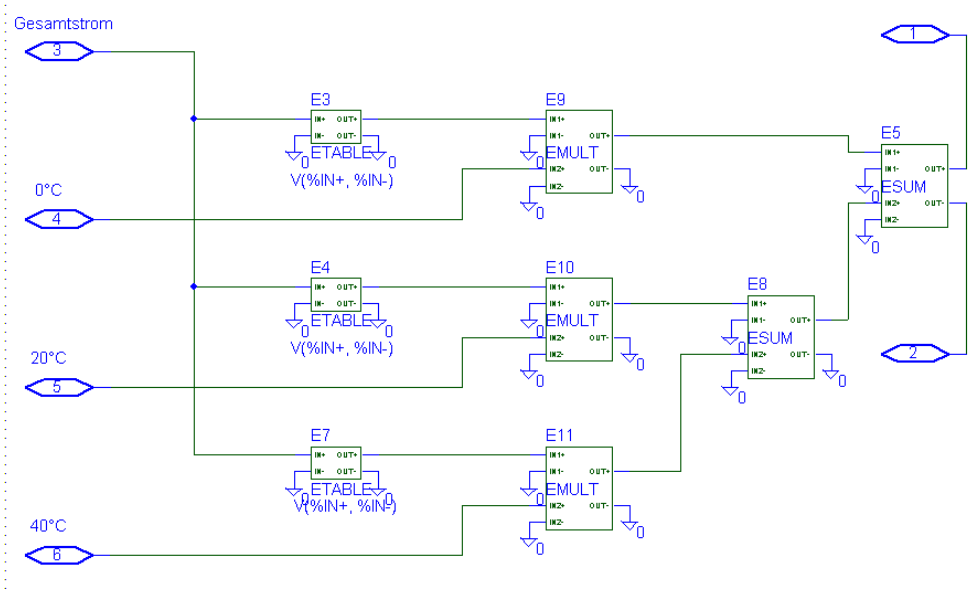


***Abb. 4.9**: Modell zur Bestimmung des Restladegrades*

Die Anschlüsse <1> und <2> des Modells geben als Spannung den erreichbaren Restladegrad in Abhängigkeit der Temperatur und des Stromes aus. Über die Anschlüsse <4>, <5> und <6> wird die Modultemperatur zum Entladebeginn eingestellt. Zwischenwerte der Betriebstemperatur, wie zum Beispiel 5 ˚C, erhält man durch eine lineare Aufteilung der Bewertungsfaktoren (im Beispiel: <4> = 0,75 /<5>=0,25). Der Anschluss <3> erhält den für die Simulation gewählten Gesamtstrom, über den aus der Betriebstemperatur zugewiesenen Tabelle (E3, E4, E7) der stromabhängige Restladegrad bestimmt wird.

Bei einer Auswertung aller Messreihen und der zugehörigen Simulationen wird deutlich, dass das Modell mit der Bestimmung des Restladegrades aus den beschriebenen Messreihen brauchbare Ergebnisse liefert.

In einer ersten Anpassung wurden Mittelwerte der konstanten Faktoren der Simulationswiderstände und der ermittelten Kapazitäten gebildet. In der ursprünglichen Betrachtung wurden diese Werte für jede Simulation aus der vorliegenden Messreihe separat bestimmt. Nach Gretsch sind diese Werte jedoch Konstanten, d.h. strom-, ladezustands- und temperaturunabhängig. Die Simulation mit der Verwendung der Mittelwerte führt bereits zu verbesserten Ergebnissen. Es fällt eine stromabhängige Überbewertung des transienten Innenwiderstandes und des Spannungssackes auf. Gemäß Gretsch wird der r_{iE} als stromunabhängig angenommen, die Simulationsergebnisse widersprechen dem für die eingesetzten Batterien. In das Modell des transienten Innenwiderstandes wird die Stromabhängigkeit nach **Abb. 4.10** in Form der 'rot' markierten Tabelle integriert.

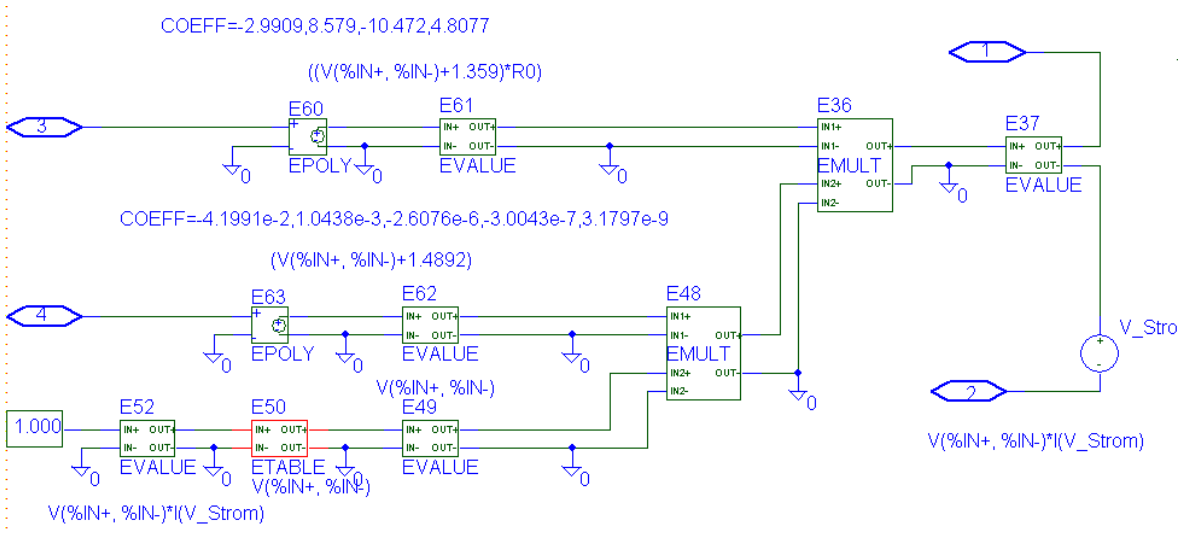


***Abb. 4.10**:* *Umsetzung des stromabhängigen Faktors im Pspice-Modell des transienten Innenwiderstandes*

Diese Anpassung zeigt bei Temperaturen von 20 ˚C und 40 ˚C bereits starke Verbesserungen, bei ϑ = 0 ˚C sind jedoch noch erhebliche Abweichungen feststellbar. An dieser Beobachtung wird deutlich, dass die Kurve der Temperaturabhängigkeit des transienten Innenwiderstandes hin zu niedrigeren Temperaturen zu stark ansteigt. Sie wurde flacher gestaltet, was zu deutlich besseren Simulationsergebnissen führte. Die verwendeten Traktionsbatterien weisen also ein deutlich besseres Verhalten bei tiefen Temperaturen auf als die von Gretsch untersuchten Starterbatterien.

Der Entladeschluß wird in allen Simulationen zu früh bestimmt. Verantwortlich dafür ist der ladegradabhängige Faktor r_{DEq} des Diffusionswiderstandes. Von Gretsch wurde dieser Faktor bis zu einem relativen Entladegrad q* = 0,8 bestimmt (was für Starterbatterien durchaus Sinn macht). Hier wurde die Abhängigkeit bis zu relativen Entladegraden mit q* =1,15

weitergeführt, was zu deutlichen Verbesserungen der Simulationsergebnisse führt. Die zeitliche Abweichung des simulierten Entladeschlusses vom gemessenen Zeitpunkt verringert sich, der Kurvenverlauf der Simulationskurven passt sich zum Entladeschluß stärker den gemessenen Verläufen an.

Für Konstantstromentladungen lassen sich somit brauchbare Ergebnisse erzielen unter folgenden Bedingungen:

- das zu simulierende Modul wurde umfangreichen Messungen zur Bestimmung des Entladeverhaltens unterzogen.
- In einem mehrstufigen Adaptionsverfahren kann basierend auf den von Gretsch ermittelten Abhängigkeiten durch die Anpassung einzelner Parameter oder Kurvenverläufe eine relative Übereinstimmung zwischen Simulation und Modul erreicht werden.

Die Simulationsergebnisse des endgültigen Modells bei 40˚C werden in **Abb. 4.11** exemplarisch dargestellt.

Dieses Verfahren muss auf die Anpassung anderer Module übertragen werden, die Grenzen der Gültigkeit des Modells müssen bestimmt werden. Dafür wurde ein anderes Modul aus einer anderen Fertigungscharge des gleichen Herstellers und gleichen Typs nach dem gleichen Verfahren basierend auf vorangegangenen Konstantstromentladungen unterschiedlicher Temperatur und Stromstärke simuliert.

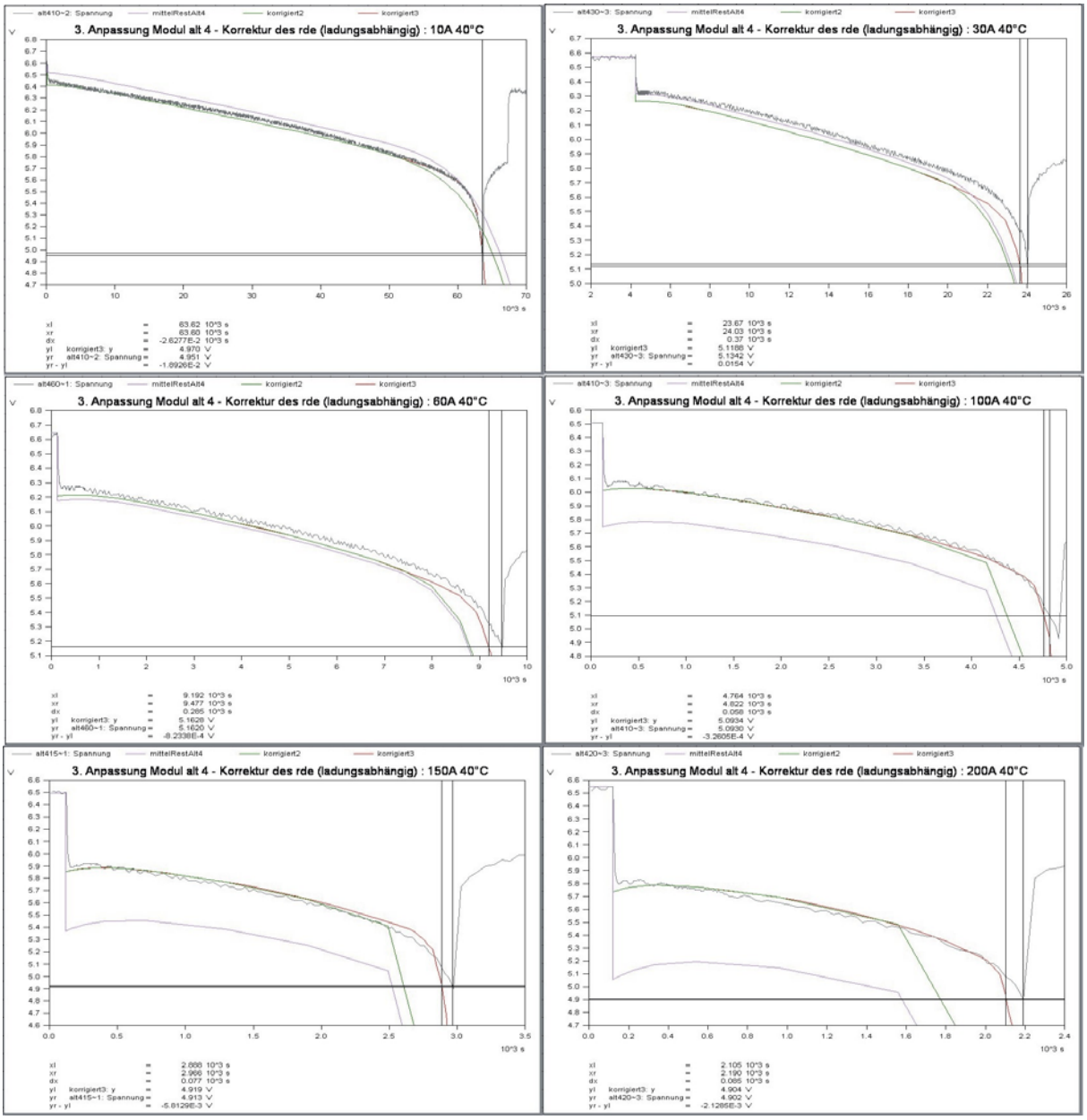


Abb. 4.11: *Endgültige Simulation basierend auf dem Modell von Gretsch mit dem Ziel der Bestimmung des Klemmenspannungsverlaufes und des Entladeschlusses bei Konstantstromentladungen*

Am Beispiel des Moduls neu3 in **Abb. 4.12** wird deutlich, dass bei Abweichungen in der Nachbildung der Klemmenspannung eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Modell und Batterie in Bezug auf die Bestimmung des Entladeschlusses gegeben ist. **Abb. 4.12** zeigt das Simulationsergebnis für die gleichen Konstantstromentladungen wie beim Referenzmodul.

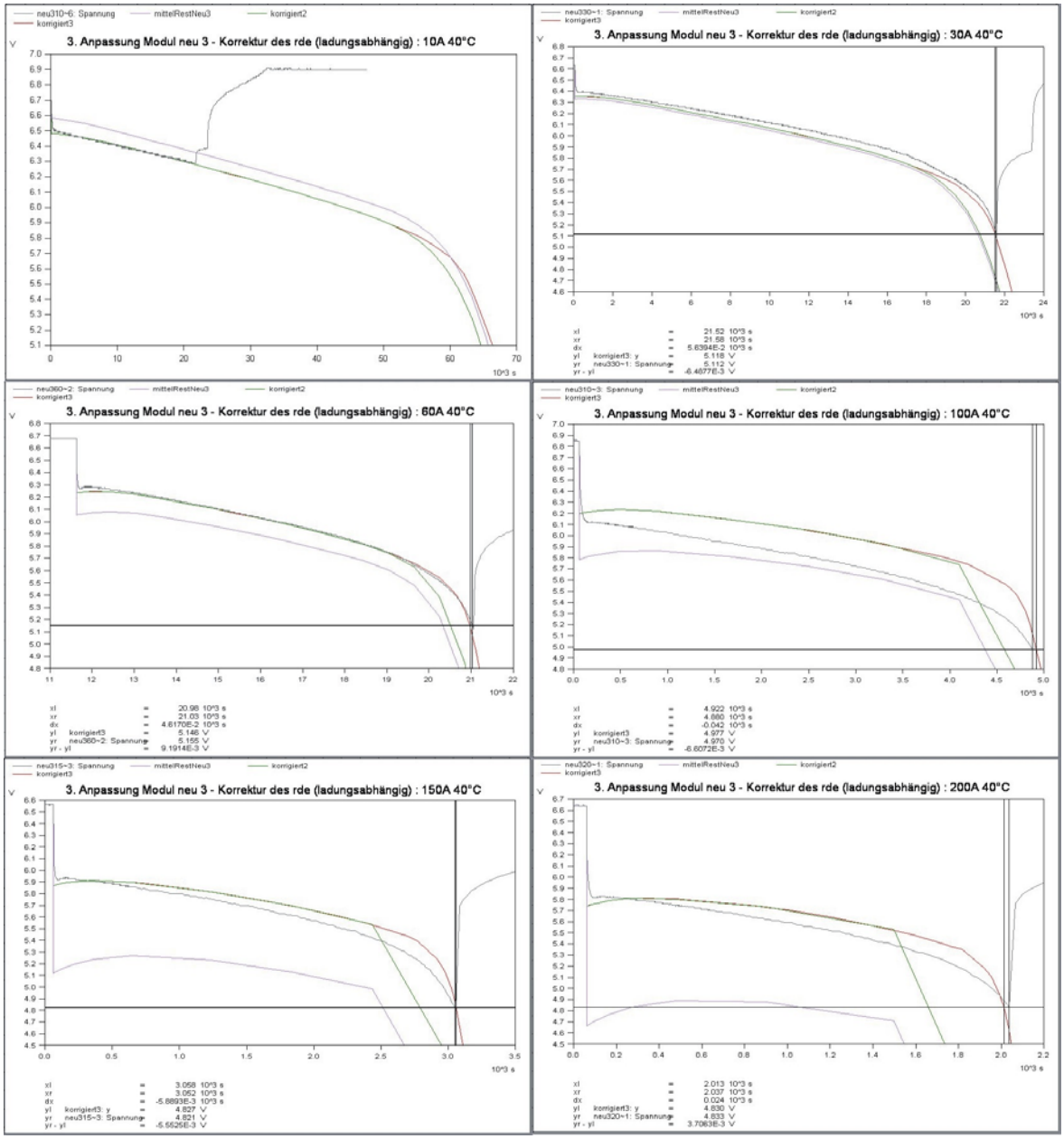


***Abb. 4.12**: Simulation des auf Modul neu3 angepassten Modells bei Konstantstromentladungen und einer Betriebstemperatur von 40 °C*

Legt man alte Messreihen zugrunde, so wird deutlich, dass die einzelnen Parameter des Modells zeitlich invariant sind. Prinzipiell sind die Parameter nur für einen kurzen Zeitraum von wenigen zig-Zyklen gültig. Eine Rekalibrierung bzw. Neubestimmung der variablen Parameter hat in festgelegten Intervallen abzulaufen. Werden die der Simulation unterzogenen Module im Elektrofahrzeug zu einer Traktionsbatterie zusammengeschaltet, so werden die einzelnen

Module abhängig von der Kühlung und vom Einbauort unterschiedlich altern. In diesem Fall muss prinzipiell jedes Modul in den festzulegenden Intervallen neu vermessen werden. Diese Bedingung macht das vorgestellte Verfahren nur unter der Bedingung interessant, dass Verfahren gefunden werden, die eine Bestimmung der Parameter im Traktionsbetrieb ermöglichen.

In einem weiteren Schritt wurde das für Konstantstromentladungen angepasste Modell mit pulsförmigen Strömen variabler Dynamik verifiziert. Dabei wurde deutlich, dass bei anfänglich guter Übereinstimmung zwischen Modell und Messung zum Entladeschluß der Restladegrad falsch bestimmt wurde, was einem starken Anstieg der restladegradabhängigen Faktoren führte.

Aus verschiedenen Messungen mit Pulsentladungen relativ kurzer Pulse (tp < 2 min) konnte gefolgert werden, dass der erreichbare Restladegrad der Batterie in etwa dem entspricht, der bei einer Konstantstromentladung mit dem arithmetischen Mittelwert der Pulsströme erreichbar wäre (**Abb. 4.13**).

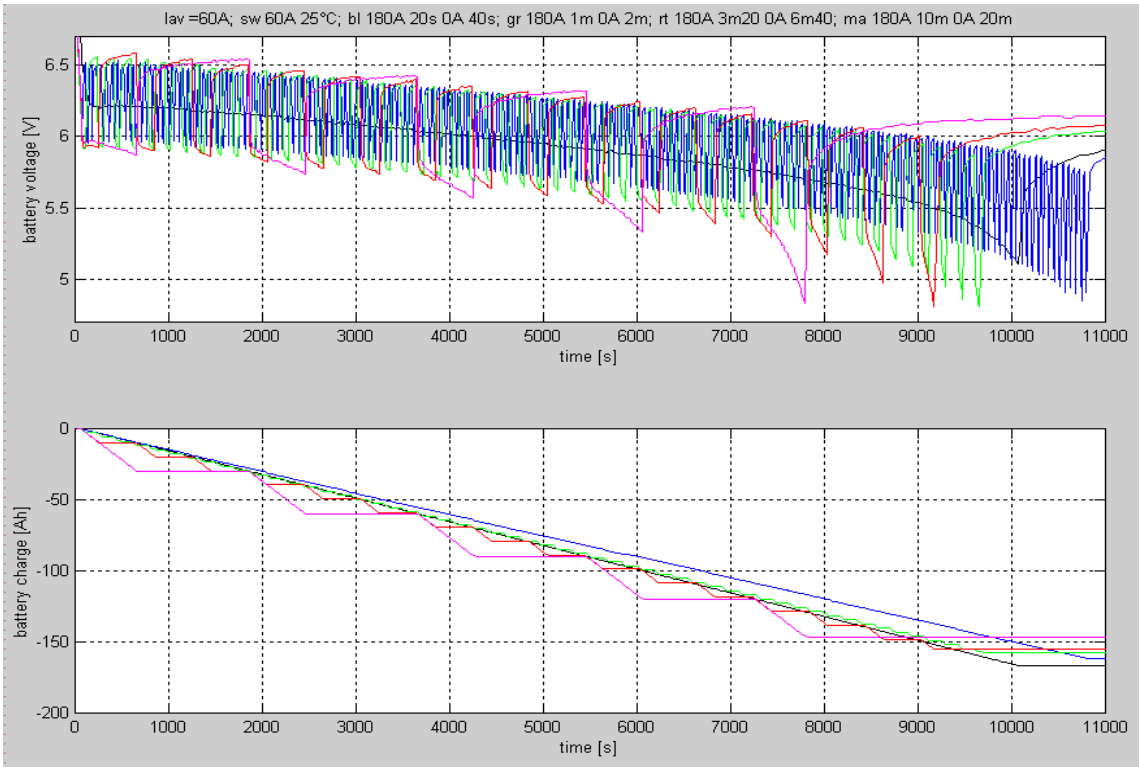


***Abb. 4.13**: Entnehmbare Ladung bei pulsförmiger Belastung, variabler Pulsdauer und konstantem I_{AV} (blau: 1min; grün: 3 min; rot: 10 min; magenta: 30 min)*

Simuliert man die Schaltung mit dem neuen Modell des Restladegrades, so erkennt man eine deutliche Verbesserung in Bezug auf die Übereinstimmung von realem und simuliertem Klemmenspannungsverlauf. Das Ergebnis zeigt **Abb. 4.14**.

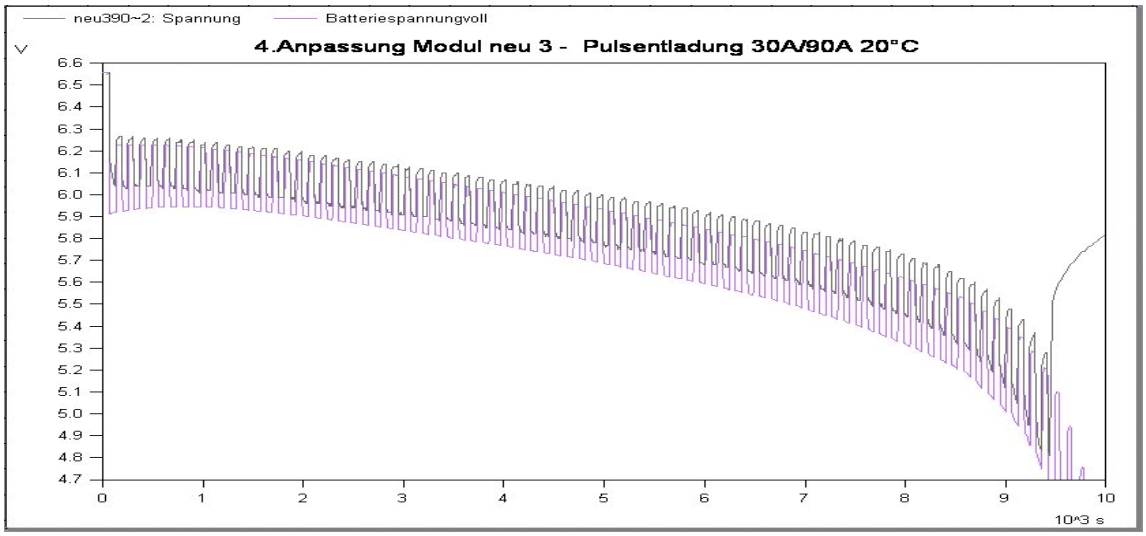


***Abb. 4.14**: Simulationsergebnis Pulsentladung (sw: Messung, ma: Simulation*

Das Simulationsergebnis ist in Bezug auf die Bestimmung des Entladeschlusses sehr brauchbar, beim Klemmenspannungsverlauf müssen Abstriche gemacht werden. Hier ist eine Überbewertung des transienten Innenwiderstandes festzustellen. Ziel der Optimierungen des Modells war eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen Simulation und realem Verhalten bei beliebigen Entladestromverläufen, so dass eine Einzelanpassung nicht zulässig ist. Nachfolgend wurden weitere Pulsmuster in die Simulation eingespeist, der Vergleich zwischen Messung und Simulation (**Abb. 4.15**) zeigt auch hier wieder eine brauchbare Übereinstimmung zwischen beiden Verläufen bezüglich der Bestimmung des Entladeschlusses (Zeitabweichung 2 % der Entladedauer).

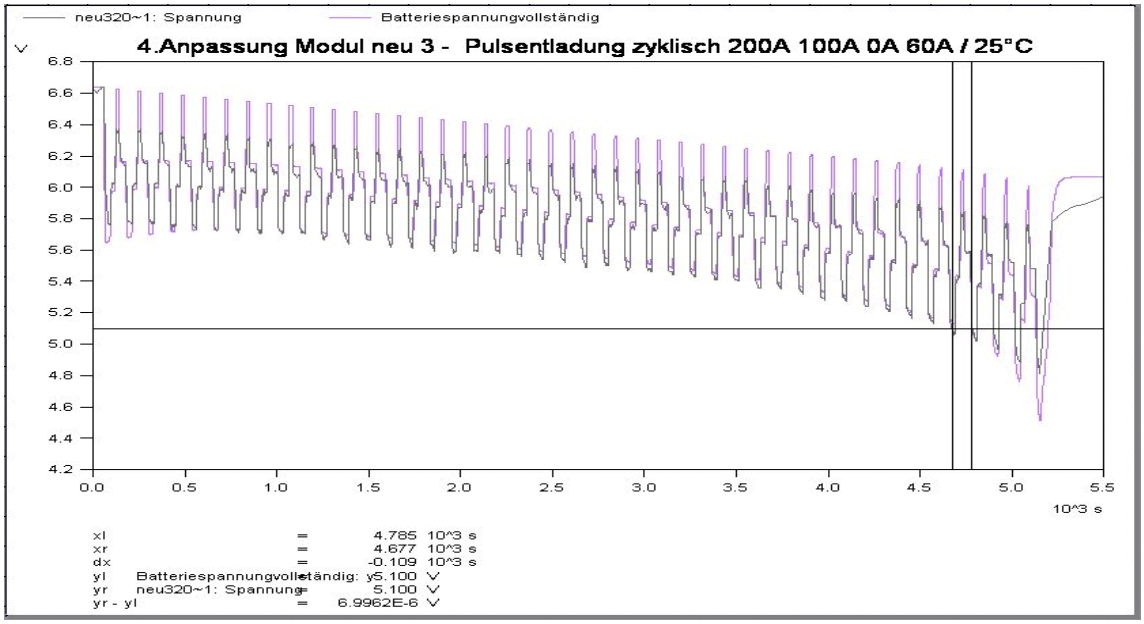


***Abb. 4.15**: Simulation mit einem 4-stufigen Pulsmuster (sw: Messung; ma: Simulation)*

Bei der Bewertung der Simulationsergebnisse muss beachtet werden, dass die relativ guten Übereinstimmungen immer voraussetzen, dass jedes Modul an das Modell angepasst wurde. Dafür waren umfangreiche Messungen unter Laborbedingungen notwendig. Erschwerend kommt hinzu, dass die Gültigkeit der ermittelten Modellparameter nur bei ca. 25 Zyklen liegt. Auch längere Standzeiten oder vorzeitige Alterung bedingende Betriebsbedingungen wirken sich nachteilig auf die Stabilität der Modellparameter aus. Das Verfahren ist demnach wenig praxisgerecht, der Adaptionsalgorithmus stellt jedoch die Basis für die Entwicklung des Verfahrens im Abschnitt 4.4 dar.

4.4 Fuzzy Methoden zur Ladezustandsbestimmung

An dieser Stelle wird ein Verfahren vorgestellt, mit dessen Hilfe mit minimalem Rechenaufwand im Fahrzeug während des Betriebes der SOC bestimmt werden soll. Dieses Verfahren muss einfach auf einem Microcontrollersystem implementierbar sein und dabei zuverlässige Aussagen über den momentanen SOC der Antriebsbatterie liefern. Im Gegensatz zum Modellierungsansatz nach Gretsch sollen keine Aussagen über die Klemmenspannung gemacht werden, vielmehr soll die noch entnehmbare Ladung der Batterie vorherbestimmt werden. Gerade diese Vorherbestimmung der noch entnehmbaren Ladung, bzw. weitergedacht der noch erzielbaren Reichweite, ist natürlich nicht aus den zum Zeitpunkt t_{best} zurückliegenden Werten möglich, sondern hängt entscheidend von den ab dem Zeitpunkt t_{best} bis zum Entladeschluß t_{end} zu nutzenden Lastprofilen ab. Gerade beim Elektrostraßenfahrzeug bedeutet das, dass die noch erzielbare Reichweite von der bisherigen und der zukünftigen Fahrweise abhängt. Schon beim verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeug weichen die Anzeigen des Bordcomputers bei einer sprunghaften Änderung des Fahrstils erheblich von den dann gültigen tatsächlichen Werten ab. Dabei ist zu beachten, dass die Reichweite beim verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeug erheblich weniger fahrstilabhängigen Schwankungen unterliegt als beim Elektrofahrzeug. Anschaulich gesprochen entspricht die pro Zeiteinheit oder Streckenabschnitt entnommene Ladung dem Benzinverbrauch. Erschwerend kommt beim batteriebetriebenen Elektrofahrzeug jedoch hinzu, dass im Gegensatz zum Benzintank bei unwirtschaftlicher Fahrweise nicht die gesamte eingespeicherte Energie entnommen werden kann. Daraus abgeleitet kann es sich faktisch bei, wie auch immer, bestimmten Werten des SOC niemals um eine Ladezustandsbestimmung im eigentlichen Sinn des Wortes handeln. Vielmehr wird immer nur eine Ladezustandsvorhersage prognostiziert, die, ähnlich einer Wettervorhersage, unter der Annahme bestimmter Voraussetzungen für den zeitlichen Verlauf der Systemeingänge gültig ist. Mathematisch lässt sich ein Modell für eine solche Prognose nur schwer aufstellen. Über eine auf Erfahrungen basierende Wissensbasis kann ein erfahrener Fahrer jedoch den momentanen Ladezustand relativ genau abschätzen. Ein auf Fuzzy-Logic basierendes System zur Bestimmung des SOC bietet sich zur Umsetzung dieser Denkansätze förmlich an.

4.4.1 Erforderliche Wissensbasis

Im Prinzip basiert das Fuzzy-SOC-meter auf den Messreihen, die bereits im Abschnitt 4.3 zur Anpassung des PSPICE Modells an die Fahrzeugbatterien vom Typ Sonnenschein 6 V/160 Ah genutzt wurden. Ausgewertet werden Konstantstromentladungen mit den variablen Entladeparametern Entladestromstärke und Batterietemperatur.

Das Prinzip des SOC-meters sieht so aus, dass aus den variablen Eingangsgrößen Entladestrom und Batterietemperatur der Restladegrad der Batterie ermittelt wird. Das SOC-meter rechnet über eine Ladungsbilanzierung die der Batterie entnommene Ladung Q_{max} aus und setzt diese der aus der Bestimmung des Restladegrades ermittelten entnehmbaren Ladungsmenge Q_{entmax} ins Verhältnis.

Der erste Schritt zur Entwicklung eines Fuzzy-SOC-meters ist also die Beschränkung auf Konstantstromentladungen. In Abb. 4.9 wurde der Restladegrad für Entladeströmen von 10 A, 30 A, 60 A, 100 A, 150 A und 200 A und jeweils Temperaturen von 0 ˚C, 20 ˚C und 40 ˚C bestimmt.

4.4.2 Umsetzung

Nach diesem Prinzip werden zwei linguistische Variable mit den Namen ‘disCurrent’ und ‘batTemp’ definiert, wobei ‘disCurrent’ durch sechs Fuzzy-Sets und ‘batTemp’ durch drei Fuzzy-Sets repräsentiert wird. Die unterschiedliche Anzahl der Fuzzy-Sets erklärt sich aus den absoluten Streuungen des Restladegrades bei der Variation eines der Parameter. Die Definition der beiden linguistischen Eingangsvariablen zur Bestimmung des Restladegrades zeigt die nachfolgende **Abb. 4.16**.

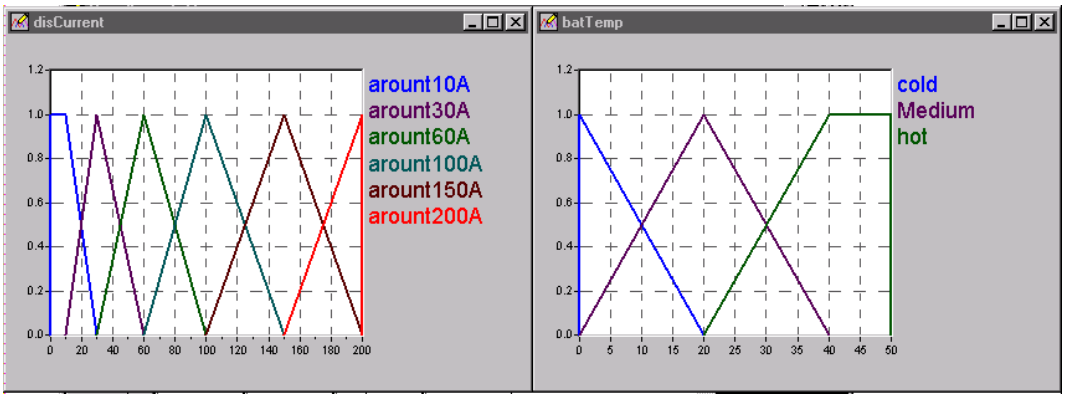


Abb. 4.16: *Fuzzy-Sets der linguistischen Eingangsvariablen ‘disCurrent’ und ‘batTemp’ zur Bestimmung des Restladegrades*

Als Ausgangsgröße des Fuzzysystems wird der Restladegrad der Batterie in Abhängigkeit der Eingangsgrößen bestimmt (**Abb. 4.17**). Die linguistische Ausgangsvariable Restladegrad wird aus Singletons definiert. Dadurch kann nach der Höhenmethode defuzzifiziert werden, was den

geringsten Rechenaufwand erfordert und doch Ergebnisse liefert, die in etwa der Defuzzifizierung nach der ‘Center-of-Maximum’-Methode entsprechen.

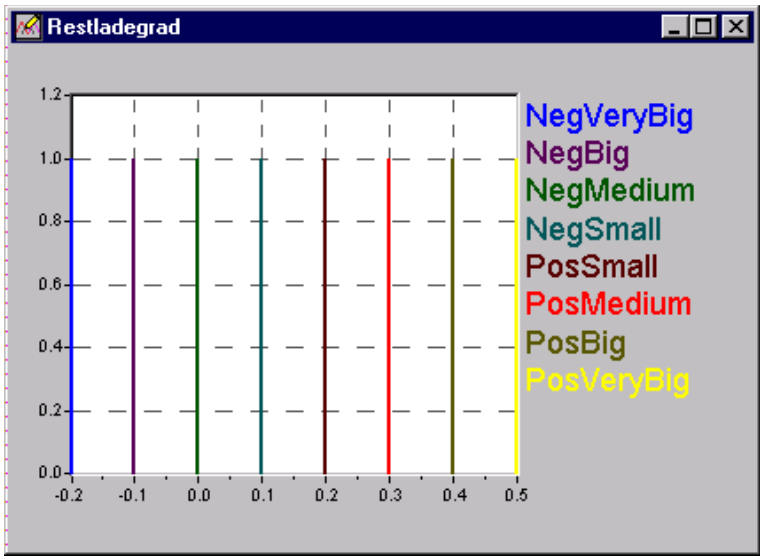


Abb. 4.17: *Fuzzy-Sets der Ausgangsvariable ‘Restladegrad’ als Singletons*

Der Wertebereich der Ausgangsvariablen erklärt sich aus den zur Bestimmung des Batterieverhaltens gewonnenen Messwerten. Der negative Restladegrad wurde bei der Entladung mit sehr kleinen Strömen bei hoher Temperatur erzielt. Das bedeutet, dass die Entladung unter diesen Bedingungen eine entnehmbare Kapazität größer der Nennkapazität erbracht hat.

Die eigentliche Intelligenz des SOC-meters liegt in der Regelbasis, die aus den Erfahrungen der Laborentladungen generiert wurde. Es handelt sich um die gleichen Messungen, die bereits zur Bestimmung des Restladegrades im PSPICE-Modell geführt haben. Die Simulation des Fuzzy-Systems führt zu dem in **Abb. 4.18** dargestellten Kennfeld. Der Vorteil des Fuzzy-Systems gegenüber mathematischen Modellen liegt darin, dass alle Parameter einzeln in Tabellen abgelegt werden und bei Alterung ebenfalls einzeln angepasst werden können. Jede Adaption beeinflusst dabei das Kennfeld, dabei jedoch vornehmlich die gerade adaptierten Abschnitte.

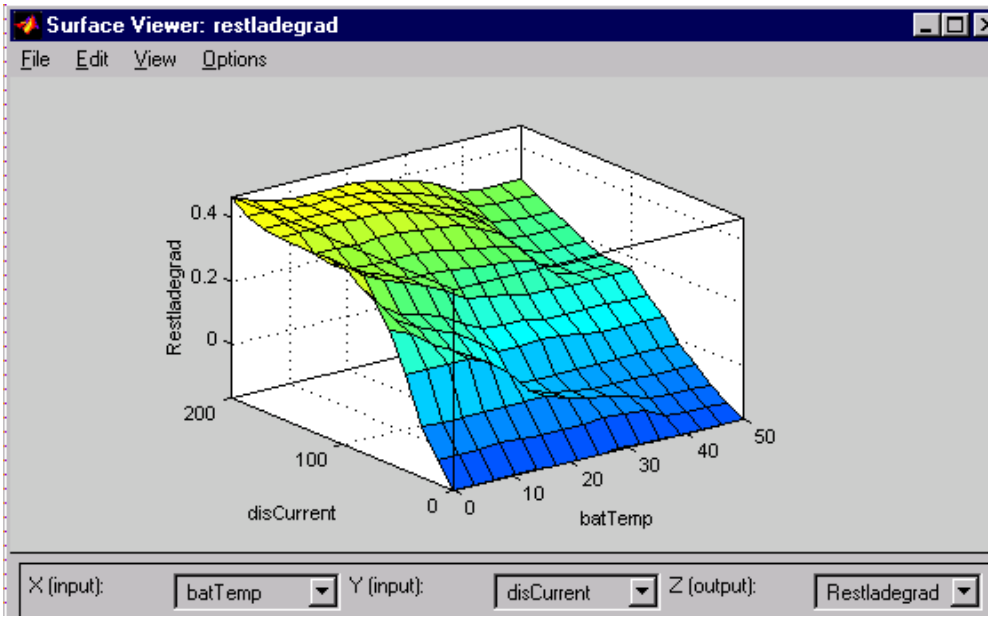


***Abb. 4.18**: Matlab-Simulation des Fuzzy-Systems zur Restladegradbestimmung mit einer Systemdefinition aus Labormessungen*

Der SOC wird über die Verbindung von Ladungsbilanzierung und Restladegradbestimmung ermittelt. Über die bei einer vollständigen Entladung der Batterie tatsächlich bis zur Abregelung des Stromes entnehmbare Ladungsmenge werden die Zugehörigkeitsfunktionen der Ausgangsvariablen und die Regelbasis nach jedem Vollzyklus angepasst, so dass es sich um ein adaptives Fuzzy-System handelt.

Bezüglich der Verwendung von Modellierungsansätzen kann grundsätzlich festgestellt werden, dass alle Modelle eine ständige Adaptierung auf Modulebene verlangen. Dem Modellansatz von Gretsch gelingt es das elektrische Betriebsverhalten in die Elemente des Ersatzschaltbildes zu überführen. Zur Ladezustandsbestimmung besonders wertvoll ist die im Modell implementierte Bestimmung des Restladegrades. Über einen längeren Zeitraum in Fahrzyklen erzielte Restladegrade können zur Bestimmung des SOH herangezogen werden. Bei den im Traktionsbetrieb auftretenden Strömen kann das im Rahmen dieser Arbeit adaptierte Modell mit gemittelten Entladeströmen gespeist werden und liefert brauchbare Ergebnisse. Die Ladegradabhängigkeit der Elemente der Ersatzschaltung konnte aus Messungen zuverlässig bestimmt werden.
Je mehr elektrochemische Prozesse in irgendeiner Form quantisierbar sind, desto genauer kann man über Ladungsbilanzierungsverfahren zu brauchbaren Ergebnissen der Kenntnis des Ladezustandes oder der genauen Ladezustandsanzeige kommen. Im Kapitel 5 wird zusätzlich ein weiteres Verfahren beschrieben, mit dem im Fahrbetrieb eine Rekalibrierung des Ladezustands erreicht wird.

5 Realisierung von Batteriemanagementsystemen für Blei-Gel Batterien

In diesem Kapitel werden die Entwicklungen zweier im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Batteriemanagementsysteme beschrieben. Es handelt sich als Basis um ein BMS, welches für ein Fahrzeug vom Typ VW Golf CitySTROMer Typ A2 entwickelt wurde. Auf diesen Erfahrungen aufbauend wurde ein neues BMS entwickelt, welches in einem Elektroleichtfahrzeug vom Typ CITYCOM CityEL Einsatz findet. Beide Fahrzeuge weisen eine unterschiedliche Struktur und Philosophie auf, so dass für beide Traktionsanwendungen unterschiedliche elektronische Komponenten entwickelt werden mussten.

5.1 Batteriemanagementsystem für VW Golf CitySTROMer A2

Beim CitySTROMer handelt es sich um ein Fahrzeug im so genannten conversion-design. Dabei handelt es sich um Fahrzeuge, die eigentlich für den Antrieb mit einem Verbrennungsmotor konzipiert und dann zum Elektrofahrzeug umgerüstet wurden. Bei der Konversion kann auf bewährte Strukturen bezüglich der Sicherheit, Zuverlässigkeit und Service zurückgegriffen werden. Problematisch ist jeweils die Unterbringung der Batterien, denn auch bei im Crashfall auftretenden maximalen Verzögerungen muss die Sicherheit der Passagiere gewährleistet sein. Konversionsfahrzeuge weisen in der Regel Einschränkungen bezüglich des Platzangebotes und der Zuladung auf, da die schwere Batterie deutlich mehr Raum einnimmt als der Tank des Serienfahrzeugs. Die Konzepte konnten sich aufgrund der eingeschränkten Fahrleistungen (Beschleunigung, Reichweite und Höchstgeschwindigkeit) nie gegenüber dem verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeug durchsetzen.

5.1.1 Grundkonzept des Fahrzeugs

Es handelt sich bei dem Fahrzeug um einen hervorragenden Versuchsträger, an dem das Batterieverhalten einer relativ großen Traktionsbatterie untersucht und unterschiedliche Strategien des Batteriemanagements experimentell ausgewertet werden können. Das Fahrzeug verfügt über die Möglichkeit der Rekuperation und hat ein Temperaturausgleichssystem integriert. Das hohe Fahrzeuggewicht von ungefähr eineinhalb Tonnen in Verbindung mit einem Antrieb von 23 kW Dauerlast brachte dem Fahrzeug allerdings insgesamt Fahrleistungen, die weit entfernt von dem lagen, was Anfang/Mitte der 90er Jahre vom Markt gefordert wurde. Die technischen Daten des Fahrzeugs fasst [Wab98] zusammen (**Abb. 5.1**).

	A2 Serienfahrzeug Bj. 92	**optimierter A2** Bj. 94	**A3 Serienfahrzeug** Bj. 95
Elektromotor	**Gleichstromnebenschlußmotor** P_N = 12 kW; luftgekühlt;	P_{max} = 23 kW m = 76,5 kg	**Permanenterregter Synchronmotor** P_N = 17,5 kW; P_{max} = 21 kW wassergekühlt; m = 39 kg
Traktions-batterien (Blei-Gel)	96 V / 160 Ah_{c5} m = 480 kg Unterbringung: Fahrzeugboden im Heck	102 V / 160 Ah_{c5} m = 510 kg Unterbringung: Fahrzeugboden im Heck	96 V / 160 Ah_{c5} m = 480 kg; Unterbringung: 10 Module Fahrzeugboden im Heck 6 Module im Motorraum
Fahrzeuggewicht (inkl. Batterie)	**1410 kg**	**1440 kg**	**1514 kg**

***Abb. 5.1**: Technische Daten des VW Golf CitySTROMer A2 nach [Wab98]*

Das Fahrzeug verfügt über 16 in Reihe geschaltete Blei-Gel-Batterien des Typs Sonnenschein dryfit 6 V/ 160 Ah. Diese sind in zwei Batterietrögen (zehn Batterien unter dem Kofferraum und sechs unter der Rücksitzbank) untergebracht (**Abb. 3.31**). Im Fahrbetrieb konnten mit neuen Batterien ungefähr 120 Ah entnommen werden. Alte Batterien erbrachten nur noch eine entnehmbare Ladung von ca. 70 Ah. Der Energieverbrauch des Fahrzeugs ist extrem abhängig von der Fahrweise und schwankt zwischen 0,2 und 0,6 kWh/km [Loh98]. [FfE06] geben einen Netzenergieverbrauch von durchschnittlich 270 Wh/km (+2100Wh) an, der sich im gesamten Strang nach **Abb. 5.2** aufteilt.

Das Fahrzeug wurde von VW werksseitig mit aus heutiger Sicht rudimentären Elementen eines Batteriemanagements ausgestattet, damals entsprach das aber durchaus dem Stand der Technik. Die Gesamtspannung wurde von der Antriebssteuerung überwacht und auf der Basis dieses Wertes wurde eine Abregelung des Fahrstromes durchgeführt. Von RWE wurde ein Temperaturausgleichssystem entwickelt und in das Fahrzeug eingebaut. Mit Hilfe dieses Temperaturausgleichssystems konnte die maximaleTemperaturdifferenz der einzelnen Module während der Fahrzyklen jeweils unter 4 K gehalten werden.

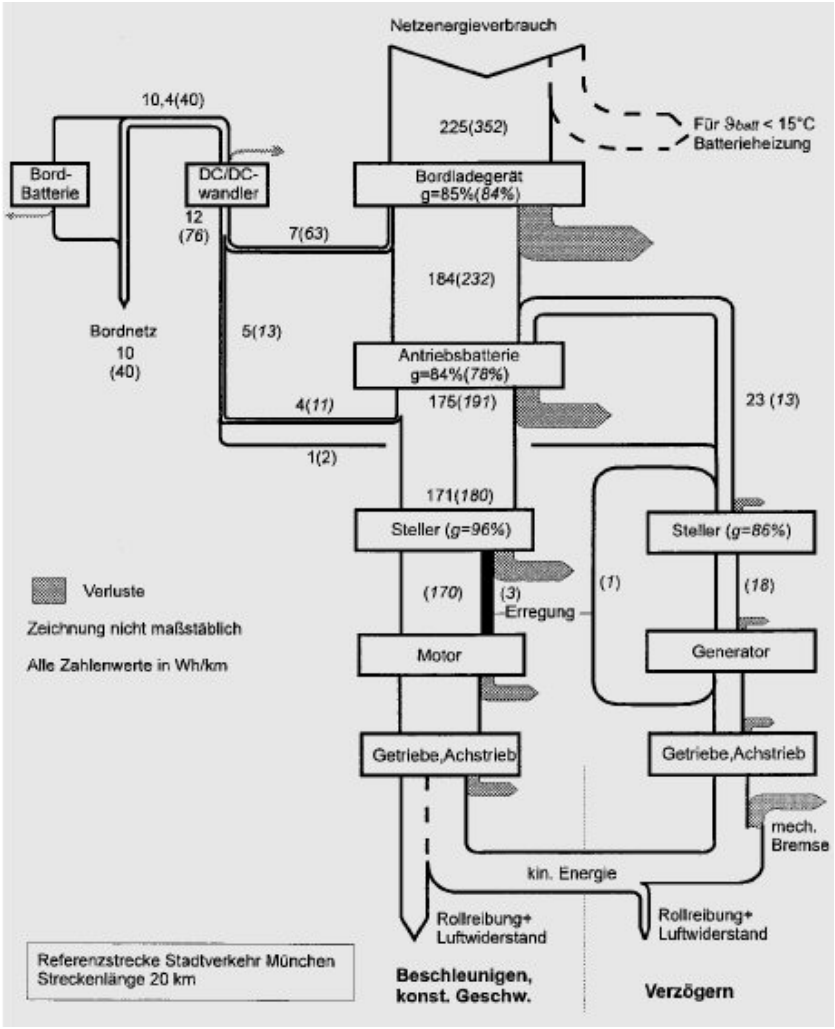


***Abb. 5.2**: Energieflüsse im Golf CitySTROMer A2 nach [Wab98]*

Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung eines Batteriemanagementsystems, welches die vorhandenen Nachteile des Seriensystems aufhebt und zu einer deutlichen Lebensdauerverlängerung der Antriebsbatterie führen kann. Dabei werden alle Serienkomponenten beibehalten, es wurden Eingriffe zum Überladeschutz und Tiefentladeschutz realisiert. Weiterhin können Zyklusdaten zur Auswertung des Batterieverhaltens mitgeschrieben werden und nach jedem Zyklus auf einen Diagnoserechner übertragen werden. Die Diagnosedaten können genutzt werden, um über einen Teststand einzelne Module oder Gruppen von Modulen im Rahmen der Weiterentwicklung des BMS mit realen Fahrdaten zu zyklieren [Pet98]. **Abb. 5.3** zeigt einen typischen Entladezyklus, wie er im CitySTROMer im innerstädtischen Verkehr aufgezeichnet werden kann. Die Traktionsbatterie war zum Beginn der Messreihe bereits teilentladen.

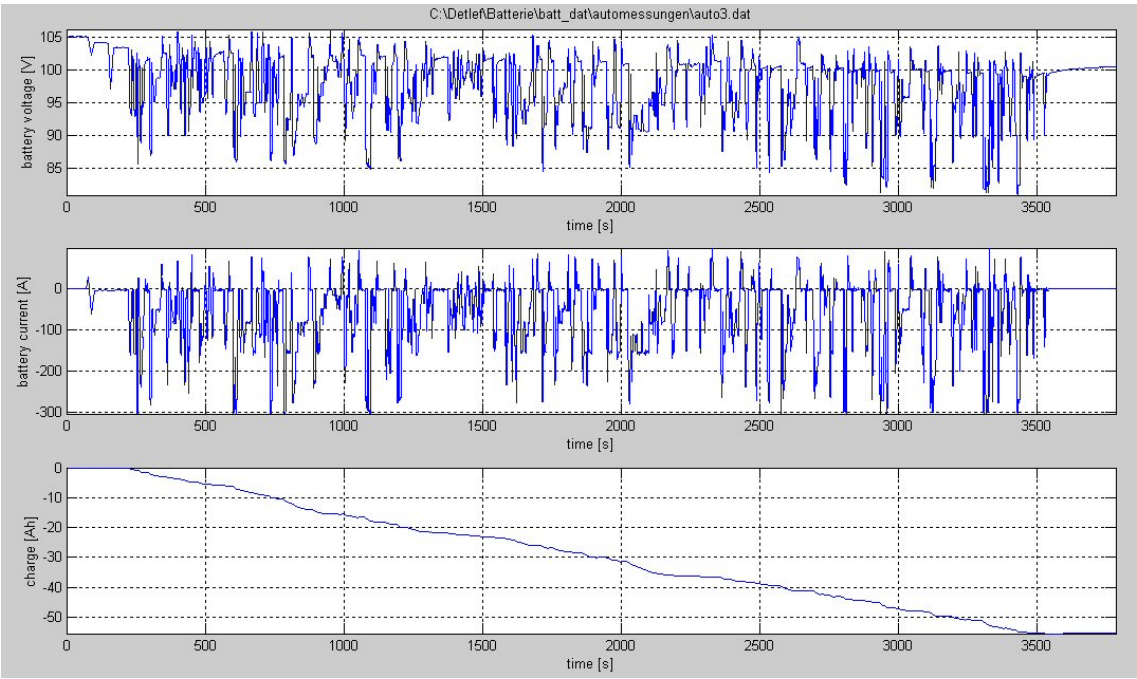


***Abb. 5.3**: Innerstädtischer Fahrzyklus mit teilentladener Batterie bis zum Entladeschluß [eigene Messung]*

5.1.2 Funktionsprinzip

Sämtliche Modulspannungen, der Strom und sechs Temperaturen der Traktionsbatterie werden während des Fahrbetriebes permanent mit einer Messrate von einer Messung pro Sekunde überwacht. Messungen im Sekundentakt ergeben eine hohe Genauigkeit und produzieren eine bei zweistündiger Entladung noch handhabbare Datenmenge pro Fahrzyklus. Während der Ladung wird nur alle 10s ein Messwertsatz abgespeichert.

Das Steuergerät ist mit einem Mikrocontroller des Typs 80C167CR realisiert. Messdaten werden im batteriegepufferten RAM der Kapazität 128 KB gespeichert. Volle Segmente à 16 KB werden in einen Flashspeicher geschrieben, so dass die gesamten Zyklusdaten nichtflüchtig im Gerät gehalten werden. Aktuelle Batteriedaten werden im Klartext in ein LC-Display geschrieben und können dort im Textmodus oder im Graphikmodus visualisiert werden. Das

Steuergerät kommuniziert mit den angeschlossenen Sensormodulen.

5.1.3 Systemstruktur

Die einzelnen Module dieses Systems wurden nach logischen Gesichtspunkten entwickelt. Grundgedanke ist der, dass die Messdatenerfassung räumlich immer möglichst nahe an den Signalen positioniert wird. Der CAN-Bus dient als Transportmedium zur Data Logger and Control Unit (DLCU), die der Systemmaster ist und in der Nähe des Armaturenbrettes in Sichtweite des Fahrers angebracht ist. Der CAN-Bus wurde als Bussystem gewählt, weil er im Automobil etabliert ist und das BMS somit kostengünstig in bestehende Fahrzeugarchitekturen integriert werden kann. Sähe man das BMS eher stand-alone, so wie es bis Anfang 2000 oft als add-on zur Batterie gesehen wurde, so könnte man auch LIN oder den SMBus [Int95] mit dem aufgesetzen Smart-Battery-Standard als Kommunikationskanal nutzen.

Den Aufbau des Gesamtsystems zeigt **Abb. 5.4**.

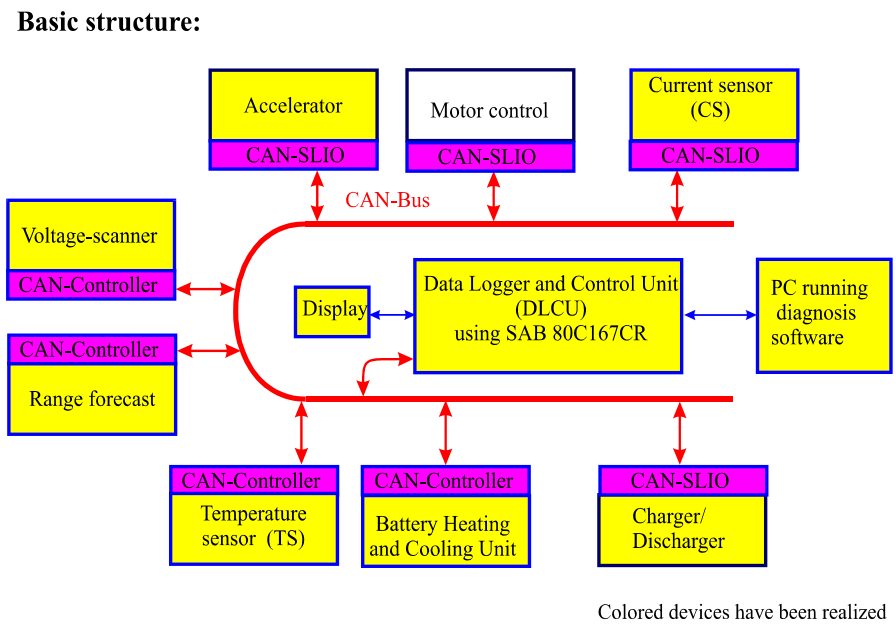


***Abb. 5.4**: Prinzipielle Struktur des Batteriemanagementsystems BattMobil3 für Pb-Gel Batterien*

Die DLCU ist in der Lage Steuerungsfunktionen zu übernehmen und Messdaten aufzuzeichnen. Über eine Diagnoseschnittstelle können die gespeicherten Daten zur Visualisierung und Analyse zu einem Diagnose-PC übertragen werden.

Die Anforderungen an das BMS und die zur Umsetzung der Aufgaben notwendigen Sensoren und Aktuatoren fasst **Tab. 5.1** zusammen.

Tab. 5.1: *Aufgaben des Batteriemanagements sowie zugeordnete Aktoren und Sensoren*

Aufgabe	**Sensor**	**Aktuator**
Schutz gegen Überladung	*Spannungserfassung, Stromerfassung, Temperaturmodul*	*Charger, Bypass*
Tiefentladeschutz	*Spannungserfassung , Stromerfassung, Temperaturmodul*	*Motor-control*
Betriebstemperaturregelung	*Temperaturmodul*	*Batterieheizung und -kühlung*
Temperaturausgleich	*Temperaturmodul*	*Temperaturausgleichseinheit*
Fahrerinformation	*Spannungserfassung, Stromerfassung, Temperaturmodul, SOC-meter, range forecast*	*Display*
Batteriediagnose	*Spannungserfassung, Stromerfassung, Temperaturmodul*	*Display,PC-basierte Diagnosesoftware, SOC-meter Range forecast*

Andere Systeme dezentraler Struktur gliedern sich physikalisch nach Batteriemodulen, so erhält dann jedes Batteriemodul ein Messmodul, welches jeweils Spannung und Temperatur messen kann. Beide Varianten haben ihre Vor- und Nachteile. Letztgenannte sind insbesondere für NiMH Batterien sinnvoll, da die Batterie dort aus Modulen zusammen gesetzt ist, die wiederum aufgrund der geringen Spannungslage des NiMH-Systems aus einer Vielzahl von Zellen bestehen.

5.1.4 Hardwarekomponenten Batteriemanagementsystem für VW Golf City-STROMer A2

Spannungserfassung

Der Spannungs-Scanner kann bis zu 24 Modulspannungen gleichzeitig über Sample-and-Hold glieder (S&H) erfassen. Die Kapazitäten der S&H sind als Kapazitätsnetzwerk beschaltet. Über Analogschalter werden alle Kapazitäten zeitgleich an das ihnen zugeordnete Batteriemodul geschaltet, über einen hochohmigen Widerstand auf die jeweilige Modulspannung aufgeladen und dann wieder von der Batterieseite getrennt. Sequentiell werden die einzelnen Kapazitäten anschließend über ein nachgeschaltetes Analogschalternetz auf den externen AD-Wandler geführt. Dieser wandelt mit einer Auflösung von 12 Bit, so dass bei 6 V Modulen eine Genauigkeit von ± 5 mV erreichbar ist. Der komplette Messzyklus benötigt ca. 0,5 s.

Der Wandler hat einen seriellen Ausgang, der vom 8-Bit Microcontroller gelesen wird. Die Aufgabe des Controllers ist die Steuerung des S&H-Gliedes, das Schalten des Analogschalter-Netzwerkes, die Veranlassung der AD-Umsetzung, das Auslesen des Wandlungsergebnisses und die Versendung der Daten über den CAN-Bus mit einer Übertragungsgeschwindigkeit von 125 kBaud. Die galvanische Trennung zwischen Traktionsbatterie und 12 V-Netz wird über Optokoppler in der synchronen seriellen Schnittstelle zwischen AD-Wandler und Microcontroller hergestellt. Das Prinzip des Spannungsscanners zeigt **Abb. 5.5**.

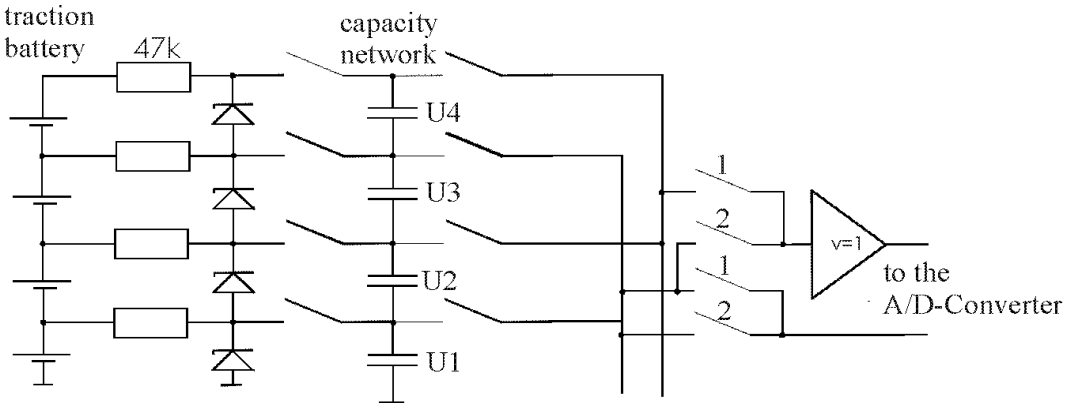


Abb. 5.5: *Prinzip der Datenerfassung des Voltage-Scanners (traktionsseitig)*

Der 47 kΩ Ladewiderstand dient gleichzeitig als Sicherungsersatz. Dimensioniert man diesen Widerstand niederohmiger, so lassen sich höhere Messraten erzielen, da die S&H-Kapazitäten schneller aufgeladen werden.

Die Hauptvorteile des Voltage-Scanners sind:

- jedes Modul kann separat gemessen werden,
- alle Modulspannungen werden unter den gleichen Lastbedingungen ermittelt,
- die Ergebnisse der Messungen sind direkt miteinander vergleichbar (im Gegensatz zu sequentiellen Messverfahren).

Nachteilig wirken sich der hohe Bauteileaufwand und die geringe Abtastfrequenz aus. Das Analogmodul des Spannungsscanners zeigt **Abb. 5.6**.

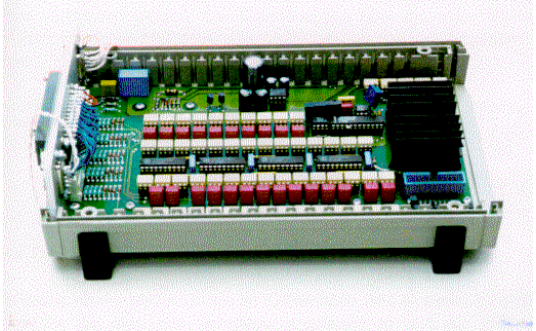


Abb. 5.6: *Analogmodul des Voltage-Scanners*

Stromerfassung

Der Stromsensor basiert auf einem LEM-Wandler. Die notwendige symmetrische Versorgung des Wandlers von +/- 12 V wird über einen DC-DC Wandler aus der Traktionsspannung erzeugt. Vor der Wandlung wird das Signal gefiltert. Das analoge Ausgangssignal des Stromsensors wird auf einen Analogeingang eines CAN-basierten SLIO-Moduls geschaltet. Dieses wandelt den Strom bei einer extern in Form einer CAN Nachricht von der DLCU kommenden Anforderung. Es können während der Entladung Ströme im Bereich von -400 A bis +100 A mit einer Auflösung von 10 Bit gewandelt werden. Das entspricht einer Auflösung von ungefähr 0,5 A. Während der Ladung der Batterien wird der Messbereich umgeschaltet, dann sind Ströme von -10 A bis 50 A erfassbar. Die Auflösung bei der 10 Bit Wandlung beträgt dann 58 mA.

Temperaturmodul

Das Temperaturmodul kann bis zu 6 unterschiedliche Temperaturen erfassen. Zwei CAN-SLIO erfassen die Temperaturen und senden sie zur DLCU über den CAN-Bus. Der Temperaturbereich wurde von -20 ˚C bis +80 ˚C gewählt. Die Auflösung des AD-Wandlers mit sechs gemultiplexten Eingängen beträgt 0,1 ˚C/Schritt. Im Batterietrog unter dem Kofferraum sind drei Temperatursensoren verteilt, im Trog unter der Rücksitzbank zwei, ein Sensor ist am hinteren Trog angeschlossen, aber nach außen unter das Fahrzeug geführt. Er dient zur Bestimmung der Umgebungstemperatur. Die CAN-SLIO Module sind passive CAN-IO-Devices von Philips. Sie werden über den CAN-Bus parametriert und haben keinen eigenen Oszillator. Synchronisiert werden sie über ein Synchronisationstelegramm, welches alle 100 ms vom Steuergerät gesendet wird.

Die Batterietröge sind prinzipiell komplett gefüllt. Zwischen den einzelnen Batteriemodulen befinden sich die Elemente des Temperaturausgleichsystems. Die Sensoren werden in die Zwischenräume eingeführt, auf eine direkte thermische Kopplung an die Batteriemodule wird verzichtet. Es wird quasi am Übergang zwischen Batteriegehäuse und Wassertasche gemessen.

Ladungsausgleich

Zum Schutz vor Überladung bzw. zum Ladungsausgleich zwischen den einzelnen Modulen wurde eine sogenannte Bypass Schaltung nach **Abb. 5.7** entworfen . Dieser Bypass ist ein über einen Kontakt zu jedem Modul parallelschaltbarer Widerstand. Durch den Bypass kann zum Beispiel beim Laden an den ‘volleren’ Modulen ein Teil des Stromes vorbeigeleitet werden. Die noch nicht vollen Module können dann weiterhin geladen werden.

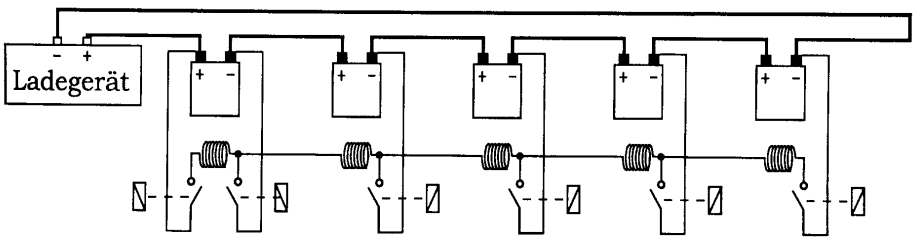


***Abb. 5.7**: Bypass-Schaltung zum Ladungsausgleich [Rei98]*

Die Auslegung dieses Widerstandes ist von der programmierten Steuerungsphilosophie abhängig. Der Bypass ist nur im Ladebetrieb aktiv, deshalb wird der Widerstand relativ niederohmig ausgelegt. Der realisierte Bypass arbeitet mit einem Strom von 2 A. Wird dieser 'Ladungsausgleich' durchgängig ausgeführt, so reichen bereits Ströme über den Bypass im mA-Bereich, um einen guten Ausgleich zu erhalten. Damit können unterschiedliche Ladezustände über längere Zeiträume während der Ladung oder während des IDLE-Zustandes zufriedenstellend ausgeglichen werden. Während der Fahrt können unterschiedliche entnehmbare Ladungsmengen (z.B. aufgrund unterschiedlicher Modultemperaturen) in dieser Realisierung nicht ausgeglichen werden. Einen Ausgleichsvorgang während der Ladung zeigt **Abb. 5.8**.

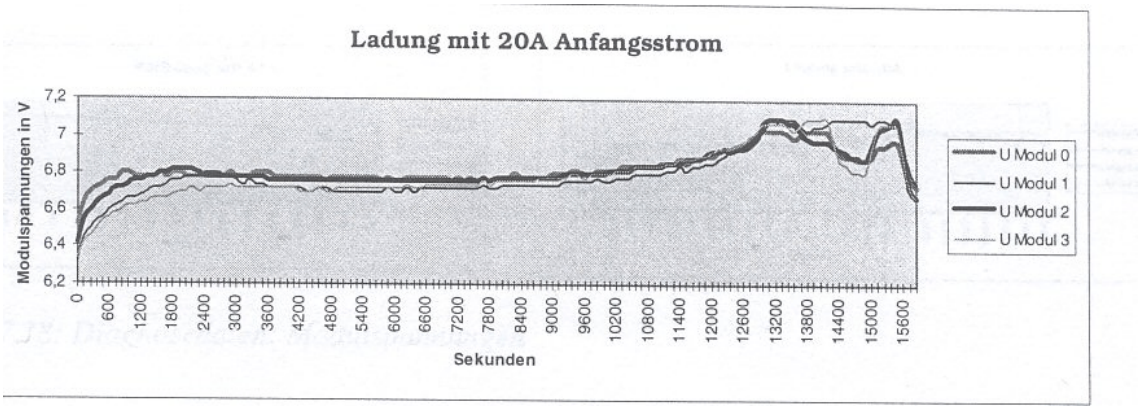


***Abb. 5.8**: Aktiver Bypass zum Ladeende mit einem Bypass-Strom von 2A [Rei97]*

Modul 2 erreicht in diesem Fall als erstes Modul die Gasungsspannung. Da die anderen Modulspannungen aufgrund der Absenkung des Ladestromes abfallen, wird bei diesem Modul der Bypass aktiviert. Nacheinander werden jeweils die Bypass Schaltungen aktiviert, deren zugeordnetes Batteriemodul die Gasungsspannung erreicht. Ist der Fall erreicht, dass alle Module mit aktiviertem Bypass arbeiten, dann werden alle Bypass-Schaltungen deaktiviert und der Strom wird abgeregelt. Bei zu großen Ladungsunterschieden kann es passieren, dass auch ein Modul mit aktivem Bypass bereits dann die Gasungsspannung wieder erreicht, wenn andere Module noch nicht überbrückt sind. In diesem Fall wird der Strom anhand dieses Moduls geregelt. Dieses Verfahren kann prinzipiell auch für Lithium-Ionen Batterien genutzt werden, für Nickel-Systeme ist es aufgrund der Ladekennlinie nicht sicher implementierbar.

Abb. 5.9 zeigt einen Ausschnitt dreier Modulspannungsreihen aus einem Fahrzyklus innerhalb

Berlins mit relativ alten Batterien mit über acht Zyklen abgeschaltetem Ladungsausgleich. Es ist deutlich zu erkennen, dass die drei Module in ihrer Spannungslage nicht mehr symmetriert sind. Das grüne Modul Nr. 9 hat sowohl unter Last als auch während der Ruhephase eine höhere Modulspannung und damit einen höheren Ladezustand.

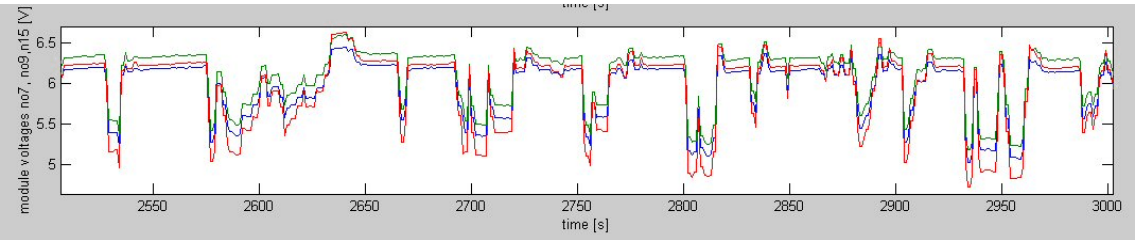


***Abb. 5.9**: Modulspannungsverläufe bei fehlender Symmetrierung der Batterien (rot: Modul 7, blau: Modul 9, grün: Modul 15)*

Wird die Ladung an diesem Modul geführt, dann werden die anderen Module nicht vollständig geladen. Lädt man an der Gesamtspannung orientiert, dann wird das grüne Modul frühzeitig in die Gasung getrieben. Mit der Wahl der Führungsgröße kann ohne Symmetrierung nur festgelegt werden, ob die kapazitätsschwachen Module oder die mit höherer Kapazität während der Ladung geschädigt werden. Die gleichen Überlegungen gelten für die Entladung.

Aktiviert man die Symmetrierung wieder, so erhält man nach 4 kompletten Zyklen (s. **Abb. 5.10**) wieder eine deutlich ausgeglichenere Gesamtbatterie .

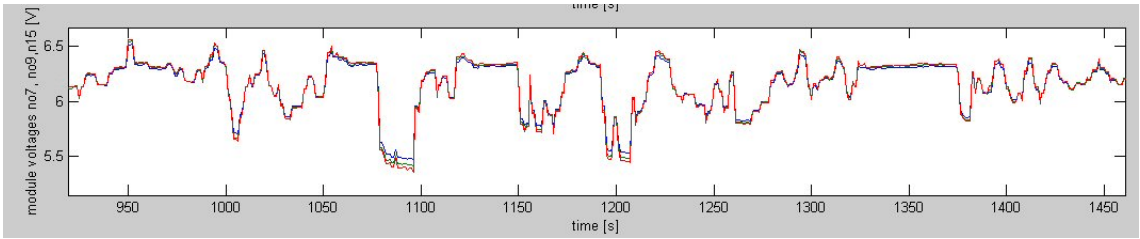


***Abb. 5.10**: Modulspannungsverläufe nach Symmetrierung im Ladeverfahren über vier Zyklen (rot: Modul 7, blau: Modul 9, grün: Modul 15)*

Signifikante Differenzen zwischen den Modulspannungen sind nur in Volllastphasen feststellbar. Das deutet auf einen höheren Innenwiderstand des roten Moduls bei gleichem Ladezustand hin.

Vermeidung der Tiefentladung

Der Tiefentladeschutz wird ebenfalls vom Batteriemanagement durchgeführt. Bricht die Spannung eines Moduls unter die Tiefentladegrenze zusammen, so wird automatisch der Fahrstrom begrenzt. Normalerweise gibt das Fahrpedal (Accelerator) einen der Auslenkung proportionalen Wert an die Motorsteuerung weiter. Diese Verbindung wurde aufgetrennt. Das BMS liest die Auslenkung des Fahrpedals und misst gleichzeitig die Modulspannungen und den Batteriestrom. Sind alle Modulspannungen oberhalb der Tiefentladegrenze, so gibt das BMS

den über einen gefilterten PWM-Ausgang erzeugten Analogwert unverändert an die Motorsteuerung weiter. Droht hingegen eine Tiefentladung, so verringert die DLCU den Stellwert an die Motorsteuerung auf für die Batterie unkritische Werte (**Abb. 3.4** [Rei97]). Das Fahrzeug kann somit mit begrenzter Leistung weiterhin betrieben werden. Über einen 'kick-down' kann die Strombegrenzung in Gefahrensituationen über das Fahrpedal aufgehoben werden.

Diese realisierte Art einer Fahrstrombegrenzung ist unabhängig vom verwendeten Antrieb und Batteriesystem. Im später erläuterten BMS des cityEL hat sich die Aufhebung der Strombegrenzung durch den kick-down bei Verwendung offener Bleibatterien als bedingt zielführend herausgestellt, da die Spannung bei niedrigem SOC beim Zulassen des maximalen Stromes so weit zusammenbricht, dass im Prinzip keine größere Leistung am Antrieb zur Verfügung steht.

Batterietemperierung

Die Batterieheizung funktioniert elektrisch und kann entweder aus dem Netz oder aus der Traktionsbatterie gespeist werden. Dabei hat die Netzspeisung Priorität gegenüber der Speisung aus der Traktionsbatterie. Die Batterieheizung kann zur Vortemperierung auf die Betriebstemperatur von 15˚C verwendet werden. Das verwendete Temperaturausgleichssystem entspricht dem in Abschnitt 3 vorgestellten Wärmetaschenprinzip. Es arbeitet über einen Wasserkreislauf, dessen Pumpe aus der Bordbatterie gespeist wird.

Fahrerinformation

Der Fahrer kann bestimmte Informationen auf einem vier-zeiligen LCD-Display anzeigen lassen. Alternativ existiert die Möglichkeit des Anschlusses eines Diagnosedisplays, auf dem entweder Daten im Textmodus oder Kurvenverläufe im Grafikmodus dargestellt werden können. Das Über- oder Unterschreiten bestimmter Batteriegrenzwerte löst neben der Anzeige im Display über einen Piezo-Summer einen akustischen Alarm aus. Standardmäßig werden ausgewählte Modulspannungen, der Fahrstrom, die Batterietemperatur und die berechnete Reichweite angezeigt (**Abb. 5.11**). Die Auswahl erfolgt über die Menütaster.

U_min: 5,96 V	Nr. 4
U_d: 5,99 V	C_R: 50Ah
TBat: 28˚C	TUm: 24˚C
RW: ca. 24 km	V=53 km/h

Textdisplay 4-zeilig

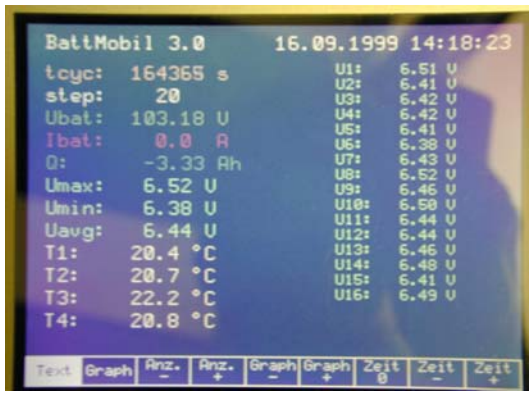


***Abb. 5.11**: Grafikdisplay im Textmodus*

Diagnosedaten

Die DLCU des BMS speichert sämtliche Modulspannungen, den Batteriestrom, die Batterie- und Umgebungstemperatur, die umgesetzte Ladung und die Betriebszeit in programmierbaren Intervallen. Darüber hinaus werden Statusmeldungen abgespeichert. Dazu gehören Tiefentladungen von Modulen mit hinterlegter Dauer, Intensität, Tiefe und Uhrzeit. Weiterhin nach dem gleichen Prinzip Überladungen, Aktivierungen des Ladungsausgleichsystems, oder das Verlassen des vorgeschriebenen Temperaturbereiches. Über einen PC lassen sich diese Betriebswerte graphisch visualisieren. Dazu existiert eine Software, die unter LabVIEW von National Instruments entwickelt wurde. Die zahlreichen Optionen zu erläutern würde den Rahmen dieser Ausarbeitung sprengen.

Das BMS kann aus den gesammelten Fahrdaten für einen Batterieteststand Zyklen generieren. Diese Zyklen entsprechen dann annähernd dem mit dem Fahrzeug zurückgelegten Streckenprofil. Diese Zyklen können auch am PC über ein Parametriertool komfortabel programmiert werden (**Abb. 5.12**). Somit können im Labor Messungen an einzelnen Batteriemodulen unter realistischen Fahrbedingungen durchgeführt werden. Diese Messungen sind unbedingt notwendig zum Test und zur Verbesserung von Batteriemanagementsystemen sowie zur Verbesserung der Reichweitenabschätzung.

Cycle Setup

* parameters to control:
- current
- voltage
- power
- module volts

* exit conditions
- current
- voltage
- temperature
- charge
- time
- delta-peak volts
- module volts
- no change time

* readings per minute

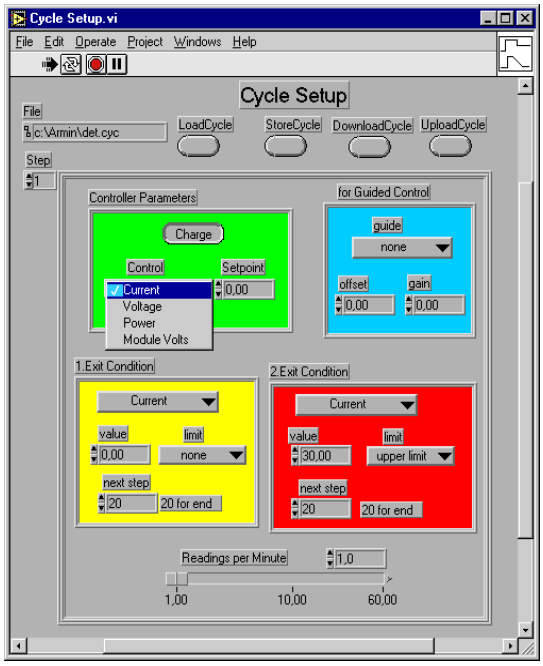


***Abb. 5.12**: Durch 'Cycle Setup' generierte Testzyklen für den Batterieteststand*

5.2 Batteriemanagementsystem für CITYCOM cityEL

Das cityEL (**Abb. 5.13**) ist ein Elektroleichtfahrzeug, welches vor über 15 Jahren ursprünglich in Dänemark entwickelt wurde.

***Abb. 5.13**: Versuchsfahrzeug Elektroleichtfahrzeug vom Typ cityEL*

Der Netzenergieverbrauch des eingesetzten Fahrzeugs liegt bei gemessenen ca. 75 Wh/km und damit deutlich unter dem des CitySTROMer A2. Der Batterie können dabei ca. 4,77 kWh/100 km entnommen werden, was einen Wirkungsgrad des Systems Ladegerät/Batterie von ungefähr 70 % bedeutet. Das Leergewicht des Fahrzeugs liegt bei 285 kg bei einem zulässigen Gesamtgewicht von 400 kg. Angetrieben wird das Fahrzeug über einen Reihenschlußmotor mit 3kW.

5.2.1 Struktur BMS cityEL

Das Fahrzeug ist deutlich einfacher aufgebaut als der VW, es steht weniger Platz zur Verfügung, alle Komponenten sind räumlich sehr nahe beisammen und die Traktionsbatterie besteht nur aus drei Modulen. Das Fahrzeug weist deutlich geringere Anschaffungskosten auf als der VW, das zu entwickelnde System muss all diesen Rahmenbedingungen angepasst sein. Alle Funktionalitäten sind in einem einzigen Steuergerät integriert. Von der benötigten Rechenleistung hätte ein moderner 8-Bit Mikrocontroller vollkommen ausgereicht. Da das System später aber zum Energiemanagementsystem für die Implementierung eines Ultracap erweitert werden sollte, wurde ein TriCore der Firma Infineon als Basis genutzt. Dabei handelt es sich um einen speziell für Automobilanwendungen optimierten 32-Bit Mikrocontroller. Der verwendete Controller ist der TC1775A. Die resultierende Struktur des BMS zeigt **Abb. 5.14**. Eine Messdatenaufbereitung filtert die angelegten Modulspannungen und schützt den Mikrocontroller vor Überspannungen. Die Temperatursensoren werden über den I^2C Bus an den Mikrocontroller angeschlossen und bieten eine Auflösung von 0,5 K.

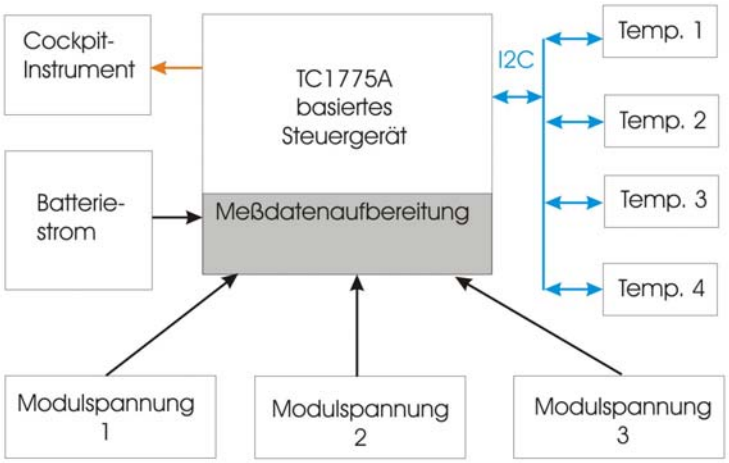


Abb. 5.14: *Struktur des Batteriemanagementsystems für das cityEL*

5.2.2 Hardwarekomponenten

Spannungsmessung

Die Spannungen der einzelnen Batteriemodule werden gemäß **Abb. 5.15** über die Signalvorverarbeitung auf die AD-Wandler Eingänge des TriCore geschaltet und sequentiell gewandelt. Auf aufwendige Sample-and-Hold Lösungen kann aufgrund der geringen Anzahl von Batteriemodulen und der kurzen Dauer einer Wandlung (t_{ADC} = 10 µs pro Wandlung) verzichtet werden. Während dieser Zeit erfolgt aufgrund der Trägheit des Batteriesystems keine signifikante Änderung der Spannung auch bei während der Wandlungen erfolgenden Stromänderungen.

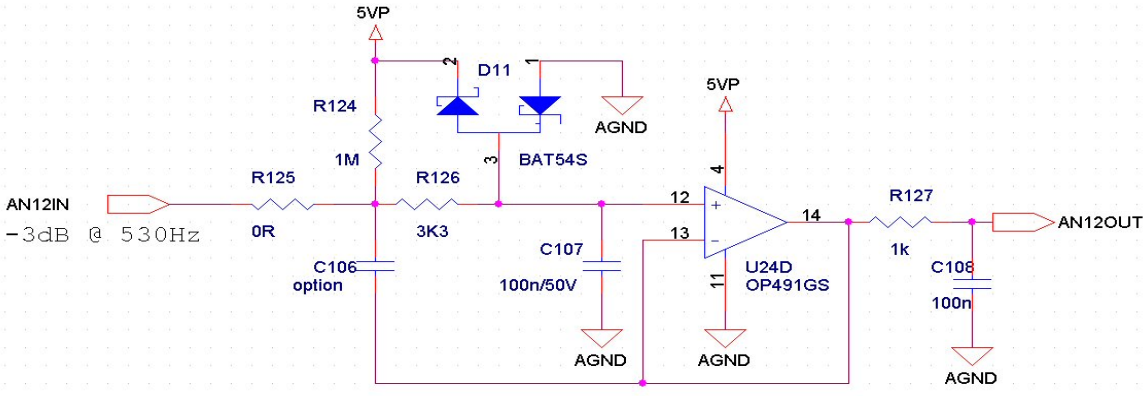


Abb. 5.15: *Filterung und Überspannungsschutz der Messdatenvorverarbeitung*

Strommessung

Der Strom wird wie beim VW CitySTROMer über einen LEM-Wandler bestimmt. Das Prinzip ist das gleiche wie im BMS des VW CitySTROMer, der Mikrocontroller wird durch eine Schutzbeschaltung geschützt, die der der Spannungsmessung entspricht.

Temperaturmessung

Die Temperaturen der Batteriemodule und der Umgebungstemperatur werden durch vier LM75A gemessen, die über den I²C Bus mit dem Mikrocontroller kommunizieren. Die Sensoren können entweder am Batteriegehäuse oder an einem Batteriepol befestigt werden. Der Batteriepol bietet eine direktere Kopplung an die Batterie als eine Befestigung am Batteriegehäuse, andererseits erwärmen sich die Pole auch zusätzlich durch die Übergangswiderstände zwischen Polklemme und Batteriepol. Die Sensoren wurden wegen der einfacheren Montage jeweils an der Seitenwand eines jeden Batteriemoduls befestigt. Der vierte Temperatursensor misst die Umgebungstemperatur.

Thermisches Management

Im Winterbetrieb des Fahrzeuges macht sich die offene Konstruktion des Batterietroges negativ bemerkbar. Die Batterien erwärmen sich im Ladebetrieb bei einer Außentemperatur von 0 ˚C bis zum Ladeende auf eine Temperatur von 7 ˚C. Im Fahrbetrieb erwärmt sich die Batterie während einer kompletten zweistündigen Entladung auf ungefähr 13 ˚C. Durch den Einbau eines thermisch abgeschlossenen Troges kann die Eigenerwärmung im Winter deutlich besser genutzt werden, indem die Luft innerhalb des Troges ventiliert. Damit werden die batterieinternen Verluste zur Aufheizung der Batteriemodule aus sich selbst heraus genutzt. Zwischen dem Boden des Troges und dem Batterieboden platzierte Heizmatten mit einer Leistung von ca. 20W, betrieben aus der 230 V Ladeversorgung, bringen eine zusätzliche Erwärmung der Batterie vor dem Beginn der Fahrt. **Abb. 5.16** zeigt ein Prinzip eines Batterietroges im Winterbetrieb. Im Sommerbetrieb muss der Batterietrog entfernt werden, da die Eigenerwärmung dann ein unerwünschter Effekt ist und die freie Lage eine bessere Kühlung gewährleistet. Bei einer Umgebungstemperatur von 30 ˚C im Sommerbetrieb wurde niemals eine Erwärmung auf über 41 ˚C gemessen.

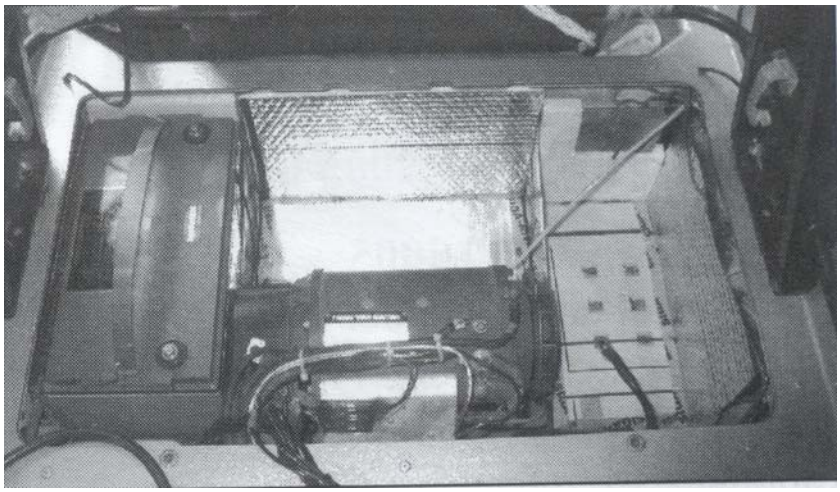


***Abb. 5.16**: Aufbau des Batterietroges mit Heizmatte im Winterbetrieb*

Einen Fahrzyklus bei einer Außentemperatur von 0 ˚C mit untemperierten Batterien zeigt **Abb. 5.17**.

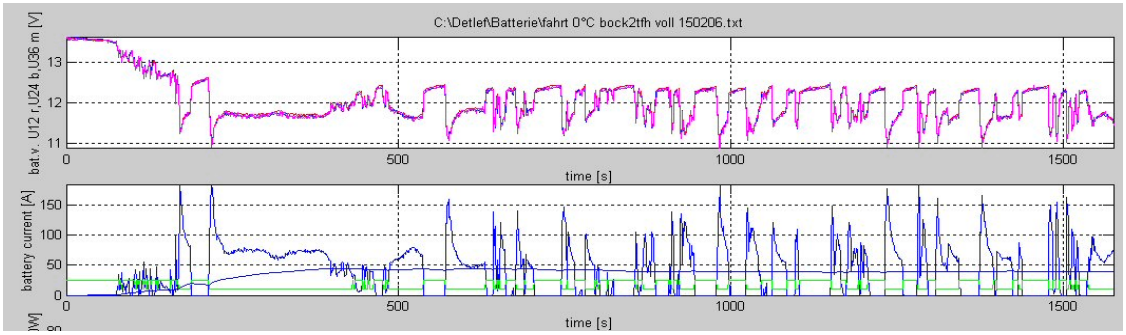


***Abb. 5.17**: Fahrzyklus mit untemperierter Batterie bei 0 ˚C (oben: modulspannungen, unten: blau Stromverlauf und Durchschnittsstrom, grün High Signal bei I<40A)*

Wird die Batterie dagegen auf 10 ˚C vortemperiert, so ergeben sich deutlich bessere Fahrleistungen, sichtbar am Beschleunigungsverhalten und der erzielbaren Reichweite. **Abb. 5.18** zeigt die Spannungen und den Strom auf der gleichen Strecke bei vorgewärmter Batterie.

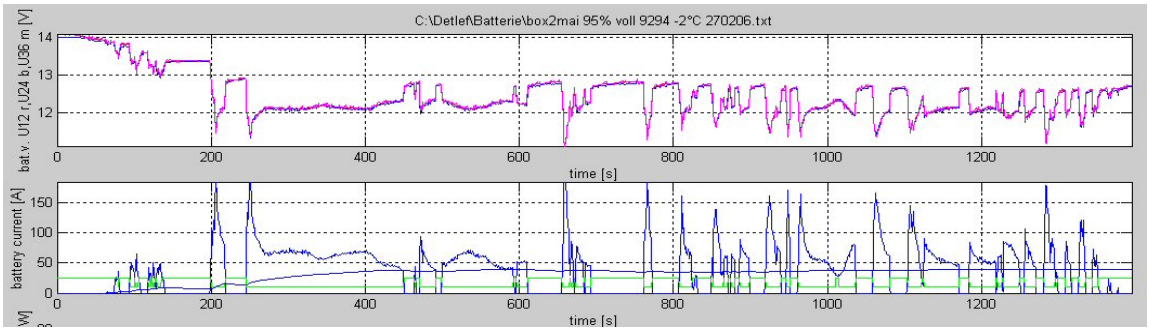


***Abb. 5.18**: Fahrzyklus bei gleicher Strecke und auf 10 ˚C vorgeheizter Batterie bei einer Umgebungstemperatur -2 ˚C (oben: Modulspannungen, unten: blau Stromverlauf und Durchschnittsstrom, grün High Signal bei I<40 A)*

Das bessere Beschleunigungsverhalten des Fahrzeugs führt zu besserem ‘Mitschwimmen’ in der grünen Welle durch die Möglichkeit vorausschauend zu fahren. Das führt zu deutlich weniger Stillstandsphasen während eines Zyklus, damit zu einer gleichmäßigeren Zyklierung, was eine höhere Reichweite bedingt. Die Spannungslage liegt jeweils 0,6 V...1,0 V über der ungeheizten Batterie.

Geschwindigkeitsmessung

Die Geschwindigkeit wird über drei Hall-Sensoren bestimmt, die wired-or über die Messdatenaufbereitung zur Bestimmung der Pulsdauer an den Eingang GPTA1 des TriCore geschaltet sind. Die Schaltung zeigt **Abb. 5.19**.

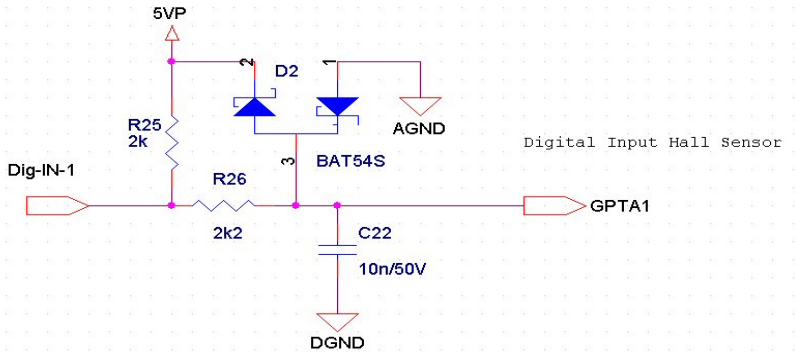


***Abb. 5.19**: Aufbereitung des Geschwindigkeitssignals*

Die Geschwindigkeit wird angezeigt und protokolliert. Zur Anzeige der verfügbaren Reichweite des Fahrzeuges wird das Geschwindigkeitssignal genutzt. Aus dem aus der Geschwindigkeit abgeleiteten Wegsignal und dem SOC wird die verbleibende Reichweite bestimmt. **Abb. 5.20** zeigt das Geschwindigkeitsprofil und die zugehörigen Daten der Batteriespannung und des Batteriestromes einer Testfahrt im cityEL.

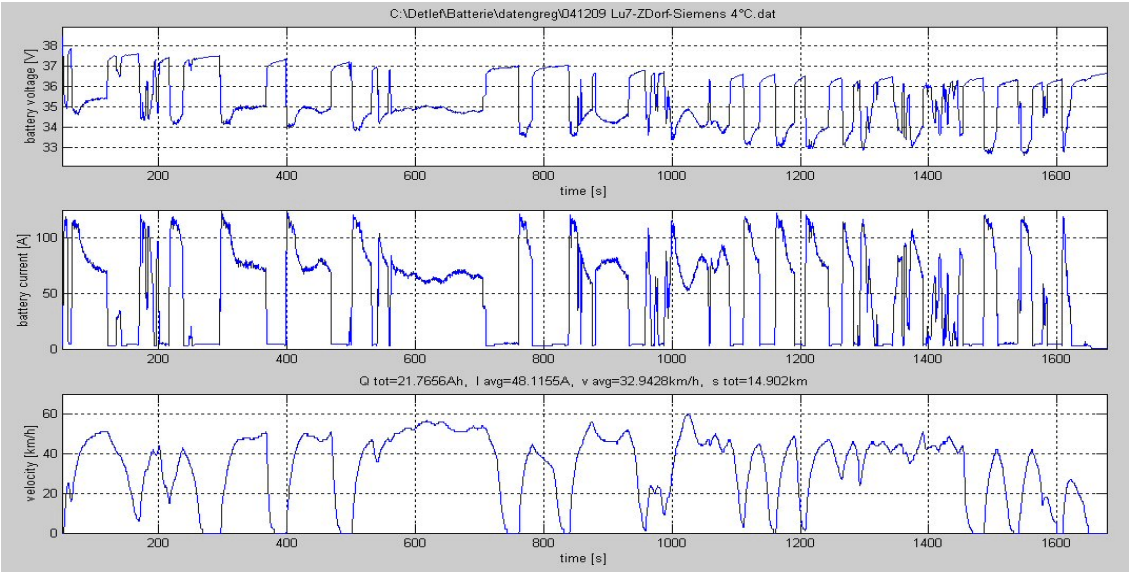


***Abb. 5.20**: Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit (unten), Batteriespannung (oben) und -strom (Mitte) am cityEL*

Ladungsausgleich der Batterien

Der Ladungsausgleich zwischen den Batteriemodulen erfolgt nach zwei unterschiedlichen Verfahren. An jedes Batteriemodul ist ein aktiver Bypass nach **Abb. 5.21** geschaltet. Die Hardware entspricht dem Symmetrierungsmodul der Ultracaps, wird jedoch vom BMS angesteuert und wurde der Batterie angepasst. Der jeweilige Bypass eines Batteriemoduls wird vom Steuergerät aktiviert, wenn eine Modulspannung während der Entladung bei Vollast und in stromlosen Phasen um mindestens 30 mV über der größeren der anderen beiden Modulspannungen liegt. In diesem Fall wird von einem höheren Ladezustand ausgegangen. Der Bypass wird solange aktiviert, bis die Modulspannung nicht mehr den höchsten der drei Spannungswerte

aufweist.

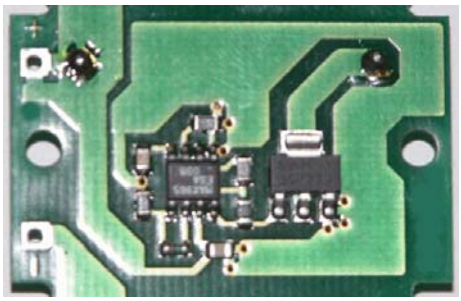


***Abb. 5.21**: Modul-Bypass zum Ladungsausgleich*

Auf der Rückseite der Leiterplatte ist ein Shunt verlötet, der Strom des Bypass liegt bei 40 mA. Die zweite Methode des Ladungsausgleichs ist im Ladeverfahren implementiert. Im Anschluss an die IU-Ladung kommt eine nachträgliche U-Ladung mit erhöhter Spannung. Die Batterie wird nach **Abb. 5.22** kontrolliert in die Gasung getrieben. Der Strom und die Dauer der Nachladung sind jedoch so gering, dass keine für die Batterie schädliche Gasung festgestellt werden kann. Der Ausgleich der Ladungsdifferenzen über die Nachladephase ist äußerst effektiv, die Bypass-Module werden nur bei sehr hohen Umgebungstemperaturen nach langen Standzeiten aktiviert.

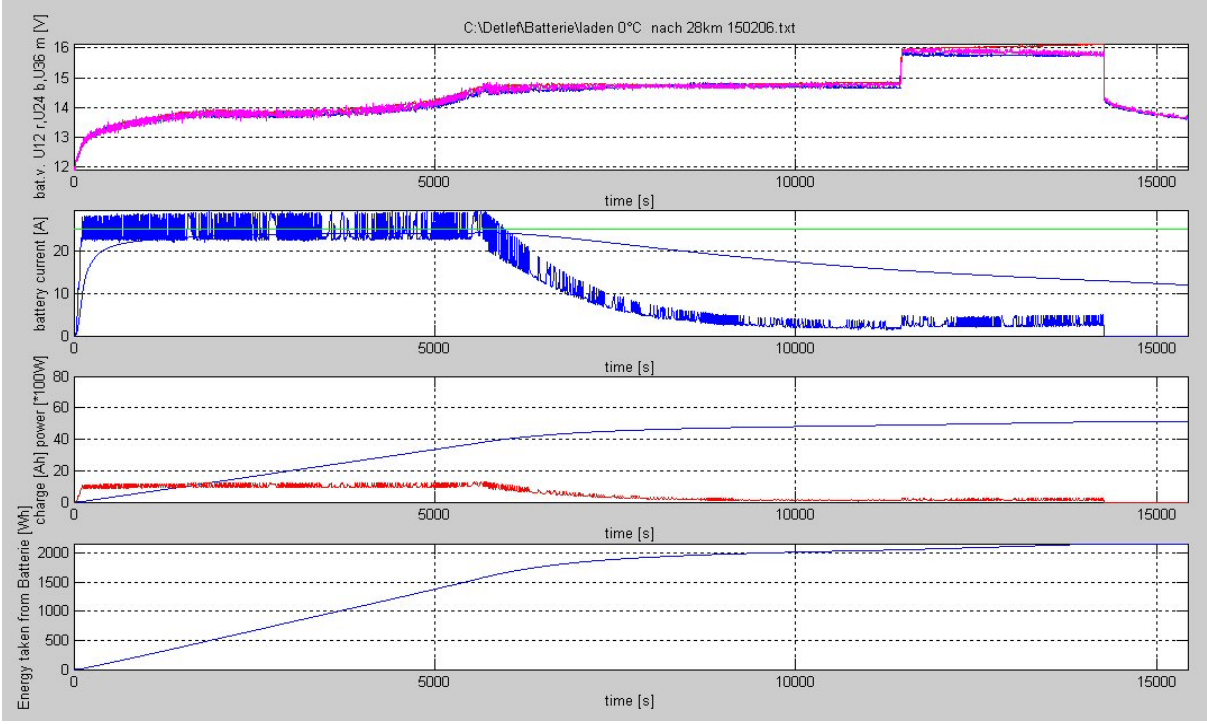


***Abb. 5.22**: Ladeverfahren mit nachgeschalteter Symmetrierungsphase (von oben nach unten: Modulspannungen, Ladestrom, Ladung (bl) und Leistung (rt), Netzenergie*

Vermeidung der Tiefentladung

Die aktive Strombegrenzung zur Vermeidung der Tiefentladung ist wie im System für den VW Golf CitySTROMer realisiert. Der Fahrstrom wird durch einen Eingriff des Batteriemanagementsystems auf sichere Werte begrenzt. **Abb. 5.23** zeigt deutlich das Einsetzen der Strombegrenzung beim Erreichen einer Modulspannung von 10,5 V. Es ist erkennbar, dass den EXIDE 3x 12 V/ 100 Ah unter Einschränkung der Fahreigenschaften noch ca. 10 Ah bei einer entnehmbaren Gesamtladung von 71 Ah schädigungsfrei zur Verfügung stehen (Limp home). In der Abbildung ist auch zu erkennen, dass das Verfahren zur Symmetrierung der Batterie sehr effektiv arbeitet. Die Batteriemodule liegen in ihrer Spannungslage sehr eng beieinander. Das in Kapitel 6 beschriebene power-assist System mit dem Ultracap ist in der dargestellten Messreihe deaktiviert.

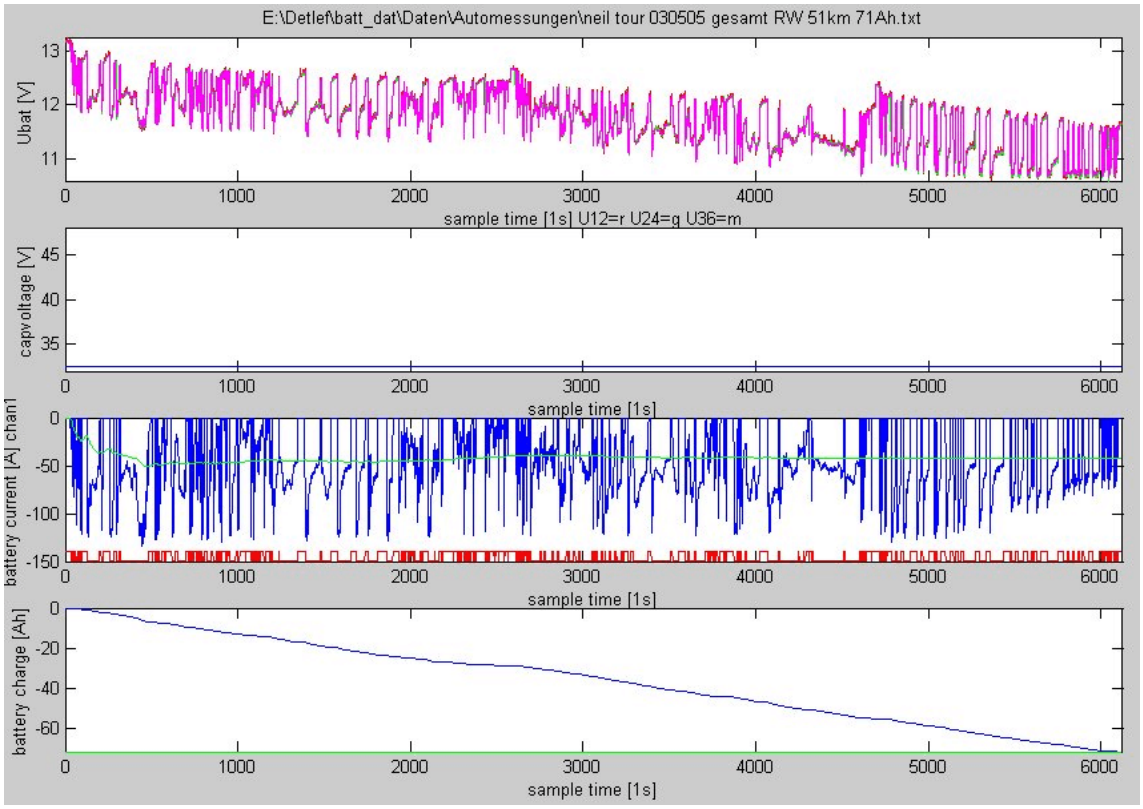


***Abb. 5.23**: Limp home durch Begrenzung des Fahrstromes beim Erreichen der Tiefentladespannung (von oben nach unten: Modulspannungen, Ultracapspannung, Stromverlauf (blau), entnommene Ladung)*

Ladezustandsbestimmung

Die Bestimmung des Ladezustandes erfolgt über die Kombination dreier Verfahren

- Ladungsbilanzierung,
- Auswertung der Modulspannungen und

- Rekalibrierung über die Ruhespannung bei langen Standzeiten

Die Ladungsbilanzierung zwischen zwei Vollladungen erfolgt über eine Integration des Stromes. Dabei wird die entnehmbare Kapazität durch das im Kapitel 4 diskutierte Fuzzy-System zur Bestimmung des Restladegrades ermittelt. Die Zugehörigkeitsfunktionen wurden aus Labormessungen der entnehmbaren Kapazität über der Temperatur gewonnen und werden im Fahrzeug an den aktuellen SOH angepasst. Die bis zur Entladeschlußspannung entnommene Kapazität korrigiert die vorausberechneten Werte in der Form, dass die hinterlegten Werte jeweils um 5% der Differenz aus berechnetem und erzieltem Wert adaptiert werden. Zwischenladungen werden über den Ladefaktor gewichtet einbezogen.

Damit lassen sich Änderungen der Batterieperformance in das System integrieren. In der Praxis zeigt sich, dass die Batterien durch hohen Gebrauch eher wieder eine höhere entnehmbare Kapazität erhalten, bei längeren Standzeiten vermindert sich die Kapazität dagegen. Zusätzlich wird während der Entladung das Verhalten der Klemmenspannung untersucht. Das Fahrzeug regelt im Normalfall den Strom bei I_{max} = 130 A ab. Im kick-down wird die Strombegrenzung umgangen, dann sind max. 175 A für Beschleunigungen aus dem Stand entnehmbar. Dieser Betriebsfall geht in die Untersuchung nicht mit ein. Im Normalbetrieb ohne kick-down wird die jeweils bis dahin gemessene minimale Klemmenspannung bestimmt. Betrachtet man wie in **Abb. 5.24** den Verlauf des Klemmenspannungsminimums über der Zeit (obere Grafik, schwarze Kurve), so stellt man fest, dass der Verlauf angenähert dem einer Konstantstromentladung entspricht.

Das Verhalten des Minimums der Klemmenspannung über dem SOC ist im Steuergerät hinterlegt, aus der Tabelle wird der Ladezustand bestimmt. Das hinterlegte Verhalten der Modulspannungsminima ist temperaturabhängig ausgeführt. Die nach den beiden Verfahren ‘Modulspannungsminimum’ und ‘Ladungsbilanzierung’ bestimmten Ladungszustände werden miteinander verknüpft und dann dem Fahrer über das Display angezeigt. **Abb. 5.24** zeigt die Ergebnisse der SOC-Bestimmung über das Modulspannungsminimum anhand einer Testfahrt im Sommer bei 25˚C. In der blauen Kurve der unteren Grafik ist die der Batterie nach der Vollladung entnommene Ladung aufgetragen. Die schwarze Kurve zeigt den anhand des Minimums der auftretenden Modulspannungen bestimmten SOC. Die bis zur Abregelung des Stromes entnehmbare Ladung des Entladezyklusses ist der Ausgangswert der nach der Entladung bestimmten margentafarbenen Fehlerkurve. Aus dieser ist erkennbar, dass der der Rekalibrierung dienende Wert bereits nach sehr kurzer Fahrzeit mit einer ausreichenden Genauigkeit vorliegt.

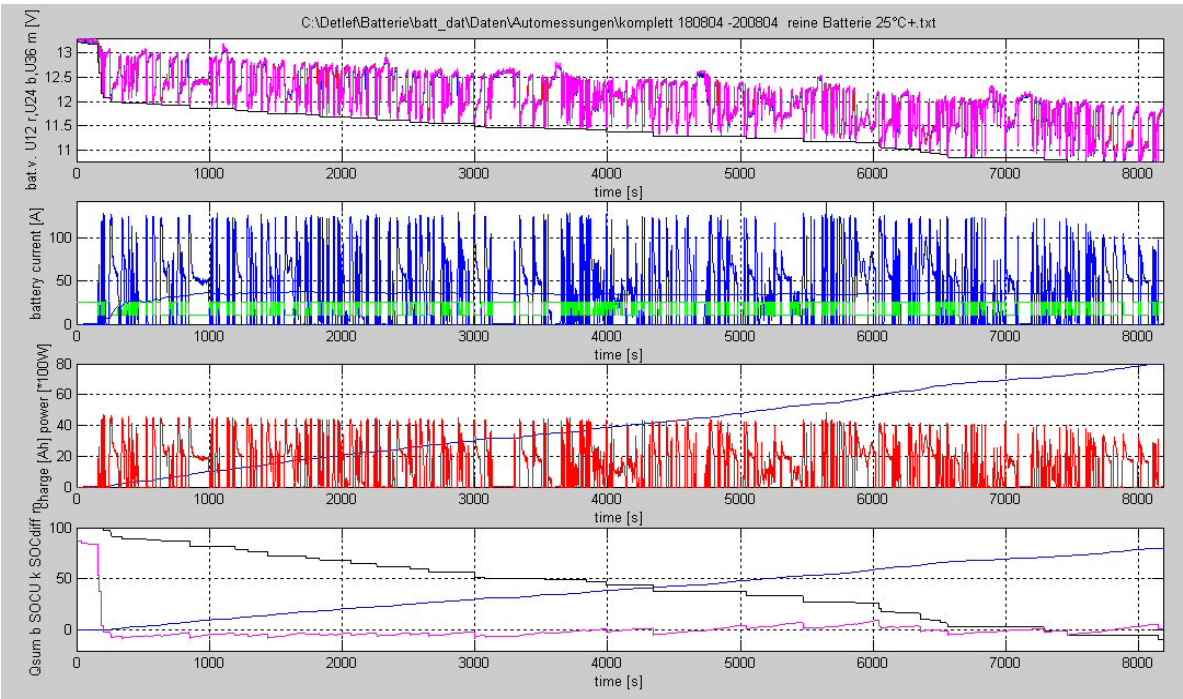


***Abb. 5.24**: Entnommene Ladung, bestimmter SOC und Fehlerbetrachtung bei der Auswertung der Modulspannungen bei T_{amb} = 25 ℃ (von oben nach unten: Modulspannungen und aufgetretenes Minimum aller Modulspannungen, Stromverlauf und aufgelaufener Durchschnittsstrom, entnommene Ladung und Leistung, blau: entnommene Ladung- schwarz: prognostizierter SOC- magenta: nachträglich berechnete Fehlerkurve)*

Die Temperatur geht als Parameter sowohl in die Bestimmung der der Batterie maximal entnehmbaren Ladungsmenge als auch in den Auswertealgorithmus für die Modulspannungsminima ein. Die Funktionsweise bei Temperaturen um den Gefrierpunkt zeigt **Abb. 5.25**. Auch hier wird das Entladeende zuverlässig erkannt.

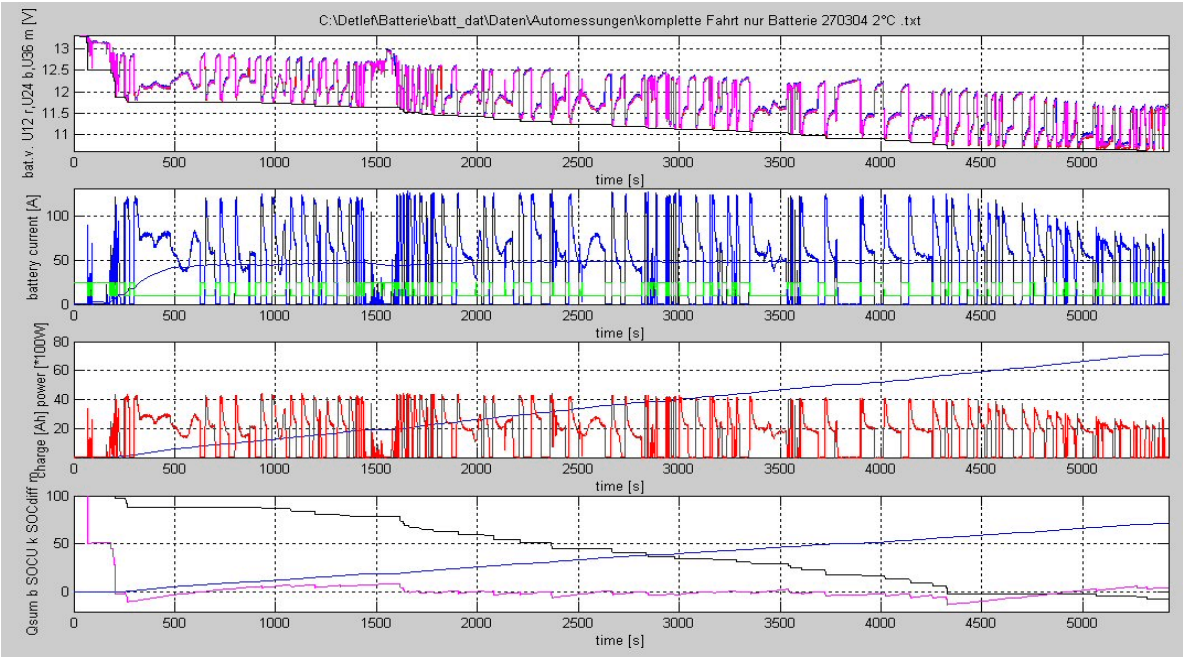


***Abb. 5.25**: Bestätigung der Gültigkeit des Ansatzes auch bei tiefen Temperaturen (von oben nach unten: Modulspannungen und aufgetretenes Minimum aller Modulspannungen, Stromverlauf und aufgelaufener Durchschnittsstrom, entnommene Ladung und Leistung, blau: entnommene Ladung- schwarz: prognostizierter SOC- magenta: nachträglich berechnete Fehlerkurve)*

Die einzelnen Werte können entweder in Tabellen abgelegt werden, oder in einem Fuzzy-SOC-Meter umgesetzt werden. Das Fuzzy-SOC-meter besitzt den Vorteil, dass das System bei festgelegten linguistischen Variablen im Programm implementiert ist und nur noch die Zugehörigkeitsfunktionen anhand der Messwerte verändert werden. Das vereinfachte Fuzzy-SOC-meter nach **Abb. 5.26** beschreibt die Bestimmung des Ladezustandes unter der Annahme eines über den Zyklus relativ konstanten mittleren Entladestromes von 45 A, was der Erfahrung aus vorliegenden Messreihen über ca. 5000 km entspricht.

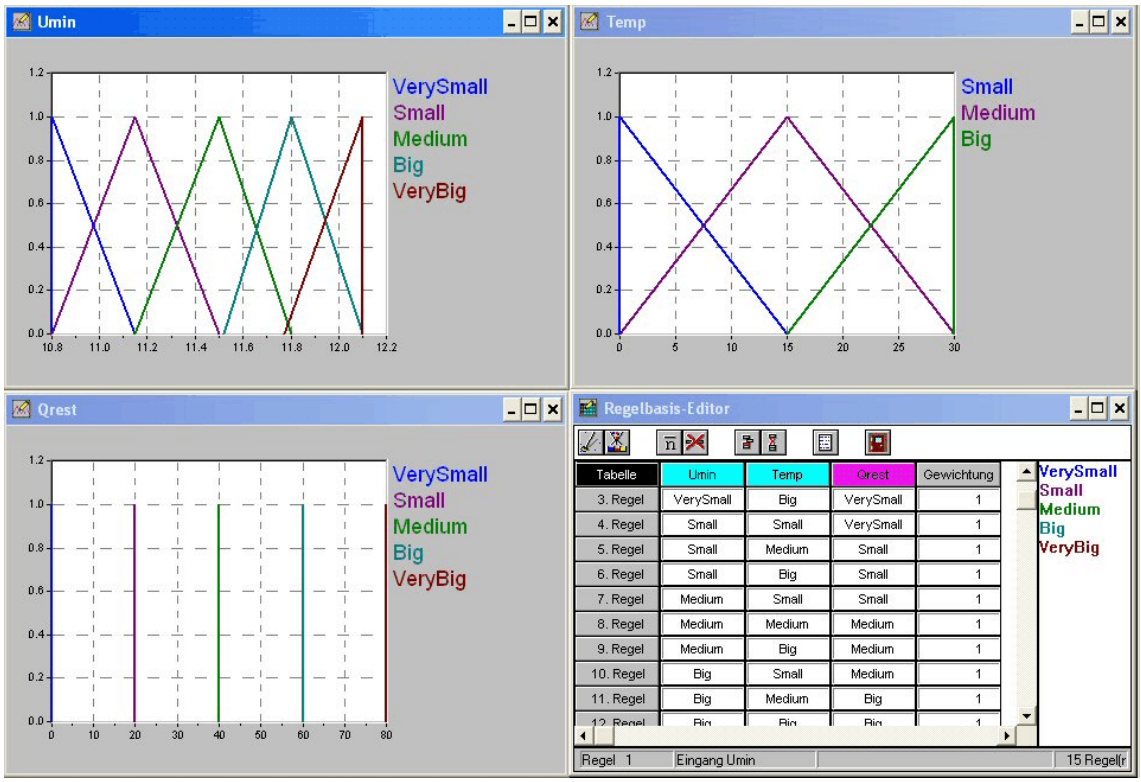


Abb. 5.26: *Linguistische Variablen zur Bestimmung des SOC aus dem Modulspannungsminimum und Ausgangsregelbasis des noch nicht adaptierten Systems*

Abb. 5.27 zeigt das resultierende Kennfeld. Die Freiheitsgrade der Anpassung an das reale Betriebsverhalten liegen hier in der Position und der Breite der Zugehörigkeitsfunktionen der Eingänge Umin und Temp. Die Alterung kann durch zusätzliche Verschiebungen der Singletons der Ausgangsvariablen Qrest angepasst werden. Im Prinzip handelt es sich bei der Tabellen-und Berechnungslösung und bei der Fuzzy-Implementierung um den gleichen hinterlegten Algorithmus, die Wahl der Realisierung ändert nichts am erzielten Ergebnis.

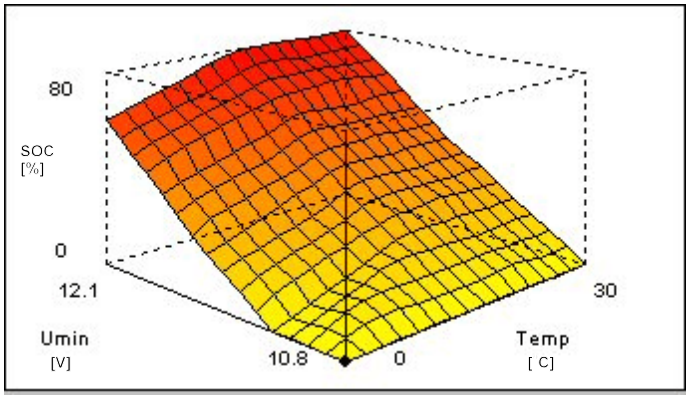


Abb. 5.27: *Resultierendes Kennfeld des nicht adaptierten Fuzzy-SOC-Meters*

Während längerer Stillstandsphasen findet eine gewisse Selbstentladung der Batterie statt. Diese Selbstentladung fordert nach längeren ungenutzten Zeiten eine Rekalibrierung des SOC. Diese kann über die temperaturkompensierte Ruhespannung des Systems durchgeführt werden. **Abb. 4.1** zeigt exemplarisch das Einschwingen in die Ruhespannung bei verschiedenen SOC. Das Verfahren weist jedoch ziemlich große Ungenauigkeiten auf. Die Ruhespannung ist zum Beispiel sehr abhängig von dem vor der Lastabschaltung realisierten Profil.

Im Versuchsfahrzeug wurde diese Rekalibrierung nicht durchgeführt. Das Fahrzeug wird während längerer Standzeiten permanent an das Ladegerät angeschlossen, so dass in diesem Fall immer die Vollladung erreicht und über Erhaltungsladungen gehalten wird.

6. Realisierung eines Energiemanagementsystems für einen hybriden Energiespeicher aus Batterie und Ultracap zum power-assist

Die Automobilhersteller arbeiten äußerst intensiv an Hybridkonzepten mit elektrischen Antriebskomponenten. Dabei lassen sich unterschiedliche Strategien beobachten. Diese reichen vom Start/Stop-Betrieb (Soft- oder Micro-Hybrid) über den power-assist (Mild-Hybrid) bis hin zur Möglichkeit auch längere Strecken rein elektrisch zu fahren (Full-Hybrid).

Allgemein kann power-assist dabei sowohl in verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeugen, als auch in Brennstoffzellenfahrzeugen oder batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugen zum Einsatz kommen. Der Hintergrund ist immer der, dass eine Beschleunigungsschwäche des Antriebssystems behoben werden soll. Hybride Strukturen können sowohl in der Kombination Verbrennungsmotor/Batterie, Brennstoffzelle/Ultracap oder Batterie/Ultracap realisiert werden. In diesen Ansätzen konkurriert der Ultracap mit der NiMH Batterie. Lithiumsysteme sind erst im Forschungsstadium verfügbar. Nach [Scu03] sollte das kombinierte System immer kleiner sein als der einzelne Energiespeicher.

Neben ca. 15 %iger Verbrauchssenkung und 40 %iger Verbesserung des Beschleunigungsverhaltens lassen sich beim verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeug aufgrund der Verringerung der Dynamikanforderungen des Verbrennungsmotors verbesserte Emissionswerte erreichen. Bei Fahrzeugen mit Brennstoffzellenantrieben ist ein Leistungsspeicher gefordert, der schnell anspricht und Spitzenleistungen zur Verfügung stellen kann. Im reinen Elektrofahrzeug gehen die Anforderungen in Richtung Fahrspaß, hohe Reichweite und minimierte Kosten. Hier kann eine Kombination aus Batterie plus Ultracap alle drei Faktoren positiv beeinflussen. Ein hybrides Antriebssystem weist dabei im gesamten Antriebsstrang immer Nachteile hinsichtlich Kosten, Gewicht und Bauraum auf [Glo00].

Ultracaps weisen immer dann ein Einsatzpotenzial auf, wenn große Leistungen über einen kurzen Zeitraum gespeichert oder zur Verfügung gestellt werden müssen, besonders bei tiefen Temperaturen. **Abb. 6.1** zeigt den Vergleich zwischen der Sprungantwort einer Bleibatterie und eines Ultracapmoduls bei einer Anregung mit einem Stromimpuls von 100A bei -30˚C.

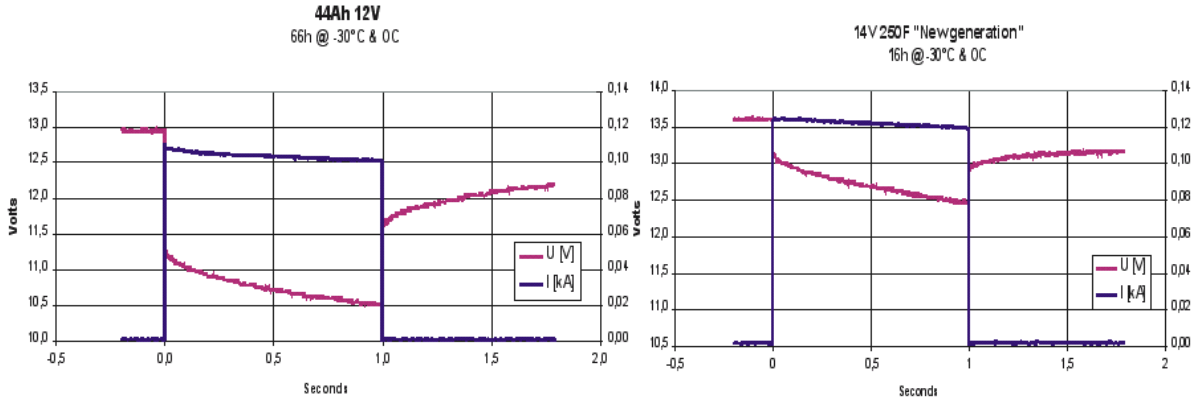


***Abb. 6.1**: Vergleich der Sprungantwort des Spannungsverlaufes bei impulsförmiger Stromanregung von Batterie und Ultracap (Quelle: Epcos interne Messung)*

6.1 Implementierung eines power-assist Leistungsspeichers in ein LEV

Der folgende Abschnitt beschreibt die Implementierung einer Ultracapbank in das bereits im Kapitel 5 genutzte LEV Typ cityEL. Die Antriebsbatterie mit einer Nennspannung von 36 V entspricht von der Spannungslage den im 42 V Bordnetz zu nutzenden Komponenten. Über die Auslegung der Bleibatterie und des Ultracaps kann das Betriebsverhalten des Antriebssystems beeinflusst werden. Eine geeignete Systemauslegung soll hier beschrieben werden.

Für das Elektrofahrzeug wurde in diesem Zusammenhang die komplette Steuerungselektronik umgestellt. Die Struktur des aufgrund der gewählten Betriebsstrategie entwickelten Energiemanagementsystems wird ausführlich dargestellt und anhand der Erfahrungen bewertet.

Das System besteht aus dem zentralen Steuergerät für das Energiemanagement, basierend auf dem TriCore TC1775, einem Messdatenerfassungssystem, einem Leistungsschaltermodul und einem DC-DC Wandler.

6.1.1 Einsatzgebiete Ultracap im cityEL

Die Ultracaps sollen während kurzer Beschleunigungsphasen mit $t_{acc} < 12$ s den benötigten Strom zur Verfügung stellen und während der Bremsphasen mit $t_{dec} < 15$ s eine Rückspeisung in die Ultracaps zulassen. Aufgrund der niedrigen Batteriespannung im cityEL von nur nominal 36 V und der Strombegrenzung der werksseitigen Motorsteuerung sollen die Ultracaps auf maximal 48 V aufgeladen werden können. Prinzipiell ist eine möglichst hohe Spannung im Vollladezustand der Ultracaps gewünscht um eine möglichst hohe Anfahrleistung in Verbindung mit langen Stützzeiten von 10 s zu erhalten.

Prinzipiell sind zwei unterschiedliche Strukturen denkbar. Zum Beispiel kann die Grundlast der Batterie entnommen werden und vom Durchschnittsstrom abweichende Differenzströme stellt der Ultracap bereit. Durch die Aufteilung des Laststromes auf den Ultracap und die Batterie kann der Ultracap für einen geringeren Energieinhalt ausgelegt werden. Aufgrund der dann niedrigen Ströme von der Batterie zum Ultracap kann der benötigte DC-DC-Wandler für kleine Leistungen dimensioniert werden und ist somit kostengünstig.

Eine andere Strategie sieht nur den gleichzeitigen Betrieb eines Energiespeichers vor. Der Ultracaps muss dann sämtlich Hochstromlasten übernehmen können. Das erfordert leistungsstarke und damit teure DC-DC Wandler zur Nachladung der Ultracaps innerhalb kurzer Intervalle. Ein weiterer Nachteil ist der, dass die Batterie weiterhin eine gute Hochstrom-charakteristik aufweisen muß, da der Ultracap nicht zwangsweise für alle Beschleunigungen zur Verfügung steht. Die Strategie ist die, dass die Ultracaps zum Beispiel aus dem Stand für Beschleunigungen genutzt werden können und bis zum Erreichen einer festgelegten unteren Spannung als alleinige Versorgung fungieren. Beim Erreichen der Abschaltspannung wird automatisch auf die Batterie umgeschaltet, die dann während geringerer Lastanforderung durch den Antrieb die Ultracaps wieder auflädt. Dieses Aufladen wird abgebrochen, wenn die Ultracaps voll sind oder bei Rekuperationsbetrieb der anschließende Bremsvorgang zur Volladung ausreicht.

6.1.2 Systemanalyse LEV city-el

Zur Systemauslegung wird das vorhandene Antriebssystem in Bezug auf die elektrische Last der Batterie analysiert. Die Basis aller Überlegungen sind jeweils reale Fahrzyklen, die im rein batterie-elektrischen Betrieb im Fahrzeug über das im Kapitel 5 beschriebene BMS aufgezeichnet wurden. **Abb. 6.2** und **Abb. 6.3** zeigen zwei Stromverläufe als Ausschnitt zweier Messreihen im normalen Straßenverkehr, wobei die erste Messreihe im morgendlichen Berufsverkehr aufgenommen wurde und die zweite im normalen Verkehr außerhalb des Berufsverkehrs auf der gleichen Fahrstrecke bestimmt wurde. Dabei zeigt **Abb. 6.2** häufigere Beschleunigungen aus dem Stand heraus.

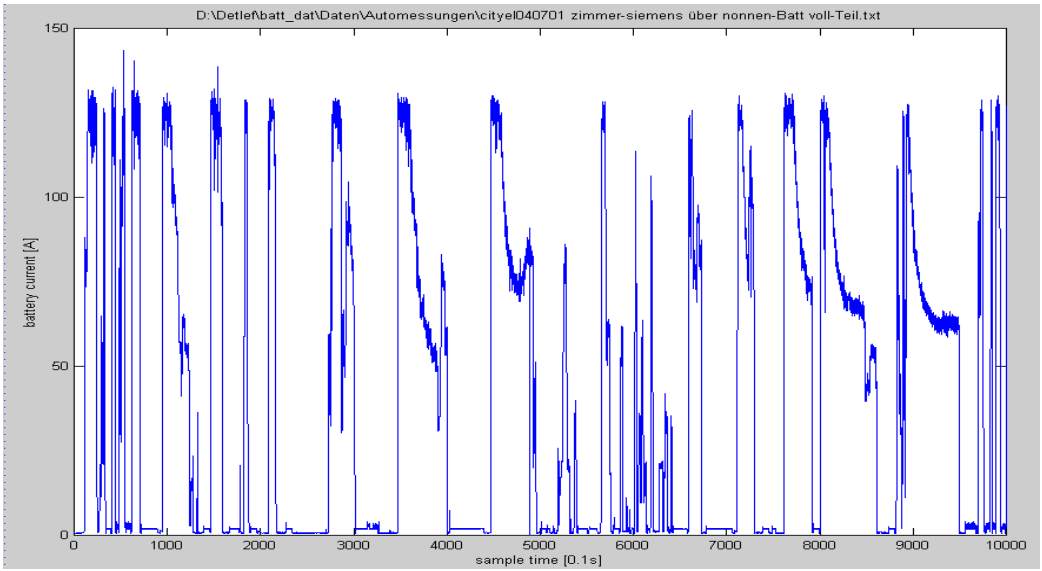


Abb. 6.2: *Testfahrt Berufsverkehr*

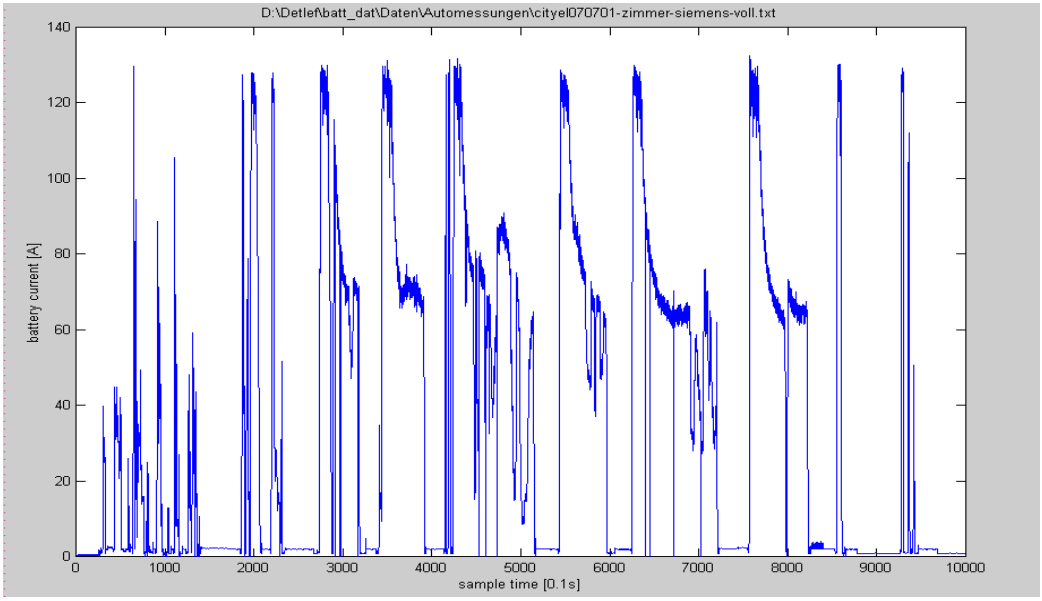


Abb. 6.3: *Testfahrt normaler Verkehr*

Zur Identifikation des realen Fahrzeugverhaltens wurden unterschiedliche Messungen anhand von Beschleunigungen des Fahrzeugs durchgeführt. Anhand dieser typischen Lastfälle muß die Eignung der Ultracaps zum Einsatz im LEV untersucht werden. Diese typischen Lastmomente sind:

(1) Beschleunigung 0 - 45 km/h

(2) Beschleunigung 20 - 40 km/h

(3) Beschleunigung 30 - 45 km/h

(4) 3 s Vollgas, 5 s Vollgas, 10 s Vollgas mit vollgeladenen Ultracaps aus dem Stand

(5) 3 s Vollgas, 5 s Vollgas, 10 s Vollgas mit vollgeladenen Ultracaps bei 30 km/h

Prinzipiell kann konstatiert werden, dass typische Beschleunigungs- oder Verzögerungsvorgänge im Stadtverkehr eine Dauer von maximal 12 s aufweisen. Zur sinnvollen Implementierung von Ultracaps in bestehende LEV Lösungen müssen die geeigneten Betriebsstrategien für das Energiemanagement bestimmt und festgelegt werden. Die Lastfälle (1), (2) und (4) sollen aufgrund der hohen auftretenden Ströme mit Unterstützung des Ultracaps gefahren werden. In den Fällen (3) und (5) ist der benötigte Strom so gering, dass er der Batterie entnommen werden kann. Die auf dem Energiemanagementsystem laufende Software schaltet entsprechend nur bei sinnvollem Bedarf den Ultracap in das System, wodurch eine Optimierung der Verfügbarkeit des Ultracaps gewährleistet ist. Bei leichten ansteigendem Geländeprofil ist beispielsweise ein signifikanter Anstieg des Stromes feststellbar, in diesem Fall wird der Ultracap auch in den Lastfällen (3) und (5) zugeschaltet. **Abb. 6.4** zeigt dieses Verhalten ungefähr bei Messwert 6500 in einer realen Fahrt im Stadtverkehr Berlin. Sobald der vom Antrieb benötigte Strom wieder sinkt wird automatisch auf Batteriebetrieb zurück geschaltet.

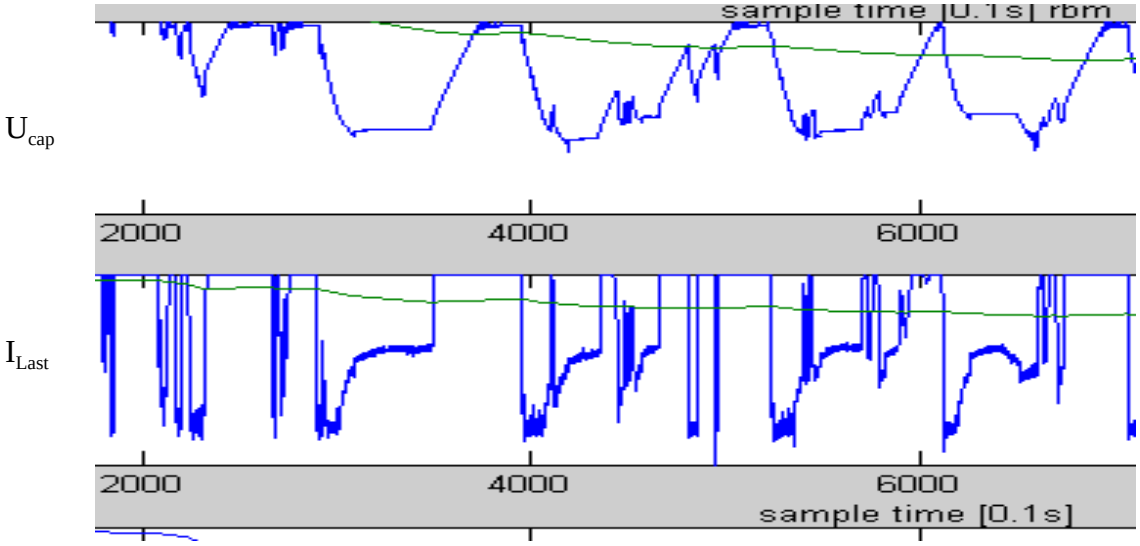


***Abb. 6.4**: Schematische Darstellung einer leichten Bergauffahrt mit Umschalten auf Ultracap ca. bei Messpunkt 6500*

Integriert man das regenerative Bremsen in das System, so sollten auch gleichförmige Bewegungen höherer Geschwindigkeiten aus dem Ultracap gefahren werden, um die Aufnahmefähigkeit des power-assist Speichers im bei hoher Geschwindigkeit zeitlich nicht zu fernen Bremsmoment zu erhöhen. Ein modernes Energiemanagement vorausgesetzt, kann die Spitzenlast im Rahmen der Energierückgewinnung beim Bremsen gegenüber Bleibatterien um den Faktor 2,5 erhöht werden.

Bei einem Fahrzeuggesamtgewicht von 365 kg ergeben sich für die oben genannten typischen Lastmomente Beschleunigungswerte, wie sie in der nachfolgenden **Tab. 6.1** zusammengefasst sind.

Tab. 6.1: Typische Lastmomente cityEL

Lastfall	Dauer(Sommer/Winter)
Beschleunigung 0-45 km/h	(18 s/26 s)
Beschleunigung 20-40 km/h	(7 s/14 s)
Beschleunigung 30-45 km/h	(11 s/16 s)
3s/5s/10s Vollgas aus Stand	(17/23/38 km/h / 15/20/30 km/h)
3s/5s/10s Vollgas aus 30km/h	(35/38/43 km/h / 33/35/38 km/h)
3s/5s/10s Vollgas aus 45 km/h	(46/47/48 km/h / 45/45/46km/h)

Deutlich ersichtlich ist die Tatsache, dass die Fahrleistungen im Winter bei reinem, untemperierten Batteriebetrieb dramatisch gegenüber denen im Sommer einbrechen. Bei Temperaturen um -5 ˚C lässt sich das Fahrzeug zum Beispiel im reinen Batteriebetrieb nur noch auf ca. 42 km/h beschleunigen, die Reichweite vermindert sich je nach genutzter Batterie um 20 % bis 70 %. Aus diesem Grund durchgeführte Modifikationen am Fahrzeug zum Vorheizen der Batterien im Winterbetrieb sind im Kapitel 5 beschrieben.

6.1.3 Betriebsverhalten der Ultracaps

Die Systemauslegung des Energiemanagementsystems erfolgte anhand umfangreicher Laboruntersuchungen. Zur Identifizierung des Systemverhaltens wurden die einzelnen Komponenten ausführlich vermessen. Das betraf die unterschiedlichen Batterien, die Ultracaps, den DC-DC Wandler und den Leistungsschalter. Das EMS wurde in seiner Funktionsweise ebenfalls mit Simulationsdaten getestet.

Hochstromentladungen von Ultracaps im Labor haben einen signifikanten Temperaturanstieg der Ultracaps durch jeden Hochstromzyklus nachgewiesen. Ein Zuschalten der Ultracaps sollte prinzipiell vom Energiemanagementsystem in Abhängigkeit der augenblicklichen

Modultemperatur veranlasst werden, was faktisch bedeutet, dass die Erwärmung als bestimmender Faktor in die Betriebsstrategie eingehen muß. Bis zu Gehäusetemperaturen von 60 ˚C kann für die genutzten Ultracaps gemäß Herstellerangaben eine Leistungsentnahme ohne Limitierungen erfolgen. Ab 60 ˚C muss eine weitere Erwärmung durch eine Limitierung der Leistungsabgabe und des Ladestromes verhindert werden. In dieser Applikationen kann strategieabhängig eine Erwärmung auf maximal 50 ˚C bei reinem power-assist Betrieb beobachtet werden. Des Temperaturmanagement als Funktion des Energiemanagements des Fahrzeuges weist damit Abhängigkeiten von der Applikation und von der Betriebstrategie auf. Die Ultracaps sind im Fahrzeug wie im Labor in einem oben offenen Kasten untergebracht. Kühlung erfolgt über passive Konvektion. Das verwendete Gehäuse ist jedoch keinesfalls automobiltauglich. Gerade bei Temperaturen um 0 ˚C bilden sich während der Fahrt erhebliche Mengen an Kondenswasser an den Zellen.

Zum Beginn der Untersuchungen gab es jedoch von Seiten des Herstellers keine Gehäuse, die Automotive-Applikationen gerecht gewesen wären. Im Laborbetrieb wurden die einzelnen Ultracapmodule bis an die Grenzen der Belastbarkeit getestet, sowohl hinsichtlich der Entladeleistungen als auch in Bezug auf die Auswirkungen regelmäßiger Überladungen. Das genutzte System wurde während der Untersuchung nicht gegen vorliegende bessere mechanische Konstruktionen ausgetauscht, da hier einzelnen Zellenspannungen einer Messung zugänglich sind und somit Aussagen über die Alterung von einzelnen Zellen möglich werden.

Abb. 6.5 zeigt die Erwärmung eines 42 V Ultracapmoduls im Laborbetrieb bei Hochstromentladungen mit zyklischen Impulsen mit konstant 4 kW.

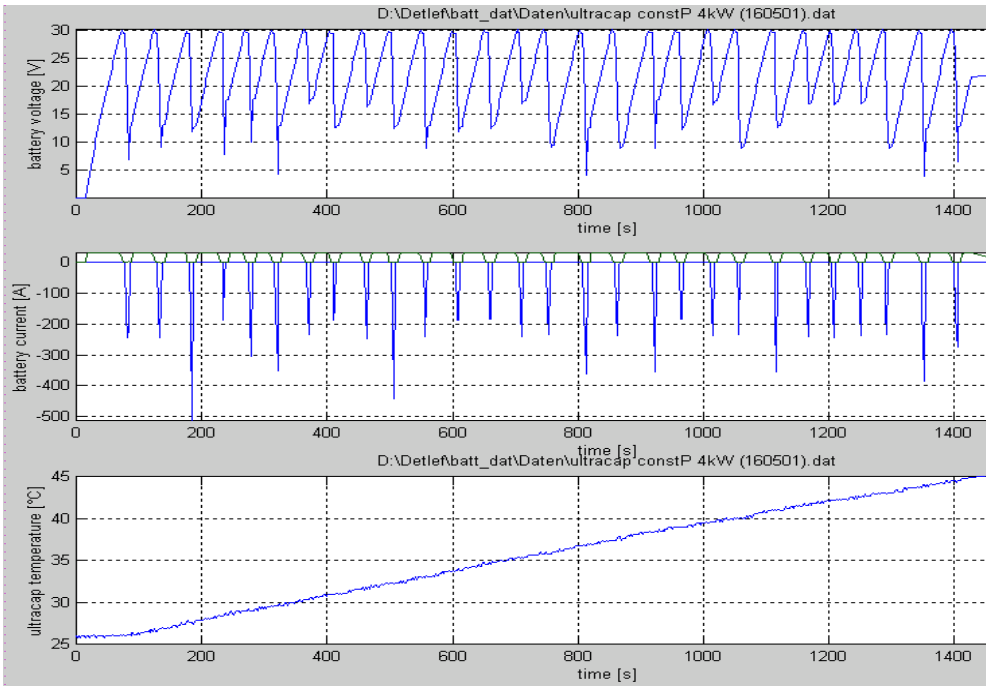


***Abb. 6.5**: Erwärmung des 67F/42V Moduls bei Zyklierung mit 4kW Pulsen*

Appliziert man die Ultracaps im 42 V PowerNet auch auf Boosten und regeneratives Bremsen, so ergibt sich das gleiche Temperaturverhalten wie in der gezeigten Labormessung. Epcos empfiehlt in diesem Fall eine Luftkühlung des Moduls mit einer in **Abb. 6.6** gezeigten Verbesserung des Temperaturverhaltens

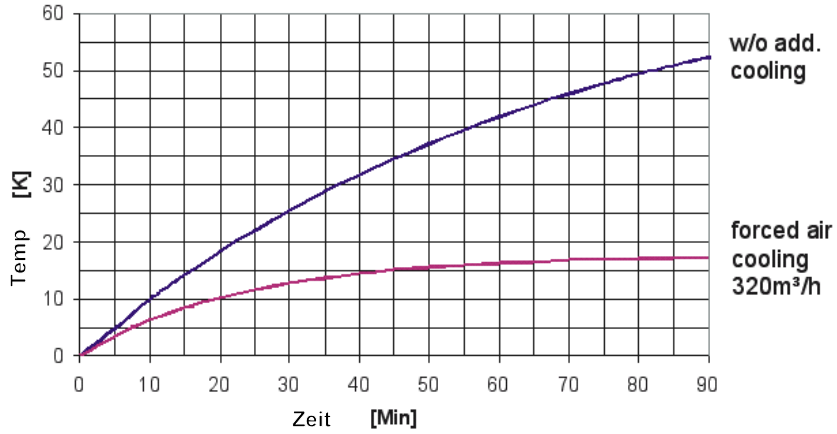


***Abb. 6.6**: Thermisches Verhalten eines 67F/42V Moduls im Boost Modus [Die02]*

Beim Booster-Betrieb und bei der Rekuperation treten sehr hohe Ströme auf. Dann ist eine Zwangssymmetrierung notwendig.

Zur Symmetrierung der Ultracaps wurde eine aktive Zwangssymmetrierung (**Abb. 6.7**) nach dem im Abschnitt 3.1 beschriebenen Ansatz genutzt. Der dargestellte Operationsverstärker erzeugt eine interne Referenzspannung, die über den Ausgang 'REF' ausgegeben wird. Der Baustein verfügt über einen weiten Versorgungsspannungsbereich von VCC = 1,6 V ... 5,5 V, ist dadurch für unterschiedlichste Energiespeicher einsetzbar.

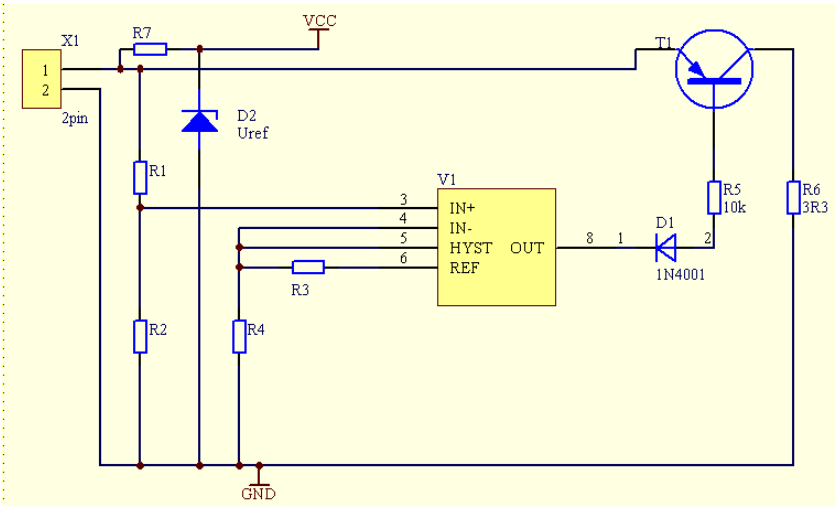


***Abb. 6.7**: Prinzipielle Symmetrierung von Ultracaps mit 2-Punkt Regler*

Die Kombination R7/D2 ermöglicht den Einsatz für Module mit Spannungen über 5,5 V (d.h. aus mehr als zwei Zellen bestehend, da die Versorgung über die Referenz auf einen festen Wert begrenzt wird. Die Kombination aus R3/R4 bestimmt die Hysterese, mit der um die Referenzspannung geschaltet wird. R1/R2 teilen die Eingangsspannung herunter und bestimmen damit den Schaltpunkt. Beim Überschreiten der eingestellten Schaltschwelle schaltet der invertierende Ausgang nach Masse und damit den Symmetrierstrom über R6 ein. Erst beim Unterschreiten der unteren Schaltschwelle wird der Symmetrierstrom wieder abgeschaltet.

Der Vorteil dieses Symmetrierprinzips liegt darin, dass der Symmetrierprozeß unabhängig von einem Steuergerät durchgeführt werden kann. Es müssen jedoch einige zum Teil gravierende Einschränkungen beachtet werden. So muß zum Beispiel sichergestellt sein, dass die maximale Ladespannung im System begrenzt ist. Das Symmetrierverfahren arbeitet abhängig von R6 mit Strömen im Bereich von maximal 500 mA. Es muß dementsprechend vorausgesetzt werden, dass die einzelnen Ultracaps im SOC nur unwesentlich voneinander abweichen. Ein einzelner defekter oder schwach geladener Kondensator kann somit zur Überladung mehrerer Kondensatoren führen, da in der Regel viel höhere als der zur Symmetrierung genutzte Strom während der Lade- bzw. Rekuperationsphasen auftreten. Die Betriebsstrategie des Fahrzeugs ist somit mitbestimmend für die eingesetzte Symmetrierung. Im Versuchsfahrzeug cityEL treten nur geringe Ladeströme von bis zu 70 A auf. Für diesen Fall reicht der dargestellte R6=3 Ω zur Symmetrierung vollständig aus.

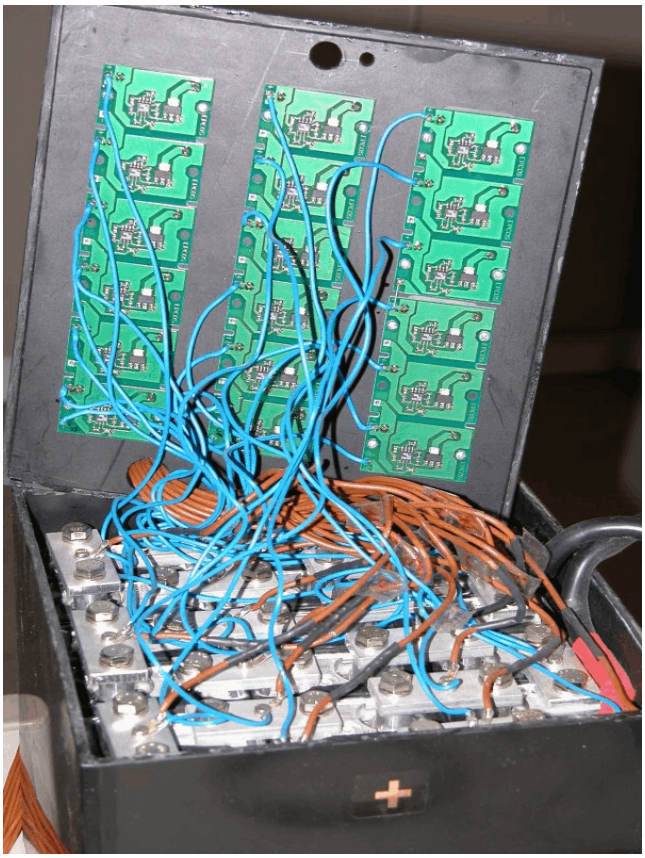


***Abb. 6.8**: Ultracapmodul 42 V/67 F mit aktiver Symmetriereinheit*

Im Boostbetrieb mit einer Erwärmung der Ultracaps in den Grenzbereich herein muss im Energiemanagementsystem eine Funktion implementiert werden, welche anhand der Modultemperatur der Ultracaps, des Ladezustandes sowohl der Ultracaps als auch der Batterie, der Geschwindigkeit des Fahrzeugs und der Fahrweise die Belastbarkeit der Ultracaps bestimmt.

6.2 Betriebsstrategien des hybriden Energiemanagements

In Abschnitt 6.1.1 wurden bereits zwei mögliche Verfahren der Kopplung von Batterie und Ultracap an den Antrieb vorgestellt. Denkbare Strukturen sollen hier näher erläutert werden. In der ersten Variante soll die Batterie nur den mittleren benötigten Strom zur Verfügung stellen. Alle Formen von Spitzenlast (charge und discharge) werden durch den Ultracap übernommen. [Dix00] stellt ein entsprechendes System vor, die grundsätzliche Struktur ist in **Abb. 6.9** dargestellt.

Liefert der Ultracap Strom, so wird der Leistungsschalter T2 getaktet und liefert Strom für den Antrieb oder die Batterie. Zum Laden des Ultracap wird entsprechend T1 getaktet. In diesem Fall wird der Ultracap bis maximal zur Batteriespannung aufgeladen, was bei geeigneter Wahl der Anzahl der in Reihe geschalteten Zellen einen gewissen Schutz vor Überladung der Ultracaps bietet. Nachteilig an der Schaltung ist die Tatsache, dass die Ladung des Ultracaps über einen Abwärtssteller realisiert ist. Im Betrieb hat die Batterie eine relativ niedrige Spannungslage, so dass die den Ultracaps theoretisch entnehmbare Energie mit

$$W = \frac{1}{2} CU^2 \qquad \textbf{(6.1)}$$

relativ gering ist. Prinzipiell können die Ultracaps so dimensioniert werden, dass im Volllladezustand eine höhere Spannung als die Gasungsspannung der Batterie erreicht ist. Die eingespeicherte Energie ist dann deutlich höher, zum Laden der Ultracaps wird jedoch ein Aufwärtswandler benötigt.

Stellt das Energiemanagement in einem System nach **Abb. 6.9** ein Zusammenbrechen der Batteriespannung fest, so wird von einer Beschleunigung ausgegangen und der Ultracap wird per Boost-Modus entladen. Ein signifikanter Anstieg der Batteriespannung deutet dagegen auf Rekuperation hin, so dass via Buck-Modus Energie in die Ultracaps eingespeichert wird.

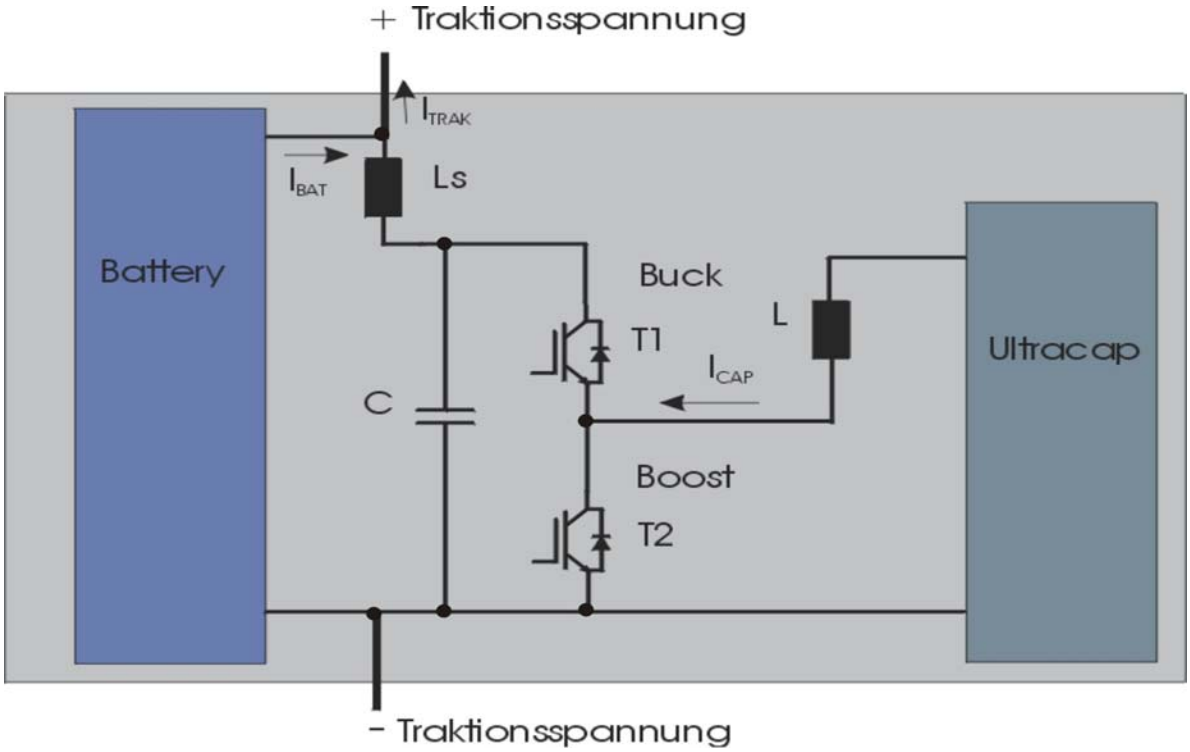


***Abb. 6.9**: Grundprinzip der Kombination von Batterie und Ultracap mit Ucap<Ubat [Dix00]*

Der Ladezustand kann daneben noch geschwindigkeitsabhängig kontrolliert werden. Niedrige Geschwindigkeiten bedingen eine Nachladung des Ultracaps, da demnächst wahrscheinlich ein Beschleunigungsvorgang ansteht. Dagegen führen höhere Geschwindigkeiten aufgrund einer wahrscheinlichen Verzögerung zu einer Entladung des Ultracaps, um im folgenden Rekuperationsvorgang Energie aufnehmen zu können. Es wurde bereits darauf hingewiesen, dass der DC-DC Wandler in dieser Struktur für hohe Leistungen ausgelegt werden muss, was zu höheren Systemkosten führt.

Eine ähnliche Struktur zeigt **Abb. 6.10**. Die Batterie versorgt den Antrieb mit einem maximalen Strom, der ca. 1,5 * I_{av} eines normalen Fahrzyklus entspricht. Zur Beschleunigung benötigte höhere Ströme werden durch eine additive Ankopplung des Ultracaps über einen DC-DC Wandler bereitgestellt. Der DC-DC Wandlers erhält als Führungsgröße den vom EMS bestimmten Wert des Entladestromes der Ultracaps. Diese Stromeinprägung sorgt für eine Belastung der Batterie mit dem Reststrom in der Größenordnung des im Zyklus auftretenden arithmetischen Mittelwertes des Antriebsstromes. Ein Nachladen des Ultracaps ist nur durch regeneratives Bremsen des Antriebs möglich. Der Boost-Converter ist dementsprechend so auszulegen, dass prinzipiell so hohe Ströme rekuperiert werden können, dass der Ultracap nach jedem Bremsvorgang vollgeladen ist.

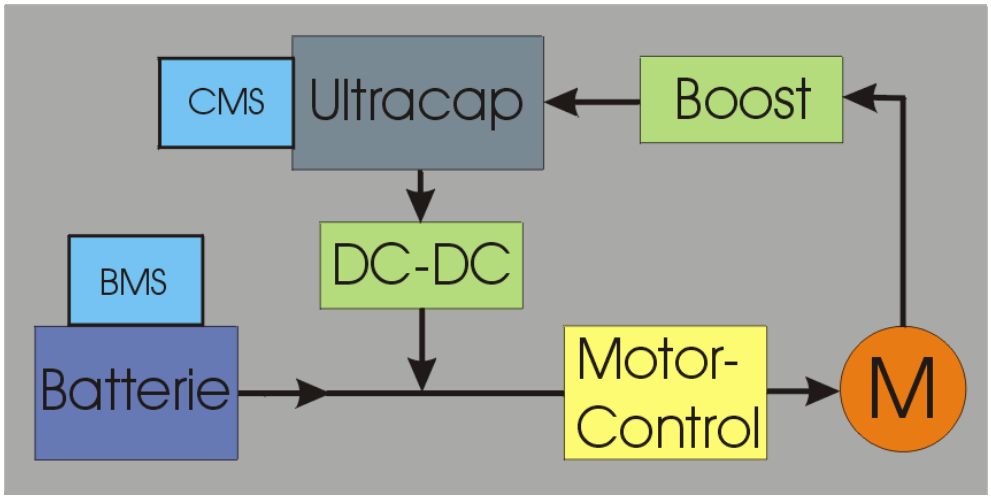


***Abb. 6.10**: Spitzenlast wird vom Ultracap bereitgestellt*

Im Gegensatz zum ersten Prinzip kann die Spannung des Ultracaps in dieser Struktur größer sein als die der Batterie. Der DC-DC Wandler kann im Prinzip unidirektional ausgelegt, wenn der Boost-Converter die hohen Leistungen zur Volladung des Ultracaps während der Bremsvorgänge bereitstellen kann. Andererseits muss der Ultracap so viel Energie gespeichert haben, dass nicht nur die reine Anfahrbeschleunigung aus dem Ultracap gefahren werden kann, sondern auch Zwischenbeschleunigungen während der Fahrt möglich sind. Diese Forderung läuft darauf hinaus den DC-DC Wandler bidirektional auszulegen, so dass der Ultracap während beschleunigungs- und verzögerungslosen Zeiten aus der Batterie nachgeladen werden kann. Der DC-DC Wandler und der Boost-Converter müssen wieder für hohe Leistungen ausgelegt werden, wodurch die Struktur gegenüber der Erstgenannten nur den Vorteil aufweist, dass Ucap > Ubat möglich ist. Problematisch ist auch hier, dass der Ultracap nicht zwangsweise für alle Beschleunigungen zur Verfügung stehen muss. Die Folge ist dann für den Fahrbetrieb ein nicht vorhersagbares Beschleunigungsverhalten des Fahrzeuges.

Eine dritte Struktur ist in **Abb. 6.11** gezeigt. Der prinzipielle Unterschied zu den ersten beiden Varianten ist der, dass zu jedem Zeitpunkt nur einer der beiden Energiespeicher mit der Antriebssteuerung verbunden ist. Eine ähnliche Variante wurde bereits im Abschnitt 3.2.3 für den ISG erläutert. Die Umschaltung zwischen den Energiespeichern erfolgt über Leistungshalbleiter. Die Philosophie ist wieder diejenige, dass Beschleunigungen aus dem Ultracap gefahren werden, während die Batterie in beschleunigungslosen Phasen die Energie bereitstellt und den Ultracap über einen DC-DC Wandler begrenzter Leistung aus der Batterie auflädt, sobald das Energiemanagementsystem die Ladung freigibt. Das EMS zeichnet vom BMS und dem CMS Daten auf und gibt Steuersignale an den Leistungsschalter, den DC-DC Wandler und den Boost-Converter. Die Vermeidung großer Ausgleichsströme nach dem Umschalten aufgrund unterschiedlicher Spannungslevel zwischen dem Energiespeicher und der Eingangskapazität des Stellers wird durch soft-switching erreicht, indem zwischen den Energiespeichern umgeschaltet wird.

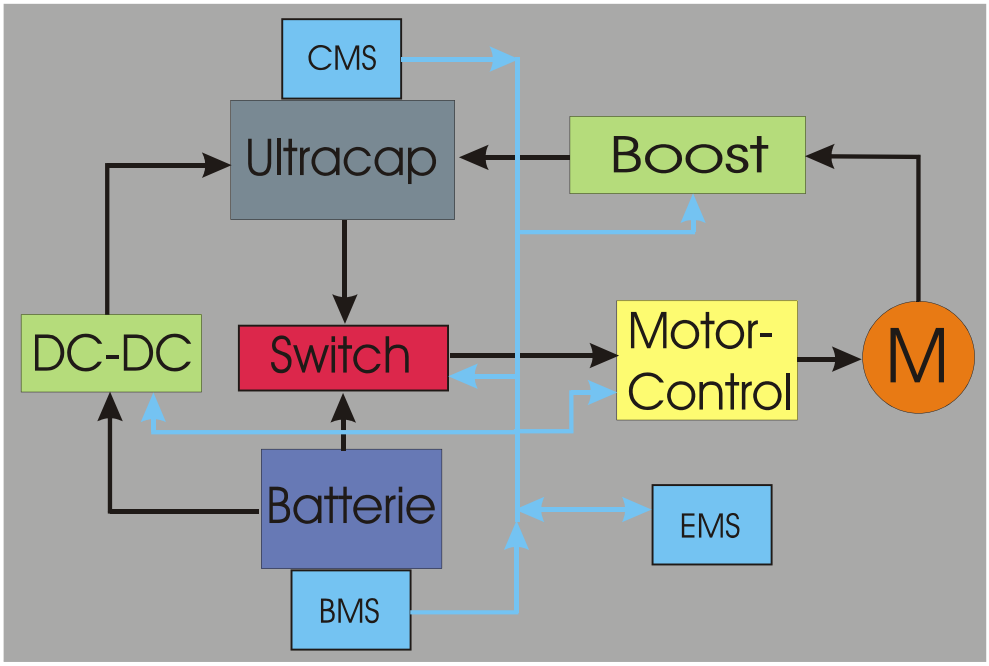


***Abb. 6.11**: Umschaltung zwischen Batterie und Ultracap*

6.3 Systemauslegung

Im Abschnitt 6.1.2 wurden typische Lastprofile eines cityEL im innerstädtischen Betrieb dargestellt. Daraus erkennbar ist das zyklische Auftreten von Beschleunigungsphasen mit einer typischen Dauer von <15 s mit maximalem Strom von 130 A. Der Fahrstrom des ausbeschleunigten Fahrzeugs kann mit ca. 60 A angenommen werden. Beschleunigungen aus dem Stand heraus finden in Abständen größer 60 s statt. Von den im Abschnitt 6.2 gezeigten prinzipiellen Varianten wird die letztgenannte Struktur für die vorgesehene Applikation realisiert. Die einzelnen Komponenten müssen entsprechend dem typischen Lastprofil angepasst werden. Realisiert man ein Energiemanagement basierend auf der Umschaltung zwischen zwei Energiespeichern, so verändern sich die Energietransporte im Fahrzeug. **Abb. 6.12 links** zeigt den Betrieb als reines batteriebetriebenes Elektrofahrzeug, während **Abb. 6.12 rechts** die hybride Struktur mit den Ultracaps, regenerativem Bremsen und Nachladung der Ultracaps aus der Batterie darstellt.

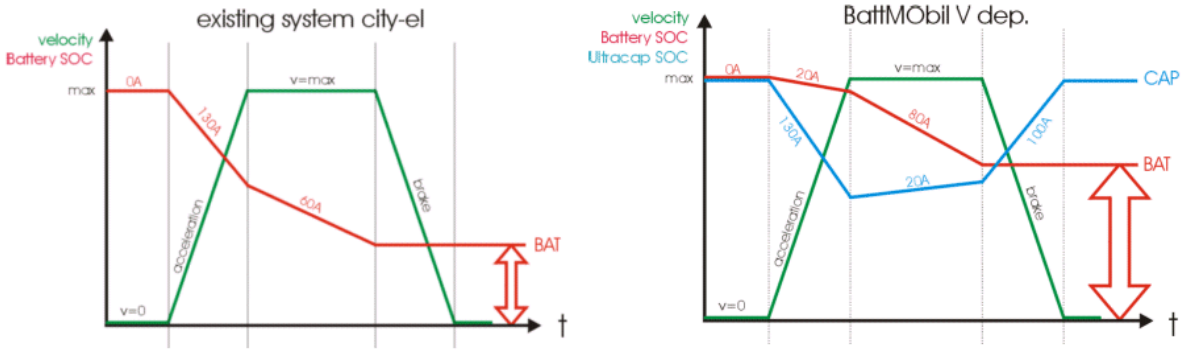


***Abb. 6.12**: Energieflüsse bei reinem Batteriebetrieb und mit Ultracaps*

Im Labor wurden unterschiedliche Lastprofile einer Batterie untersucht. Aus **Abb. 6.13** geht hervor, dass bei Belastungen mit identischem arithmetischem Mittelwert des Stromes eine Belastung mit konstantem Strom die höchste entnehmbare Ladungsmenge vor dem erstmaligen Erreichen der Entladeschlussspannung aufweist. Der Betrieb des reinen Elektrofahrzeuges mit einer Abdeckung aller Lastmomente durch die Batterie resultiert dagegen in der niedrigsten, ohne Leistungsbegrenzung entnehmbaren Energie.

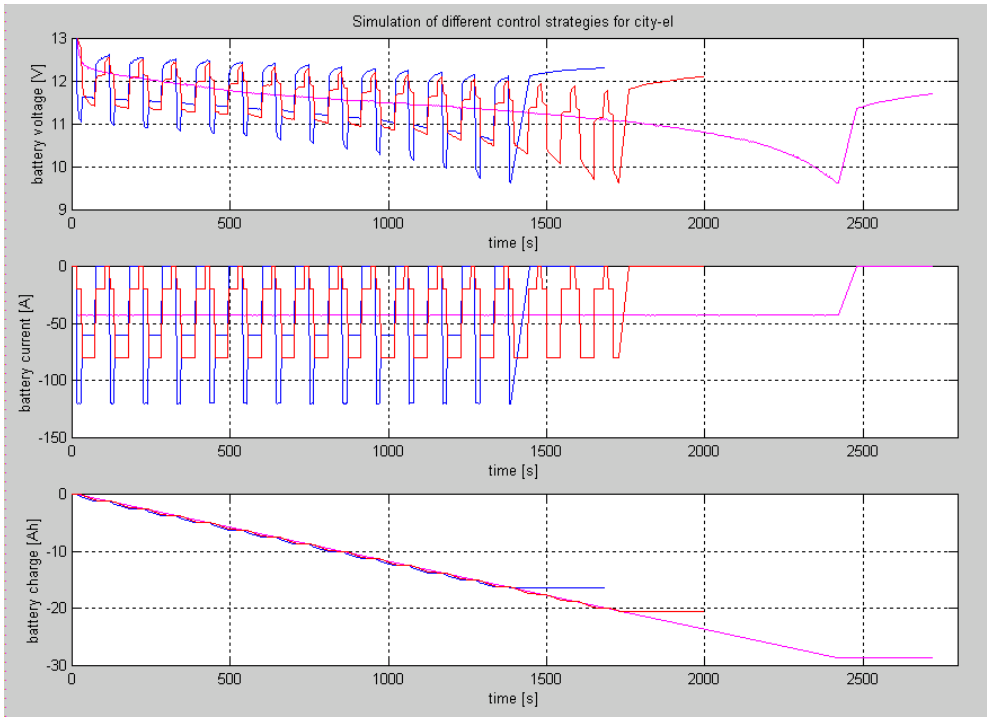


***Abb. 6.13**: Entladeverhalten Bleibatterien mit jeweils Iav = 45A und unterschiedlichen Pulsmustern (margenta: Konstantstrom-entladung, rot: Pulsentladung mit Imax = 80 A, blau: an Lastprofil CityEL angenäherte Pulsentladung*

Die blaue Kurve entspricht einem rein batteriegespeisten Zyklus, die rote Kurve soll dem Batteriestrom im hybriden Antriebskonzept mit Ultracaps entsprechen. Da die Beschleunigungsspitzen aus den Ultracaps gefahren werden, ist die Dynamik des Lastprofils der Batterie im hybriden System deutlich geringer als im Batteriebetrieb. Angestrebt wird eine Konstantstromentladung der Batterie. Die bis zur notwendigen Leistungsbeschränkung wegen des erstmaligen Erreichens der Entladeschlussspannung entnehmbare Batteriekapazität ist für alle getesteten Batterietypen im hybriden System unter der Zugrundelegung der gezeigten Zyklen ca. 25 % höher als im reinen Batteriebetrieb des Fahrzeugs. Labortests an 6 V/160 Ah Blei-Gel Batterien haben außerdem gezeigt, dass hochdynamisch zyklierte Batterien deutlich schneller altern als mit durchschnittlichen Strömen getestete Batterien.

Es wurden im Laborbetrieb unterschiedliche Kombinationen aus Ultracapkapazität und DC-DC-Wandler mit Daten aus dem realen Fahrbetrieb untersucht. **Abb. 6.14** zeigt die Versuchsergebnisse der Variation jeweils eines Parameters bei gleichem Zyklus. Der Stromverlauf wurde vom Fahrzeugdiagnoserechner direkt in den Leistungsprüfstand eingespeist.

Vergleicht man die drei linken Kurvenverläufe mit den drei rechten Darstellungen, so erkennt man, dass in den linken Darstellungen prinzipiell länger aus dem Ultracap gefahren werden kann. Der Unterschied in der Versuchsdurchführung besteht darin, dass während der linken Zyklen der DC-DC Wandler immer dann eingeschaltet wurde, wenn die Ultracaps nicht auf die maximale Spannung aufgeladen waren, also auch bereits während der Entladung der Ultracaps aufgrund abgeforderter Lastspitzen. In den rechten Diagrammen wurden die Ultracaps nur geladen, wenn ein Laststrom $I_{Last} < 75$ A vorlag, also sowieso schon aus der Batterie gefahren wurde. Das Nachladen der Ultracaps bereits während der Entladung selbiger führt faktisch zu einer Aufteilung des Laststromes, da der Nachladestrom aus der Batterie kommt. Dieses Verfahren wirkt erstmal vorteilhafter für das Ultracapmodul, da es prinzipiell wieder nur Spitzenlasten übernimmt und daher eine höhere Verfügbarkeit aufweist. In den oberen Diagrammen wurde das Ultracapmodul mit einem Ladestrom von 20 A geladen, in den mittleren Diagrammen mit 40 A und in den unteren beiden Diagrammen mit 60 A. Am Verlauf der Batteriespannung ist erkennbar, dass die Verfügbarkeit der Ultracaps mit zunehmendem Nachladestrom zunimmt. Hier ist in späteren Messreihen der Kompromiss aus Verfügbarkeit, Kosten und Bauvolumen zu finden.

Es wird in folgenden Messungen nur der Ansatz verfolgt das Nachladen über den DC-DC Wandler bereits dann zu starten, wenn die Spannung unterhalb der Maximalspannung ist und die Antriebsleistung aus dem Ultracap bereitgestellt wird.

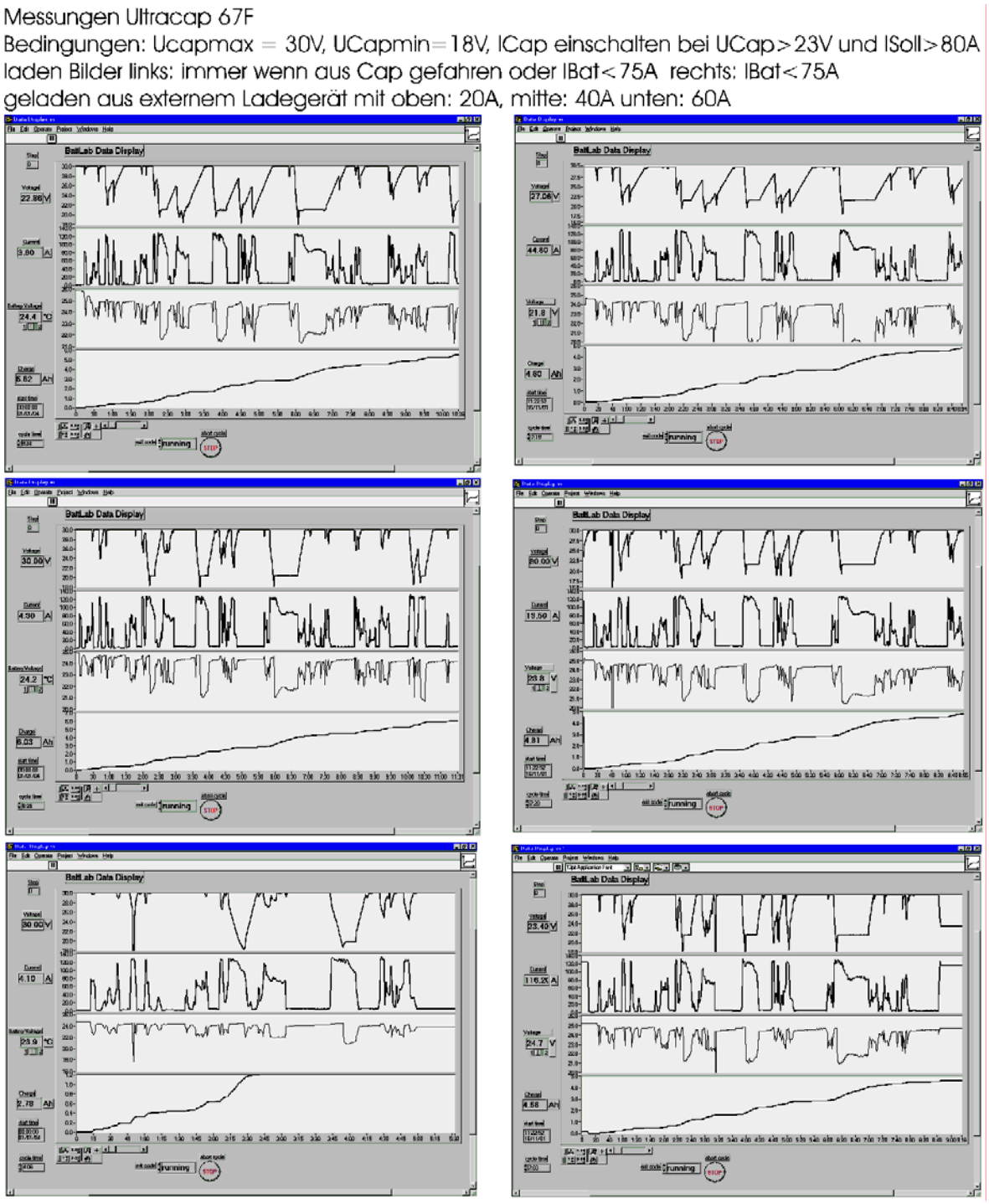


***Abb. 6.14**: Vergleich unterschiedlicher Ladeströme und Ladestrategien und deren Auswirkung auf die Verfügbarkeit des Ultracaps zur Abdeckung der Lastspitzen (von oben nach unten: Spannung Ultracap, Laststrom, Batteriespannung, umgesetzte Ladung).*

In einer weiteren Messreihe sollte das System qualitativ beurteilt werden. Es sollte festgestellt werden, wie eine Kombination aus Ultracap und DC-DC Wandler prinzipiell dimensioniert werden muss. Dazu wurden zwei 42 V Module untersucht (67 F und 134 F). Diese Module wurden mit unterschiedlichen Strömen aus einem externen Netzgerät nachgeladen. Das bedeutet, dass die Ultracaps bereits während der Entladung nachgeladen wurden. Da der Nachladestrom nicht aus der Batterie, sondern aus Netzgeräten entnommen wurde, liegt in diesem Fall keine reale Simulation des Energiespeichers im Fahrzeug vor. Aufgrund der Beschränkung der eingesetzten Stromsenke auf maximal 4 kW Leistung wurden die Ultracaps nicht wie im Fahrzeug zwischen 42 V und 30 V zykliert, sondern zwischen U_{max} = 30 V und U_{min} = 18 V. Der Spannungshub ist identisch, so dass aussagekräftige Werte entstanden. Als Batterie wurden zwei Module mit12 V/50 Ah eingesetzt. Die Stromsenke als Last wurde mit vorher im Fahrzeug aufgezeichneten Fahrdaten gespeist.

Die Strategie kann dabei so definiert werden, dass die Grundlast des Fahrzeugs aus der Batterie entnommen wird und die zusätzliche Spitzenlast aus den Ultracaps bereitgestellt wird. Bis zum als ‘Switchlevel’ bezeichneten Strom wurde aus der Batterie gefahren, darüber wurde auf den Ultracap geschaltet, wenn die Spannung am Ultracapmodul im Einschaltaugenblick mindestens bei U_{min}+5V liegt.

Die erste Spalte zeigt die Nennkapazität des gewählten Moduls, dann folgen das Umschaltlevel zwischen Ultracap und Batterie, der Ladestrom der Ultracaps, die gesamte im Zyklus entnommene Ladung, die in Schalterstellung Batterie entnommene Ladung, die in Schalterstellung Ultracap entnommene Ladung, die bei Lastströmen >80 A in Schalterstellung Batterie entnommene Ladung, die bei Lastströmen >80 A in Schalterstellung Ultracap entnommene Ladung und daraus berechnete statistische Werte. Die Ergebnisse zeigen bereits sinnvolle Kombinationen aus Ultracapkapazität, Nachladestrom und Leistungsanforderungen des Antriebs.

***Tab. 6.2**: Versuche zur Systemauslegung*

C [F]	Swlvl [A]	I Lade	Dauer m:s	Ccyc [Ah]	aus Bat [Ah]	aus Cap [Ah]	aus Bat bei Iges>80A =B80 [Ah]	I Cap bei Iges>80A =C80 [Ah]	ausBat/Ccyc =Bpr	aus Cap/Ccyc =Cpr	Cpr/Bpr	C80/B80
67	40	40	12:34	7,91	3,03	4,88	1,68	3,07	0,383	0,617	1,609	1,831
67	40	60	12:34	7,86	2,27	5,59	0,99	3,76	0,288	0,712	2,468	3,804
67	40	20	12:34	7,95	4,57	3,38	2,75	2,00	0,575	0,425	0,740	0,728
67	60	20	12:34	7,95	4,83	3,13	2,47	2,28	0,607	0,393	0,648	0,921
67	80	20	12:34	7,96	5,48	2,48	2,27	2,48	0,689	0,311	0,452	1,091
67	60	40	12:34	7,95	3,69	4,26	1,63	3,12	0,464	0,536	1,156	1,916
67	80	40	13:05	8,30	4,87	3,44	1,60	3,44	0,586	0,414	0,706	2,142
134	40	40	12:34	7,96	1,53	6,43	0,22	4,53	0,192	0,808	4,208	20,380
134	40	20	12:34	7,96	3,88	4,07	2,09	2,66	0,488	0,512	1,048	1,269
134	60	20	19:52	13,81	8,16	5,65	4,10	4,55	0,591	0,409	0,693	1,111
134	60	40	19:52	13,80	4,40	9,40	0,82	7,83	0,319	0,681	2,138	9,568
134	60	30	19:52	13,80	6,02	7,78	2,21	6,44	0,436	0,564	1,292	2,914
134	40	30	19:52	13,99	5,71	8,28	2,61	6,06	0,408	0,592	1,452	2,322
134	40	40	19:52	13,81	3,74	10,07	1,03	7,62	0,271	0,729	2,689	7,434

Aussagekräftiger als die Tabelle sind noch die aufgezeichneten Kurvenverläufe der einzelnen Messreihen. Dabei wird trotz der Vernachlässigung der Ladeströme des Ultracaps anhand der Spannungsverläufe von Ultracapmodul und Batteriemodul deutlich, wann die Batterie nur minimale Anteile der Spitzenlast des Antriebs abdecken muss. Es handelt sich dabei um die in Tab. 6.2 farbig dargestellten Messreihen. Dazu werden noch die Reihen mit dem schlechtesten Wert C80/B80 jeder Kapazität zur Verdeutlichung hinzugefügt. **Abb. 6.15** zeigt das 134 F-Modul bei einem DC-DC Ladestrom von 40 A, was dem arithmetischen Mittelwert des Laststromes entspricht. Bei Lastströmen >40 A wurde der Ultracap auf die Last geschaltet. Die Abbildung entspricht der blauen Messreihe der obigen Tabelle. Es ist zu erkennen, dass der Ultracap nur ein einziges Mal so weit entladen ist, dass die Last während einer Hochstromphase aus der Batterie versorgt werden muss.

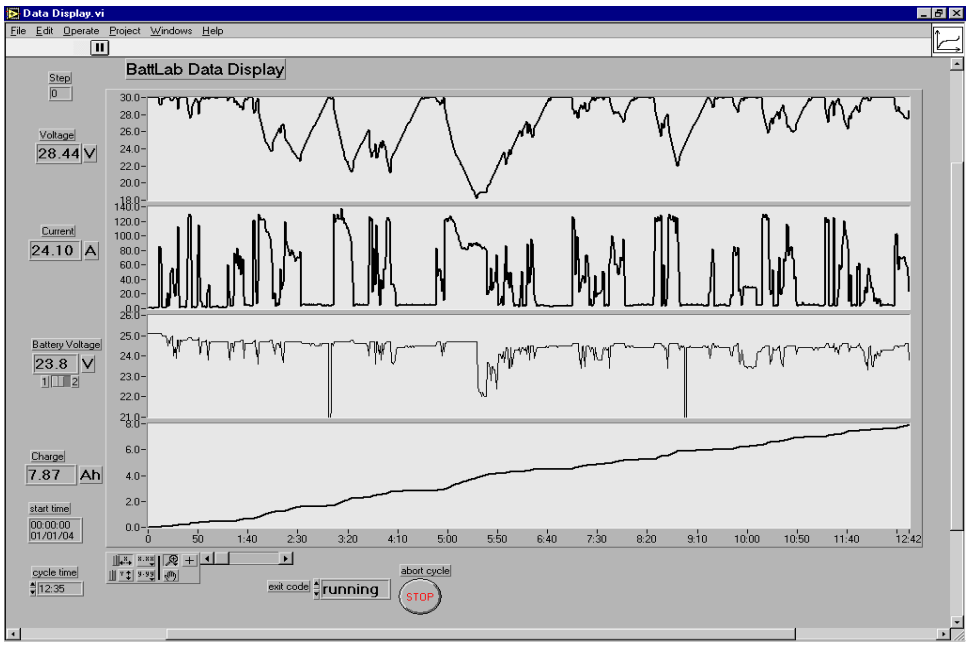


***Abb. 6.15**: 134F Modul; DC-DC Ladestrom 40 A; Switchlevel 40 A*

Dagegen veranschaulicht **Abb. 6.16** mit einer Kapazität von 67 F und einem DC-DC Ladestrom von nur 20 A das andere Extrem. Wie zu erkennen ist, kann das Ultracap-Modul sehr schnell vollgeladen werden (genauso wie das 134 F/42 V Modul mit einem Ladestrom von 40 A in **Abb. 6.15**), kann aber die auftretenden Spitzenlasten, durch deren Impulslänge bedingt, nicht vollständig versorgen. Die Batterie wird nur wenig entlastet, da sie andauernd Spitzenlasten selbst übernehmen muss. Abhilfe schafft hier ein in der Leistung deutlich gesteigerter DC-DC-Wandler, der das Ultracap-Modul mit 60 A nachladen kann, siehe grüne Zeile der **Tab. 6.2**. Die unverhältnismäßig hohen Kosten eines solchen DC-DC-Wandlers lassen diesen Ansatz nicht automobilgerecht erscheinen.

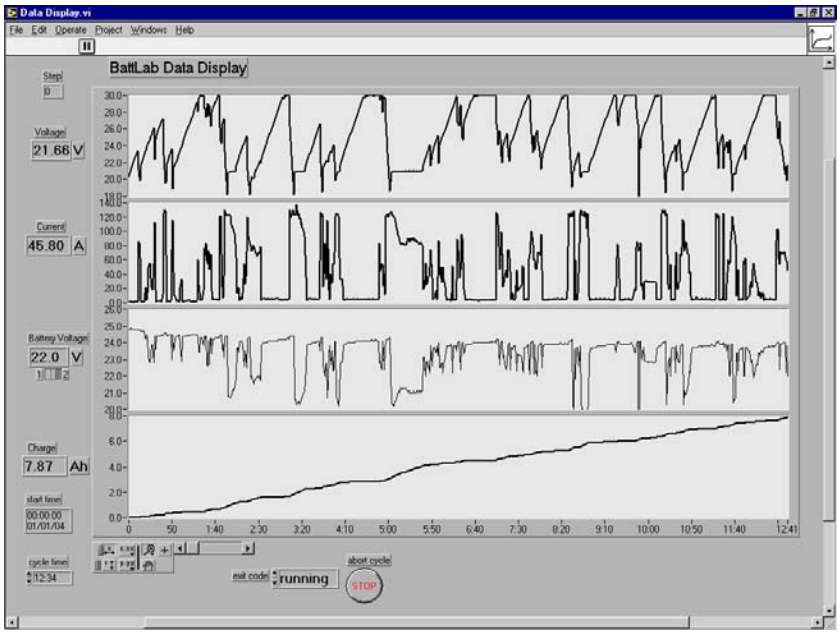


***Abb. 6.16**: 67 F ; DCDC Ladestrom 20 A*

In **Abb. 6.17** wurde im Gegensatz zu **Abb. 6.15** das Schaltlevel von 40 A auf 60 A angehoben. Das bedeutet, dass alle Lasten bis 60 A aus der Batterie gespeist werden, nur darüber wird auf den Ultracap umgeschaltet, die Messung entspricht der viertletzten Reihe (rot). Es ist erkennbar, dass die Welligkeit der Batteriespannung ansteigt. Aufgrund des Lastprofils wird der Ultracap bei dieser Anhebung des Switchlevels nicht in seiner Verfügbarkeit erhöht, die Batterie muss jedoch höhere Lasten übernehmen.

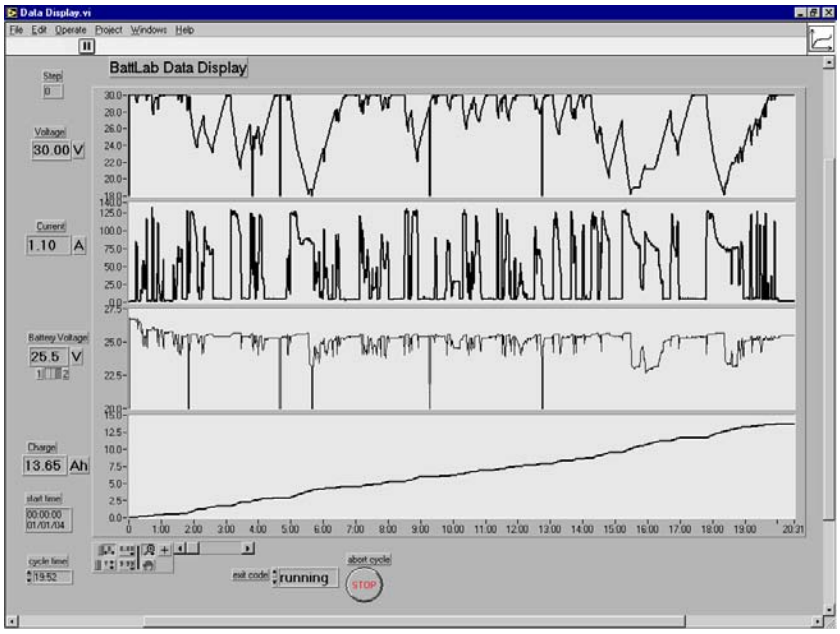


***Abb. 6.17**: 134 F; DC-DC Ladestrom 40 A; Switchlevel 60 A*

Die Aussagekraft der aufgezeichneten Messreihen ist jedoch beschränkt. Legt man einer Messreihe wie in **Abb. 6.18** gleiche Dimensionierungs- und Schaltbedingungen wie in **Abb. 6.15** zugrunde, so sind die erzielten Ergebnisse der Verfügbarkeit des Ultracaps vom Lastprofil abhängig. Es können aus den Messreihen jedoch Erkenntnisse gewonnen werden, die die Systemauslegung bestimmen. Die langen Beschleunigungsspitzen zum Ende der Messreihe senken die Verfügbarkeit des Ultracaps in der statistischen Auswertung bereits stark. Die Zugrundelegung eines Normzyklusses, z.B. ECE15, würde die Ergebnisse auch nur pseudo-objektivieren, da der Zyklus keine realen Fahrbedingungen aufgreift.

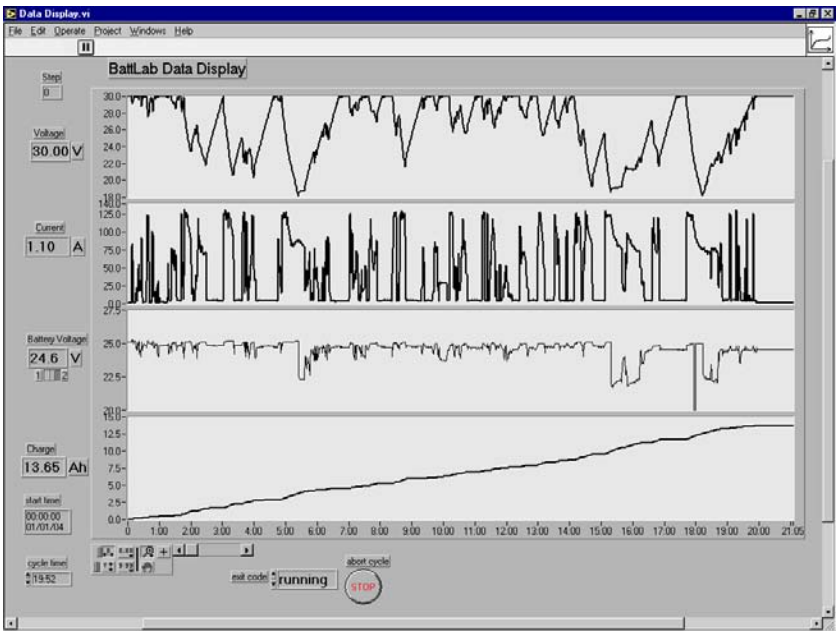


***Abb. 6.18**: 134 F ; DC-DC Ladestrom 40 A; Switchlevel 40 A-wie Abbildung 19, jedoch Zyklus länger*

Abhängig vom Switchlevel wird die Batterie in unterschiedlicher Dynamik belastet. Dabei liegt jedoch die gleiche Verfügbarkeit des Ultracaps vor. Aufgrund der vorliegenden Daten wird der Ultracap mit einer Kapazität von 134 F gewählt. Gegenüber dem 67 F Modul erhält man deutlich längere Stützzeiten. Die Nachladung des Ultracaps aus der Batterie wird so gesteuert, dass eine Nachladung immer dann erfolgt, wenn der Leistungsschalter den Ultracap auf den Antrieb schaltet und seine Spannung kleiner der Spannung U_{capmax} ist. Der Nachladestrom wird mit 40 A festgelegt. Treibt die Batterie den Antrieb, dann wird nur nachgeladen, wenn der Batterie ohne Nachladung des Ultracaps weniger als 20 A entnommen werden. Die Batterie wird in diesem Fall in der Regel nicht mit Strömen >60 A belastet.

6.4 Hardwarekomponenten

Zur Reduktion der Systemkosten der Elektronik wurden bei dem System in **Abb. 6.11** Funktionen des Batteriemanagements und des Ultracapmanagements in das Energiemanagement verlagert, was resultierend zu einer Struktur führt, wie sie in **Abb. 6.19** dargestellt ist. Die Energiemanagementeinheit besteht aus den bereits beschriebenen Komponenten der Microcontrollereinheit (EMS-MCU) und der Datenerfassungseinheit (EMS-DAQ). Die Hardware des EMS ist auf der Seite der EMS-MCU mächtig genug, um in unabhängigen Tasks die Funktionen BMS, CMS und Energy Flow Management (EFM) ausführen zu können.

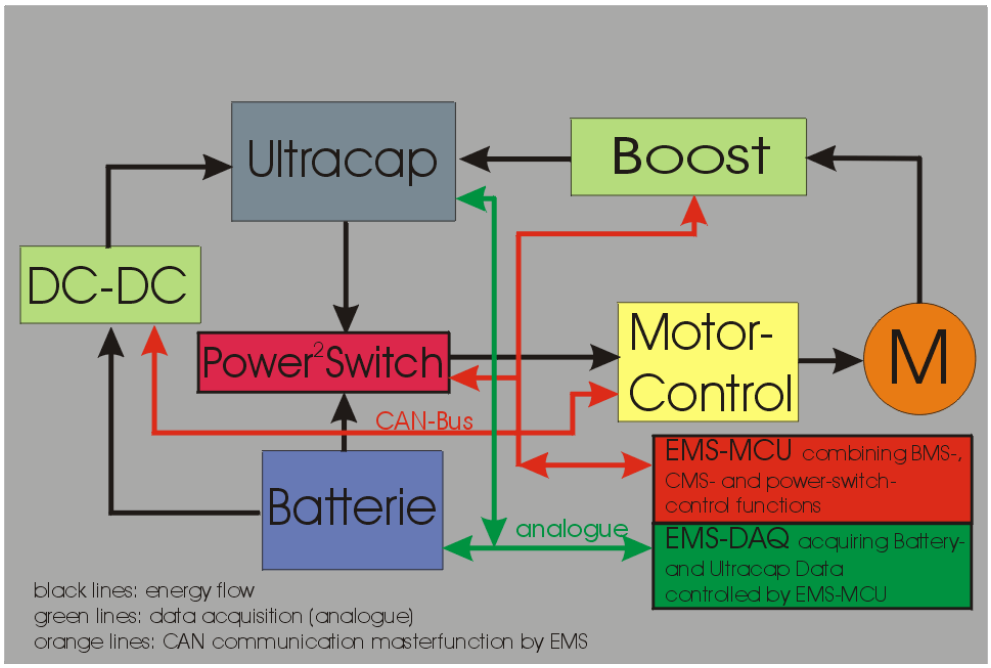


***Abb. 6.19**: Struktur des Energiemanagements im city-el*

Die Spannungsversorgung der in **Abb. 6.20** dargestellten EMS-MCU erfolgt über einen Abwärtswandler aus der Traktionsbatterie. Der TC1775 verfügt bereits über ein Twin-CAN-Interface, so dass nur noch die Transceiverbausteine als externe Peripherie benötigt werden. Alle Messdaten und Fehlermeldungen bleiben im Gerät gespeichert und sind über CAN auslesbar.

Abb. 6.20: *EMS basierend auf TC1775A*

Das DAQ-Modul übernimmt die Datenvorverarbeitung für die 32 internen AD-Kanäle und stellt zusätzlich Wandler mit höherer Auflösung über die synchrone serielle Schnittstelle (SSC) zur Verfügung. Das Grundprinzip wurde im Kapitel 5 bereits erläutert.

Die Wandlung des Laststroms erfolgt über einen LEM-Wandler mit nachgeschaltetem externen AD-Wandler, der über die SSC angesprochen wird und mit einer Auflösung von 16-Bit arbeitet. Das Prinzip ist in **Abb. 6.21** dargestellt. Die Referenzspannung des externen Wandlers kann auf einen der AD-Eingänge des TC1775 zurückgeführt werden, so dass zum Beispiel eine Temperaturkompensation der Referenzspannung mittels Software erfolgen kann. Über einen Multiplexer können mehrere analoge Signalquellen auf den externen AD-Wandler geschaltet werden, so dass auch beim Einsatz in Hybridfahrzeugen unterschiedliche Ströme im System (z.B. von Batterie, Ultracaps, DC-DC-Wandler) erfasst werden können. Prinzipiell ermöglicht der externe AD-Wandler Wandlerraten von 100 kHz, so dass selbst Strangströme im Drehstromantrieb erfasst werden könnten. Bei zugelassenen Strömen von ±600 A erhält man ohne aufwendige Bereichsumschaltung eine rechnerische Auflösung von 18 mA/digit.

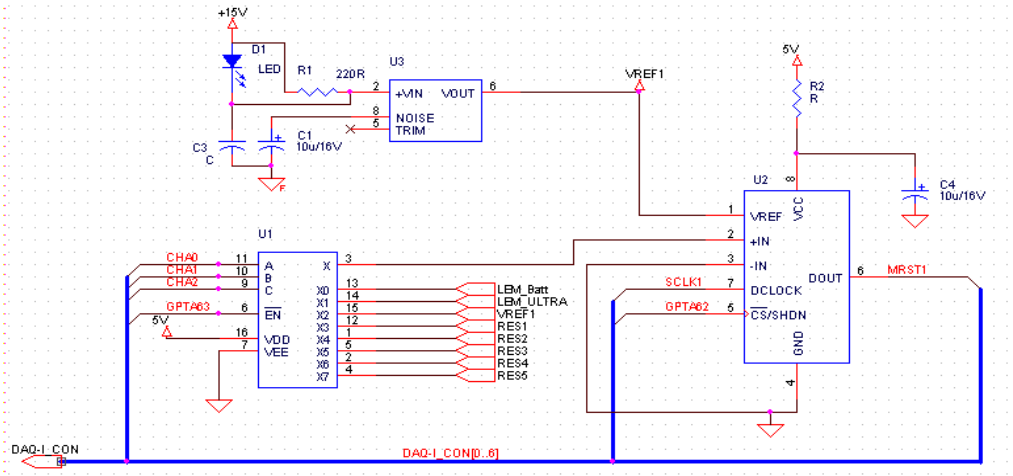


Abb. 6.21*:* *Prinzipielle Schaltung zur Bestimmung der Systemströme DAQ-I*

Alle analogen Multiplexer-Eingangssignale sind bereits gefiltert.

Alle im Fahrzeug anfallenden Messdaten können gespeichert werden. Dabei ist es nicht zwangsweise sinnvoll alle Daten zu protokollieren. Zu diesem Zweck kann eingestellt werden, welche Protokollidentifier abgespeichert werden. Diese Identifier sind jederzeit über einen PC editierbar. Die Daten der Batterie- und Ultracapspannung sowie des Stromes werden im Fahrzeug visualisiert.

Der DC-DC Wandler wurde als kombinierter Aufwärts-Abwärts-Wandler nach **Abb. 6.22** konzipiert. Im Falle von $U_{\min} \leq U_{cap} < U_{bat}$ arbeitet er als Abwärts-Wandler, um dann bei Spannungen des Ultracaps im Bereich $U_{bat} \leq U_{cap} < 48V$ als Aufwärts-Wandler zu arbeiten. Das Prinzip des DC-DC Wandlers zeigt **Abb. 6.22**. Der Ladestrom des Ultracaps wird über einen LEM-Wandler bestimmt.

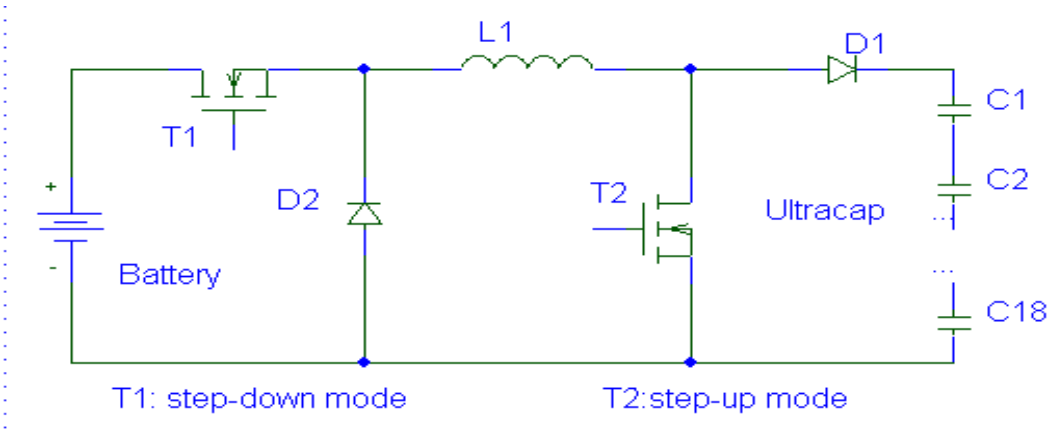


***Abb. 6.22**: Prinzip des entwickelten DC-DC-Wandlers*

Der DC-DC Wandler wird über den CAN-Bus aktiviert bzw. deaktiviert. Eine Zeitüberwachung erkennt den Ausfall der Kommunikation und schaltet den DC-DC Wandler ab, wenn keine Steuercodes vom EMS empfangen werden. Sollten die Spannungen der einzelnen Ultracapzellen kritische Werte erreichen, wird der DC-DC Wandler durch das EMS deaktiviert. Eine Rückführung der Gesamtspannung des Ultracaps garantiert eine Abschaltung des DC-DC Wandlers beim Erreichen der für den Ultracap kritischen Modulspannung von 48 V. Eine weitere Funktion erfüllt der DC-DC Wandler während der Ladung der Batterie. Vom EMS gesteuert wird eine Zwangssymmetrierung der Ultracapzellen initiiert. Diese arbeitet in Verbindung mit den beschriebenen aktiven Bypässen, die im Ultracap parallel an jeder Zelle verschaltet sind. Der DC-DC Wandler arbeitet in diesem Fall mit einem Ladestrom von I_{LCap} = 50 mA. Die Umschaltung erfolgt gesteuert durch das Energie-managementsystem.

6.5 Ergebnisse im Betrieb

Zur Bewertung des Antriebskonzeptes wurden Untersuchungen zur Bestimmung des Beschleunigungsverhaltens und der Reichweite im Labor und im Fahrzeug durchgeführt. Fahrzeugmessungen wurden mit verschiedenen Batterien sowohl unter sommerlichen Bedingungen bei einer Außentemperatur von 35 ˚C als auch im Winter bei -10 ˚C durchgeführt.

In realen Fahrten mit unterschiedlichen Batterien konnten die im Labor erzielten Erkenntnisse verifiziert werden. Es hat sich gezeigt, dass die geeigneteste Kombination, wie bereits in den Labormessungen festgestellt, die mit einem Ultracap mit einer Kapazität von 140 F/42 V_{nom} und einem DC-DC Wandlerstrom von 50 A ist. Der Strom des DC-DC Wandlers wurde im System so gewählt, dass er dem arithmetischen Mittelwert des Antriebsstromes entspricht. Im Fahrzeug wird der DC-DC Wandler bereits eingeschaltet, wenn der Ultracap den Antriebsstrang versorgt. In diesem Fall wird der Laststrom quasi additiv aus Batterie und Ultracap, aber auf dem Spannungsniveau des Ultracaps entnommen. Der Ultracap wird real mit maximal 80A entladen, so dass Beschleunigungen bis zu 20 s Dauer aus dem Ultracap möglich werden. Das Fahrzeug kann in dieser Zeit auf 95 % der Maximalgeschwindigkeit beschleunigt werden.

Das Fahrzeug weist über einen sehr weiten Bereich des SOC konstante Fahreigenschaften auf. Eine Rückkopplung auf den SOC der Batterie über das Fahrverhalten ist nicht gegeben. Der Ladezustand der Antriebsbatterie muss dem Fahrer permanent übermittelt werden, da der Entladeschluß der Batterie sich aufgrund der fehlenden Spitzenlast für die Batterie sehr kurzfristig bemerkbar macht.

Sommerbetrieb

Die Reichweite steigt fahrerbeeinflusst um 5 % bis 10 % und nimmt dabei durch den Einsatz der Ultracaps nicht in dem Maße zu, dass sich die Erhöhung der Kosten, des Gewichts und die Vergrößerung des Einbauvolumens in einem Mehrwert für den Fahrzeughalter niederschlagen.

Die Fahrleistungen des cityEL werden jedoch unabhängig von der gewählten Batterie stark verbessert. Sämtliche in der Einleitung in dieses Kapitel genannten Beschleunigungswerte werden um ca. 15% verbessert. Im Rahmen der Systemoptimierung durchgeführte Messungen haben ergeben, dass das Ultracapmodul problemlos mit bis zu 48 V betrieben werden kann. Da normale Beschleunigungen aus dem Stand heraus ca. 12 s andauern, wurde das EMS auf einen zu nutzenden Spannungsbereich des Ultracaps von 34 V...Ucap...48 V parametriert. Die Spannung des Ultracaps liegt damit im Mittel um ca. 7 V oberhalb der Batteriespannung, was einer durchschnittlichen Mehrleistung am Antrieb in Beschleunigungsphasen aus dem Stand von ca. 1 kW, entsprechend ca. 20 % bedeutet. Das Beschleunigungsverhalten des Fahrzeuges ist im reinen Batteriebetrieb sehr stark vom SOC der Antriebsbatterie abhängig. Diese Einschränkung entfällt hier, da selbst bei nahezu entladenen Batterien in Standzeiten eine Nachladung der Ultracaps gewährleistet ist. **Abb. 6.23** zeigt anhand des Spannungsverlaufes der Modulspannungen (obere Grafik), das das Fahrzeug batterieseitig nahezu mit Konstantstrom entladen wird. Nahezu alle Beschleunigungen werden aus dem Ultracap abgedeckt.

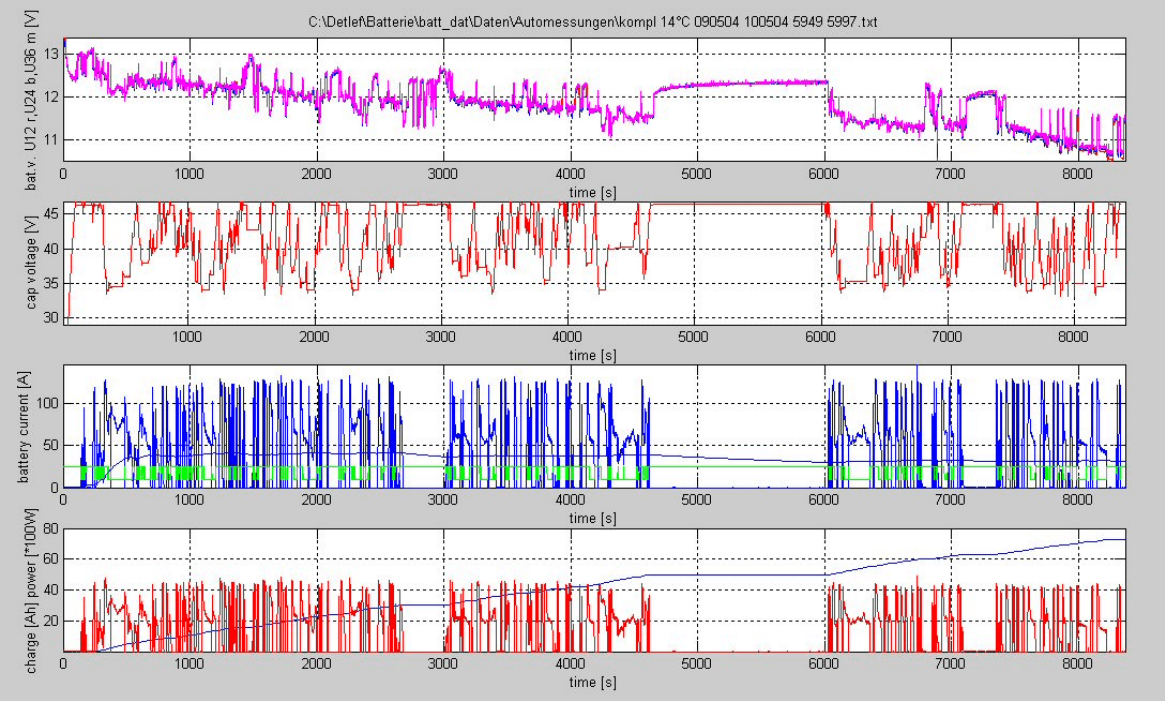


***Abb. 6.23**: Normaler Fahrzyklus mit dem hybriden System bei 2-stündiger Fahrt (von oben nach unten: Modulspannungen, Spannung des Ultracapmoduls, Laststrom und Durchschnittsstrom, Leistung (rot) und entnommene Ladung (blau)*

Ein wichtiger Nebeneffekt der Implementierung von Ultracaps in das Versuchsfahrzeug wurde bei den Labormessungen nicht betrachtet. Die Implementierung der zusätzlichen Komponenten führt zu einem signifikanten Mehrgewicht des Fahrzeuges. Für Beschleunigungsvorgänge wie bei reiner Batteriebestückung des Fahrzeugs wird mehr Leistung benötigt. Das erklärt den nur moderaten Anstieg der Reichweite bei power-assist Betrieb.

Studien von [Pic01] untersuchten den Einfluss der Erhöhung der Modulanzahl einer Batterie auf das Beschleunigungsverhalten und die Reichweite des Fahrzeugs und kommen zu den gleichen Ergebnissen wie diese Untersuchung.

Winterbetrieb

Es ist zu erkennen, dass der Ultracap trotz der dem Zyklus aufgezwungenen hohen Durchschnittslast nahezu ständig verfügbar ist. Das Spannungsprofil der Batteriemodule nähert sich wieder der Konstantstromentladung an. **Abb. 6.24** zeigt exemplarisch eine Testfahrt des kompletten Systems bei 2 ˚C mit offenen Bleibatterien vom Typ Deta 12 V/70 Ah.

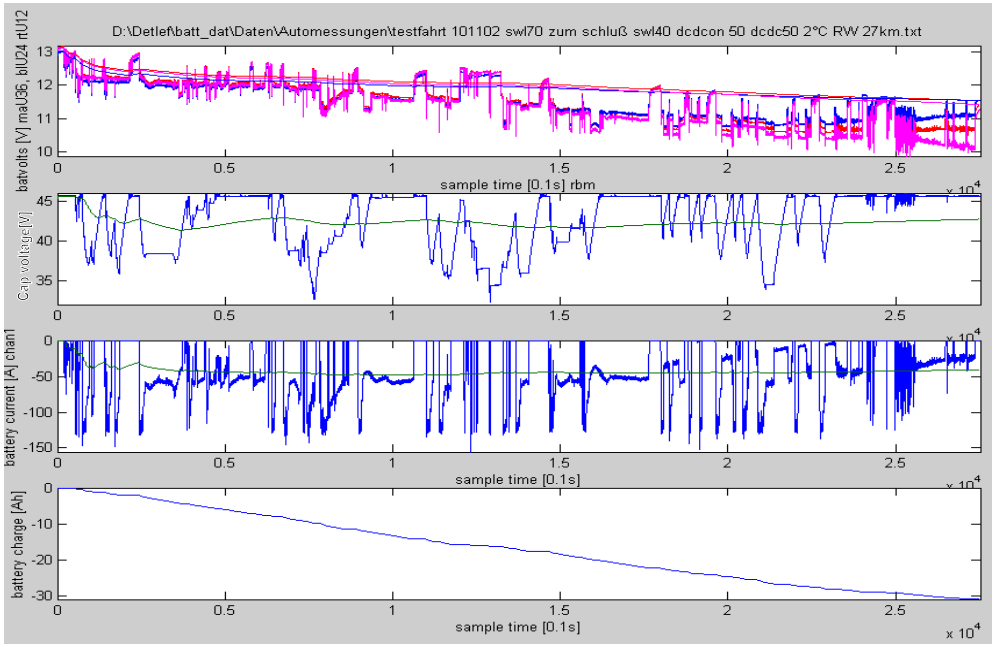


***Abb. 6.24**: Fahrt mit Deta 12 V/ 70 Ah bei 2 ℃ mit hybridem System (von oben nach unten: Modulspannungen, Spannung des Ultracapmoduls, Laststrom, entnommene Ladung)*

Gerade bei tiefen Temperaturen ist der Unterschied zum in **Abb. 6.25** dargestellten reinen batterie-elektrischen Fahren auf gleicher Strecke und bei gleichen Bedingungen offensichtlich.

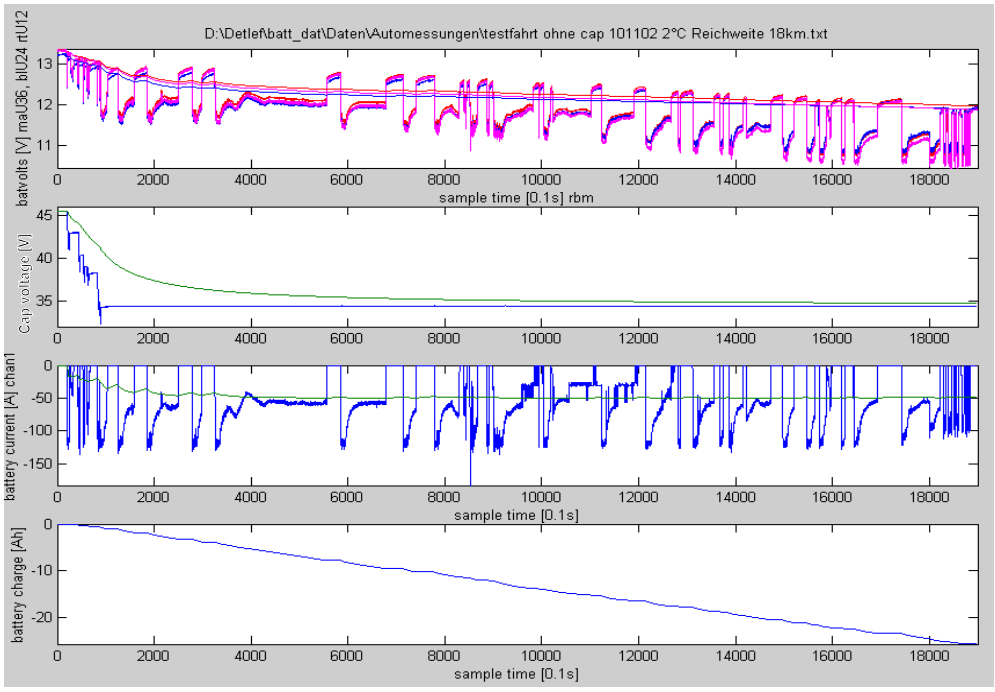


***Abb. 6.25**: Rein batterieelektrische Fahrt auf gleicher Strecke bei 2 ℃ (von oben nach unten: Modulspannungen, Spannung am Ultracapmodul, Laststrom, entnommene Ladung)*

Dieser Batterie kann in der hybriden Struktur ca. 25 % mehr Ladung entnommen werden, die Reichweite stieg im Winterbetrieb sogar um 50 %. Die Ursache dafür liegt in den deutlich verbesserten Fahrleistungen des hybriden Systems. Das erheblich verbesserte Beschleunigungsverhalten und das Ausbeschleunigen auf Höchstgeschwindigkeit (50 km/h) auch bei -10 ˚C (rein batterie-elektrisch sind bei -5 ˚C nur 42 km/h möglich) ermöglicht ein hervorragendes 'Mitschwimmen' im Verkehr und damit verbunden die Ausnutzung der 'grünen Welle', so dass eine deutlich bessere Nutzung der vorhandenen Energie gegeben ist.

In einer weiteren Versuchsreihe wurde im Winterbetrieb die Antriebsbatterie ausgetauscht. Das Zusatzgewicht des hybriden Systems sollte durch die Verwendung leichterer Batteriemodule kompensiert werden. Diese Module wiesen eine Kapazität von 50 Ah bei 5-stündiger Entladung auf und waren damit völlig unterdimensioniert. Die der Batterie entnehmbare Energie sinkt in diesem Fall dramatisch ab, real stehen wie in **Abb. 6.26** ersichtlich weniger als 10 Ah zur Verfügung, womit die Reichweite auf ca. 5 km limitiert ist und damit keine Alltagstauglichkeit mehr vorliegt.

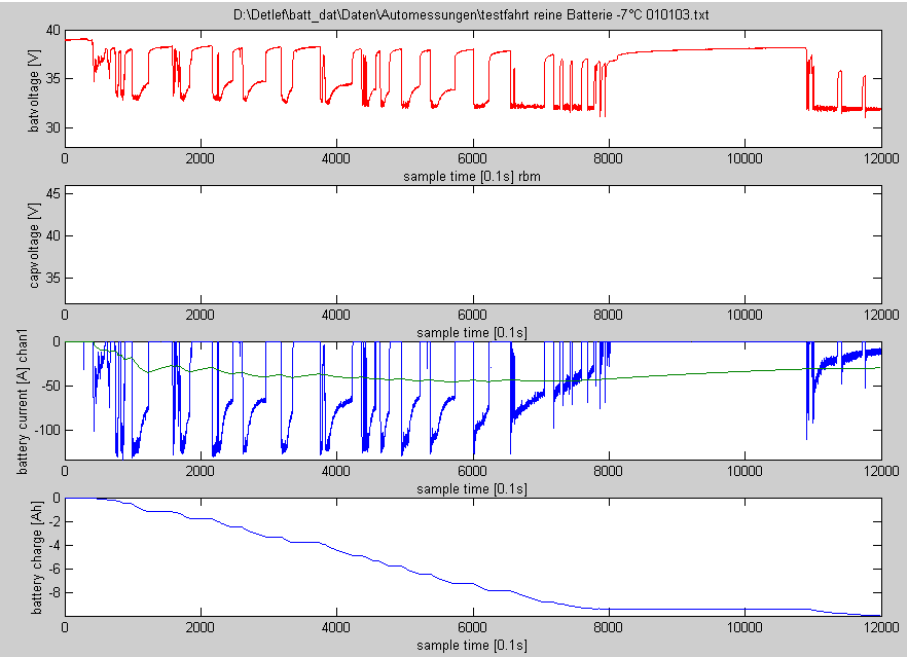


***Abb. 6.26**: Rein batterie-elektrisches Fahren bei -7˚C (Gesamtspannung, entladener Ultracap, Laststrom, entnommene Ladung)*

Unter gleichen äußeren Bedingungen wurde nach der erneuten Volladung eine Testfahrt mit dem kompletten EMS durchgeführt. Die Batterien und die Ultracaps waren auf Umgebungstemperatur abgekühlt. **Abb. 6.27** zeigt die Messergebnisse dieser Testfahrt unter gleichen Bedingungen (Strecke, Temperatur, Verkehrsdichte).

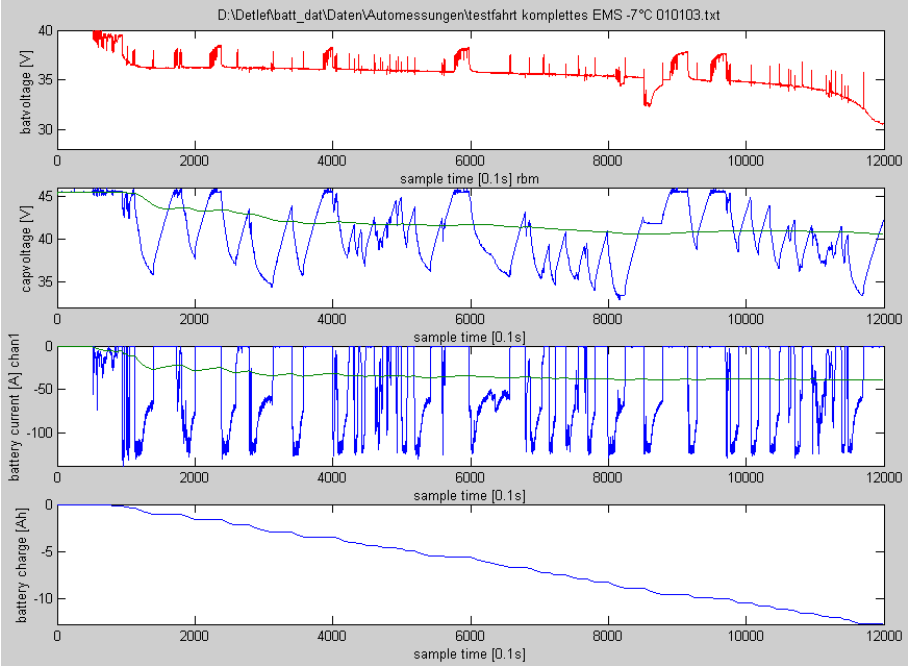


***Abb. 6.27**: Testfahrt mit komplettem EMS bei -7 ℃*

Es ist zu erkennen, dass die Batterie prinzipiell mit konstantem Strom entladen wurde. Die entnehmbare Ladung betrug im reinen Batteriebetrieb ca. 8,9 Ah. Mit EMS und Ultracaps waren 12,8 Ah entnehmbar. Die Reichweite erhöhte sich von 5 km auf 9 km. Anhand dieser Messreihen ist ersichtlich, dass die gleichmäßige Belastung der Batterie sich positiv auf das Batterieverhalten auswirkt.

Neben der Verlängerung der Fahrzeit und der Erhöhung der Reichweite wird beim LEV cityEL ein vom Ladezustand der Batterie unabhängiges Beschleunigungsverhalten gefordert, da das Beschleunigungsverhalten des Fahrzeugs extrem ladegradabhängig ist. Diese Anforderungen erfüllt das System. Die Vorbetrachtungen haben sich bestätigt, die Labormessungen konnten auf das reale Fahrzeug übertragen werden. Das System ist seit 4 Jahren mit einer zurückgelegten Strecke von über 6000 km im Fahrzeug installiert. Aus den Erfahrungen mit vorherigen Batteriesätzen kann geschlossen werden, dass sich die Funktionen des Batteriemanagements in Verbindung mit der Integration des power-assist Speichers positiv auf die Batterielebensdauer auswirken.

7 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit entwickelt Verfahren zum schädigungsfreien Betrieb von Bleibatterien in elektrischen Straßenfahrzeugen. Dazu wurden unter Laborbedingungen Messungen an den eingesetzten Batterien durchgeführt. Diese Messungen wurden in Form von Konstantstromentladungen bei unterschiedlichen Strömen und unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt. Über Pulsentladungen wurden die Bedingungen im Fahrzeug angenähert. Tests mit Normzyklen haben keine ins Fahrzeug übertragbaren Ergebnisse gebracht und wurden deshalb nicht weiter ausgeführt.

Messungen im Fahrzeug citySTROMer über ungefähr 100 Zyklen haben ergeben, dass im Fahrzeug eingesetzte Batteriemodule in dieser Zeit deutlich stärker altern als einzelne Module, die im Labor unter Pulsmustern zykliert wurden. Der Austausch einzelner defekter Module einer Antriebsbatterie führt zu einer beschleunigten Alterung der neu eingesetzten Module, da diese aufgrund der Teilzyklierung intern nicht mit ihrer gesamten umwandelbaren Masse am Reaktionsprozess teilnehmen.

Das ursprünglich im untersuchten citySTROMer eingesetzte Ladeverfahren war an der Gesamtspannung orientiert und hat Module höherer Spannungslage überladen. Die permanente Überladung führt zu einem sehr schnellen Alterungsprozess, teilweise mussten Module nach 3000 km Fahrleistung ausgetauscht werden. Die Ladung wird durch das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren anhand der Modulspannungen geführt und beinhaltet zum Ladeschluss eine symmetrierend wirkende Erhaltungsladephase. Ein Ladeverfahren für Traktionsbatterien im Fahrzeug muss generell an den einzelnen Modulspannungen orientiert sein und diese im Betrieb überwachen.

Temperaturausgleichssysteme verhindern das thermische Driften der einzelnen Module und halten alle Module in einem ähnlichen thermischen Arbeitspunkt. Geschlossene Batterietröge führen ohne einen Temperaturausgleich zu deutlichen Temperaturdifferenzen der einzelnen Module. An NiMH Batterien konnte im Labor festgestellt werden, dass auch die einzelnen Zellen eines Moduls während der Entladung thermisch driften. Die U-förmige Anordnung der Antriebsbatterien im Fahrzeug cityEL erweist sich im Sommerbetrieb als sehr vorteilhaft. Die einzelnen Module werden durch von unten angreifenden Fahrtwind sehr gleichmäßig gekühlt. Passive Kühlung reicht in diesem Fahrzeug aus. Im Winterbetrieb führt eine Klimatisierung der Batterie auf 10˚C zu einem deutlich verbesserten Betriebsverhalten des Fahrzeuges. Die zur Klimatisierung benötigte Energie hängt sehr stark von der thermischen Isolierung der Batterien ab.

Unterschiedliche Verfahren des Ladungsausgleiches wurden diskutiert. Eine vom Batteriemanagementsystem gesteuerte Bypass-Schaltung kann die einzelnen Module der Antriebsbatterie in einem ausgeglichenen Ladezustand halten. Der Aufwand der Implementierung von Verfahren mit höherem Wirkungsgrad zahlt sich wirtschaftlich nicht aus.

Die Entladestromabregelung wird im Versuchsfahrzeug bereits oberhalb der eigentlichen Entladeschlußspannung wirksam. Eine Tiefentladung einzelner Zellen innerhalb eines Bleimoduls scheint nicht aufzutreten. Durch die verfrühte Laststromabregelung wird die Reichweite nicht eingeschränkt, nur das Beschleunigungsvermögen wird limitiert. Es ist immer

noch genügend entnehmbare Energie vorhanden, um das Fahrzeug zu bewegen. Tiefentladungen werden über die gesamte Lebensdauer wirksam verhindert.

Die Modellierung einer Fahrzeugbatterie mit einem elektrischen Ersatzschaltbild wurde erfolgreich durchgeführt. Die einzelnen Elemente dieser Ersatzschaltung sind stromabhängig, temperaturabhängig und ladegradabhängig. Die anhand von aufwändigen Labormessungen bestimmten Parameter sind nur für wenige Zyklen gültig, für den Fahrbetrieb ist dieses Modell nur eingeschränkt nutzbar. Sehr sinnvoll und praktikabel ist jedoch die Bestimmung des zu erwartenden Restladegrades. Dieser wird im Versuchsfahrzeug über ein adaptives Fuzzy-System zuverlässig bestimmt.

Die Ladezustandsbestimmung im Fahrzeug erfolgt über die Bestimmung des Restladegrades, eine Ladungsbilanzierung und die Auswertung der temperaturkompensierten Modulspannungs-minima. Der Zeitpunkt der notwendigen Strombegrenzung wird sehr zuverlässig erkannt, die Ladezustandsanzeige arbeitet bereits kurz nach Fahrtbeginn zuverlässig.

In das Fahrzeug wurde erfolgreich ein power-assist Speicher integriert. Ultracapmodule verschiedener Kapazitäten wurden eingehend im Labor charakterisiert. Unterschiedliche Systemstrukturen wurden diskutiert. Realisiert wurde eine Variante, in der die Batterie permanent mit dem durchschnittlichen Fahrstrom entladen wird und der Ultracap mit der Differenz zum Momentanstrom belastet wird. Die Lastfälle zum power-assist wurden anhand realer Fahrzyklen identifiziert. Unter Laborbedingungen wurden verschiedene Ultracap/Bleibatterie Kombinationen untersucht. Das Verfahren der Systemauslegung lässt sich auf andere Fahrzeuge oder Applikationen übertragen. Faktisch handelt es sich im Fahrzeug um ein Zwei-Spannungsnetz. Aufgrund der höheren Spannungslage des Ultracaps steht am Antrieb eine deutlich höhere Leistung für Beschleunigungen zur Verfügung. Das System wurde so ausgelegt, dass die Batterie quasi mit dem im Fahrbetrieb vorliegenden Durchschnittsstrom in Form einer Konstantstromentladung zykliert wird. Die Verfügbarkeit des Ultracaps ist für 90 % aller Beschleunigungsvorgänge gewährleistet.

Die Reichweite des Fahrzeugs steigt nicht in dem aus den Labormessungen erwarteten Maße an, das liegt an der zusätzlichen ins Fahrzeug eingebrachten Masse. Die Integration des Ultracap führt zu einem jahreszeitunabhängigen Fahrverhalten des Gesamtfahrzeuges. Die Klimatisierung der Batterie wirkt sich in diesem System nur noch auf die Reichweite aus, nicht jedoch auf das Beschleunigungsvermögen. Während beim rein batterieelektrischen Fahrbetrieb eine frühzeitige Begrenzung des Fahrstromes erfolgt, liegt hier ein sehr konstantes Verhalten bis zum Entladeschluß vor. Dann wird der Batteriestrom hart begrenzt, die Anforderungen an die Ladezustandsbestimmung sind entsprechend hoch.

Beim Testeinsatz von Batterien mit geringerer Kapazität hat sich gezeigt, dass der Ultracap in diesem Fall die im Zyklus entnehmbare Energie prozentual deutlich mehr steigert als bei der Verwendung der EXIDE 12V /100 Ah.

Die Kombination BMS plus Integration der Ultracaps wirkt deutlich lebensdauerverlängernd für die Batterie. Die ersten beiden Batteriesätze des Fahrzeugs mussten jeweils nach gut einem Jahr inklusive einem Winter ausgetauscht werden. Der aktuelle Batteriesatz ist den vierten Winter im Fahrzeug und hat eine Fahrleistung von knapp 7000 km absolviert. Im März 2006 wurden bei Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes in rein batterieelektrischer Fahrt im Stadtzyklus 63

Ah entnommen. Nach der Erstinbetriebnahme im Mai 2002 wurde eine entnommene Ladung von 71 Ah gemessen.

Die Erkenntnisse der Arbeit lassen sich auf die anderen in dieser Arbeit beschriebenen Batteriesysteme und Applikationen übertragen. Wie stark die einzelnen ergriffenen Maßnahmen das Batteriesystem positiv unterstützen, wurde nicht quantisiert. Die positive Wirkungsweise der implementierten Verfahren des Batteriemanagements auf die Lebensdauer und das Fahrverhalten konnte nachgewiesen werden. Die Alltagstauglichkeit des Fahrzeuges, speziell im Winterbetrieb, wurde deutlich gesteigert.

Der Bleibatterie wird für Traktionsanwendungen nur ein geringes Potenzial bescheinigt. Leichtfahrzeuge werden vom Verbraucher nicht ernst genommen. Überdenkt man seine Mobilitätsansprüche, so kann das entwickelte Fahrzeugkonzept aus Batterie und Ultracap im LEV eine sinnvolle Fahrzeugalternative für den urbanen Verkehr darstellen. Es ist ressourcenschonend, leise, am Einsatzort emissionsfrei, kostengünstig und bietet erheblichen Fahrspaß.

8. Literaturverzeichnis

[Alt95] Altrock, C. von: Fuzzy Logic, Band 1 Technologie, 2. Auflage, R.Oldenbourg Verlag München Wien, 1995

[Bad00] Bady, R.: Technisches Einsatzpotential von Elektrofahrzeugen mit Hochtemperaturbatterien im städtischen Alltagsbetrieb, Dissertation RWTH Aachen, Aachen 2000

[Bäk99] Bäker, B.: Onboard-Diagnosekonzepte für zukünftige Kraftfahrzeuge-Fehlerdiagnose, Energie- und Informationsmanagement, VDI Berichte 1505, 1999

[Buc04] Buchmann, I.: Choosing the right battery for wireless communications; http://www.batteryuniversity.com/parttwo.htm, 2004

[Beh99] Beheshti, Masoud, Chemistry-Independent Charge Management, Darnell Com Power Pulse AppNote, Darnell Group Inc. www.darnell.com, 1999

[Böh96] Böhm, H.: ZEBRA-Hochenergiebatterie, Aufbau, Sicherheit, Zuverlässigkeit, 4. Symposium Elektrische Straßenfahrzeuge, Esslingen 1996

[Böh98] Böhm, H.; Beyermann, G.: ZEBRA Batteries advanced power by doping, AEG Anglo Batteries GmbH, 1998

[Buc98] Bucher, R.: Einsatzmöglichkeiten von Brennstoffzellen in Schienenfahrzeugen des Nahverkehrs, Diplomarbeit FH München 1998

[Cho01] Chou, Y.-F. : A Battery Management System of Electric Scooter using Li-ion Battery Pack, Dialogue Session D8D, Electric Vehicle Symposium EVS 18, Berlin 2001

[Chu96] Chu, D. W.:Tradeoffs in Implementing Intelligent Battery Management; Eleventh Annual Battery Conference on Applications and Advances, Pages 217 - 222, 1996

[Cor94] Corrigan, D.: Ovonic Nickel-Metal Hydride Electric Vehicle Batteries, 12th International Electric Vehicle Symposium (EVS-12), Anaheim California, 1994

[Die00] Dietrich, T.: Ultracaps in Power-Assist Applications, EPCOS Präsentationsunterlagen, München 2000

[Die02] Dietrich, T., u.a.: Recent Progress in UltraCaps for Automotive Applications,

Startergeneratortagung, München 2002

[Die05] Dietrich, P.: Concept, Design and first results of the light-weight-fuel-cell-vehicle HY-Light, EVS 21, Monaco 2005

[Dix00] Dixon, Juan W.: Regenerative Braking for an Electric Vehicle Using Ultracapacitors and a Buck-Boost Converter, EVS17, Montreal, Canada 2000

[Dur01] Duryea, S.: A Battery Management System for Stand-Alone Photovoltaic Energy Systems, IEEE Industry Applications Magazine, Pages 67-72, May/June 2001

[Dus96] Dustmann, C.-H.; Tilley, R.:Power Improved ZEBRA Battery for Zero Emission Vehicles, SAE International Congress & Exposition, February 26-29, 1996, Detroit, USA 1996

[Epc00] Epcos AG, Optimized starting-economical driving, EPCOS COMPONENTS 01/00, München 2000

[Eul72] Euler, K.J.: Das Impedanz-Spektrum elektrochemischer Stromquellen, Electrochemica Acta, Vol. 17, 1972

[EU04] Ausschuss für Umweltfragen der Europäischen Union: Entwurf eines Berichts über den Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über Batterien und Akkumulatoren sowie Altbatterien und Altakkumulatoren, Brüssel, Belgien 2004

[Exi06] Deutsche Exide GmbH, Wenzel, J.: Broschüre Sonnenschein SOLAR Technische Information, http://www.networkpower.exide.com/exidepdfs/Sonnenschein_Solar_de.pdf, Büdingen 2006

[FfE06] Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.: Untersuchung eines Golf CitySTROMer, Messtechnische Analyse des Energieverbrauchs eines Elektrostraßenfahrzeugs vom Typ VW Golf CitySTROMer, www.ffe.de/details/mobil/e-golf/e-golf.htm, München 2006

[Fra99] Franke, Michael; Batteriemanagement für Elektrostraßenfahrzeuge am Beispiel von gasdichten Nickel-Cadmium-Akkumulatoren; Fortschrittsberichte VDI, Reihe 12, Nr. 387, VDI-Verlag Düsseldorf, Klettgau 1999

[Fre95] Freeman, D.: Sophisticated Battery Management Addresses Emerging Battery Technologies, Southcon 95 Conference, Fort Lauderdale, Florida, USA, 1995

[Fun98] Fundaro, P.,Heacock,D.: Battery Management Solutions for Cost-Sensitive Applications; Northcon/98, Conference Proceedings Pages: 169-173, Seattle, USA, 1998

[Gag02] Gagliardi, F., Pagano, M.: Experimental Results of on-board Battery-Ultracapacitor System for Electric Vehicle Applications, IEEE International Symposium on Industrial Electronics 2002,L'Aquila,Italien 2002

[Gar00] Garche, J., Jossen, A: Battery management systems (BMS) for increasing battery life time; TELESCON.2000, the Third International Telecommunications Energy Special Conference, Dresden, Germany 2000

[Glo00] Glonner, H.,et al: Powerassist- ein Hybridkonzept im Vergleich zu einem konventionellen Antriebsstrang, in: Innovative Fahrzeugantriebe, VDI Berichte 1565, Düsseldorf 2000

[Gop79] Gopikanth, M.L., et al: Impedance Parameters and the State of Charge, II. The Lead Acid Battery, Journal of .Applied Electrochemistry, Vol.9, 1979

[Gre78] Gretsch, R.: Ein Beitrag zur Gestaltung der elektrischen Anlage in Kraftfahrzeugen, Universität Erlangen-Nürnberg, Habilitation, Erlangen 1978

[Gut91] Gutekunst, Klaus: Ein Beitrag zur Untersuchung des Ladeverhaltens von verschlossenen NiCd- und Blei-Säure-Akkumulatoren, Dissertation TU Berlin, Berlin 1991

[Han02] Hanauer, D.: IUIa Charging Characteristic for VRLA Batteries, Exide Präsentationsunterlagen, Büdingen 2002

[Han05] Hanauer, D.: Zyklenlebensdauer traction bloc, Datenblattauszug, Exide, Büdingen 2004

[Har98] Harnisch, P., Garche, J.: The lead acid battery for solar applications; Renewable EnergyWorld, Pages 40-42, July 1998

[Hei96] Heinemann, D.: Batteriemanagementsysteme zur Zustandsanalyse und Reichweitenoptimierung, 4. Symposium Elektrische Straßenfahrzeuge, Esslingen 1996

[Hei99] Heinemann, D.: Realization of a Battery Management System for x-EVs, EVS17, Montreal, Canada 1999

[Hez99] Heinzelmann, A.; Produktintegrierte Diagnose komplexer mobiler Systeme, Universität Paderborn, Dissertation 1999, Fortschrittsberichte VDI, Reihe 12,

Nr. 391, VDI-Verlag Düsseldorf, Klettgau 1999

[Hir00] Hiramatsu, S. Et al.: Development of the Battery ECU for the Toyota Hybrid System, EVS 18, Berlin 2000

[Hön96] Hönes, H.-P.: Elektrochemische Energiespeicher in photovoltaischen Anlagen - Untersuchungen zur Zustandserfassung und Charakterisierung des Betriebsverhaltens, Dissertation Universität Stuttgart, Stuttgart 1994

[Int95] Intel Corporation: System Management Bus Specification; www.smbus.org

[Jeh00] Jehoulet, C. et al: Ultracapacitors: Power Buffer for Automotive Applications, EVS17, Montreal, Canada 2000

[Kah92] Kahlen, H.:Batterien, Technischer Stand elektrochemischer Speicher, neue Entwicklungen, andere Formen, Einsatzbereiche, Haus der Technik Fachbuchreihe, Essen 1992

[Kil99] Killmann, G., et al.: TOYOTA Prius-Development and market experiences, in: VDI Berichte 1459, Düsseldorf 1999

[Kin95] Kindscher, Martin: Die Elektrolytleitfähigkeit als driftfreier Ladezustandsindikator in geschlossenen Bleiakkumulatoren, Dissertation TU Berlin, Berlin 1995

[Kno02] Knorr, Rainer, u.a.: More Power for the ISG: A Powerful Energy Supplying Concept Offering Maximum ISG Functionalities at Reduced Battery Demands, Startergeneratortagung, München 2002

[Köh99] Köhler, U.: Hochleistungsbatterien für Hybridfahrzeuge, DGES Fachtagung 1999, Karlsruhe 1999

[Köh05] Köhler, Uwe: Nickel Metal Hydride and Lithium-Ion Batteries for Hybrid Electric Vehicles - Cars, Busses and Light Trucks, EVS21, Monaco 2005

[Kol86] Kolen, P.: Über den Einfluß des Wiederaufladens auf die Leistungsfähigkeit und die Lebensdauer von vielzelligen Bleibatterien für den Einsatz in Elektrostraßenfahrzeugen, Dissertation, Aachen 1986

[Kop04] Kopera, John: Inside the Nickel Metal Hydride Battery; www.cobasys.com/pdf/tutorial/inside_nimh_battery_technology.pdf;Internetpublikation Cobasys 2004

[Loh98] Lohner, A.: Batteriemanagement für verschlossene Bleibatterien am Beispiel

von unterbrechungsfreien Stromversorgungen, Dissertation, RWTH Aachen, Aachen 1998

[Mam74] Mamdani, E.H.: Application of Fuzzy Logic to approximate reasoning using linguistic variables, IEEE Transactions on Computers, Vol C-26 1974

[Mar99] Martinez, Carlos, u.a.: Smart Battery Primer, XICOR Application Note AN126, XICOR 1999

[Maz05] Batteries vs Ultracapacitors in Hybrid Electric Buses, EVS 21, Monaco 2005

[Men96] mentzer electronic: Bedienungsanleitung BADICHEQ, Dokumentation Batteriemanagement Systeme Reihe 2800, Bad Nauheim 1996

[Moh96] Mohammed, F.: Beitrag zur Modellierung des Betriebsverhaltens von NiMH Zellen, Dissertation TU-Berlin, ISBN 3-89574-181-7, Berlin 1996

[Moo05] Moore, S.: An Investigation of Cell Balancing and Equalization for Lithium-Ion Battery Packs, EVS 21, Monaco 2005

[Nau97] Naunin, D.: Elektrofahrzeuge - insbesondere Batterien und Antriebe, Vorlesungsskript TU-Berlin, Berlin 1997

[NOV92] Novatronic, Intelligentes Lademanagement von Ni-Cd Akkumulatoren, Beschreibung des Ladecontrollers NT2900, 1992

[Ort03] Ortuzar, M.: Design Construction and Performance of a Buck-Boost Converter for an Ultracapacitor-Based Auxiliary Energy System for Electric Vehicles,Industrial Electronics Society IECON03,Virginia, USA, 2003

[Peu1897] Peukert, W.:Über die Abhängigkeit der Kapazität von der Entladestromstärke bei Bleiakkumulatoren. ETZ 18 (1897), S. 287-288

[Pes99] Pesaran, A: An Approach for Designing Thermal An Approach for Designing Thermal Management Systems for EV and HEV Battery Packs; 4th Vehicle Thermal Management Systems Conference London, UK, 1999

[Pet98] Petsch, G.: Powerbench - Entwicklung einer Stromsenke zum Test von Batterien für elektrische Strassenfahrzeuge, Studienarbeit TU-Berlin, Berlin 1998

[Pfa99] Pfab, Xaver: Das Zwei-Spannungs-Bordnetz, erste Ergebnisse mit ausgewählten Beispielen, 8. Aachner Kolloquium Fahrzeug und Motorentechnik, Aachen 1999

[Pic01] Pickert, Volker: Bora Electric: A Concept Car to test Components for Power

Drive Trains, EVS18 , Berlin, Germany 2001

[Ple04] Plett, G.: Extended Kalman Filtering for Battery Management Systems of LiPB-based HEV Battery Packs, in Journal of Power Electronics, Vol.134 No.2, pp252-261, August 2004

[Prü95] Prüfer, M.: Untersuchung der Reichweitenoptimierung eines Elektrofahrzeugs mit dem Batteriemanagementsystem BADICHEQ unter Anwendung von Fuzzy-Logik, Diplomarbeit TU-Berlin Inst. f. Elektronik, Berlin 1995

[Rei97] Reich, A.: Entwicklung einer CAN-Bus-fähigen Zentraleinheit mit Peripheriekomponenten für ein Batteriemanagementsystem, Diplomarbeit TU-Berlin Inst. f. Elektronik und Lichttechnik, Berlin 1997

[Ren00] Rennels, K. et al.: High Current Discharge Testing of Nickel Metal Hydride Batteries, EVS17, Montreal, Canada 2000

[Sch82] Schleuter, W.: Ein Beitrag zur Beschreibung des elektrischen Verhaltens von Blei-, Nickel-Cadmium- und Nickel-Eisen-Akkumulatoren, Dissertation RWTH Aachen, Aachen 1982

[Scm01] Schmitz, Peter: System Integration and Validation of a Li-Ion Battery in an Advanced Electric Vehicle, EVS18, Berlin, Germany 2001

[Scö88] Schöner, H.-P.: Über die Auswertungen des elektrischen Verhaltens von Bleibatterien beim Entladen und Laden, Dissertation RWTH Aachen, Aachen 1988

[Scö94] Schöpe, Friedhelm: Batteriemanagement für Nickel-Cadmium Akkumulatoren, Dissertation RWTH Aachen, Aachen 1994

[Scu03] Schupbach, R.: Design Methodology of a combined Battery-Ultracapacitor Energy Storage Unit for Vehicle Power Management, Power Electronics Specialists Conference, Acapulco, Mexico, 2003

[SEX99] Sexton, E.: Improved Charge Algorithms for Valve Regulated Lead Acid Batteries, IEEE Proceedings of the 15 th Annual Battery Conference on Applications and Advances, Long Beach, California, 1999

[SGS94] SGS-Thomson Microelectronics, A Rapid Charger for Batteries with Fuzzy Logic, Application Note AN675/1294, www.st.com, 1994

[SIC97] SICAN, Forum Bordnetzarchitektur,Spezifikationsentwurf für das Zwei-Spannungsbordnetz 42V/14V, Hannover 1997

[Sti05] Stiegeler, Markus: Battery Management System for Lead Acid Battery with Calibration using Charge- and Discharge- Rest Voltage Characteristic, evs21, Monaco 2005

[Stü01] Stürmer, Uwe; Modellierung von Bleibatterien, Studienarbeit, TU Berlin, Berlin 1999

[Tak03] Takamoro, K.: Development of Battery Pack for Mobile Phones; NEC Corp. Research and & Development Report. Vol. 44 No. 4; Pages 315 to 320 www.nec.co.jp/techrep/en/r_and_d/r03/r03-no4/rd03.pdf, 2003

[Til97] Tilley, A.R.: The ZEBRA Electric Vehicle Battery - Recent Advances, Autotec ‘97 Conference, Birmingham, UK, 1997

[Tup91] Tuphorn, H.: Der verschlossene Bleiakkumulator, Grundlagen und Anwendungsbeispiel im Notstrombereich, 7. Internationales Technisches Symposium, Anwendungstechnik Batterien, München 1991

[Var82] Varta Batterie AG: Sealed Nickel Cadmium Batteries, VDI-Verlag, Düsseldorf 1982

[Var86] Varta-Batterie-AG: Bleiakkumulatoren, 11. Auflage, Düsseldorf 1986

[Var97] Varta Batterie AG: VARTA Special Report 2/1997, Hannover 1997

[Wab98] Wabro, R., Wagner, U.: Energieverbrauchsanalyse von Elektro-Pkw-Stand der Technik und Ausblick; ATZ automobiltechnische Zeitschrift 100, Seiten 98-103, Wiesbaden 1998

[Wai04] Waidhas,M.: Grundlegende Technologie von Doppelschichtkondensatoren, ZVEI-Workshop, Frankfurt 2004

[Wil83] Wille, G.: Ein Beitrag zur Ermittlung des Energieverbrauchs und der Restreichweite von Elektrostrassenfahrzeugen, Dissertation, Aachen, 1983

[Zad65] Zadeh,L.A.: Fuzzy Sets. Information and Control, 8:338-353, 1965

[ZED98] Zero Emission Downsized Urban Vehicle, Battery Thermal Management Concepts, Joule Project 1998

Abbildungsverzeichnis

***Abb. 2.1**: Ragone Diagramm: Zusammenhang zwischen Leistungsdichte und Energiedichte [Wai04]* 5
***Abb. 2.2** Prinzipieller Aufbau eines Blei-Säure-Akkumulators [Var86]* 9
***Abb. 2.3**: Schematischer Reaktionsablauf der Entladung eines Blei-Akkumulators* . . . 11
***Abb. 2.4**: Ruhespannung in Abhängigkeit der Elektrolytdichte [Var86]* 12
***Abb. 2.5**: Elektrisches Ersatzschaltbild für Blei-Akkumulatoren [Gre78]* 13
***Abb. 2.6:** Entnehmbare Ladung einer Sonnenschein 6V/160Ah Bleibatterie in Abhängigkeit der Stromstärke/Entladedauer (eigene Messungen - blau: Beginn der Zyklierung - rot: Ende des Untersuchungszeitraumes)* . . . 14
Abb. 2.7: *Entnehmbare Ladungsmenge in Abhängigkeit der Zyklenzahl [Han05]* . . . 15
***Abb. 2.8**: Spannung, Strom und eingebrachte Ladung bei einem 6V/160Ah Modul* . . . 17
***Abb. 2.9**: Erreichbarer Ladegrad in Abhängigkeit des Anfangsladestromes aus [Var86]* 18
***Abb. 2.10**: Entladekennlinien einer OpzS 350 nach [Var86]* 19
***Abb. 2.11**: Aufbau einer prismatischen NiMH Zelle [Kop04]* 23
***Abb. 2.12**: Vergleich der Eigenschaften zylindrischer und prismatischer Zellen nach [Köh05]* 24
***Abb. 2.13**: Entladecharakteristik einer UHP Zelle 10Ah [Var97]* 26
***Abb. 2.14**: Ragone-Diagramm HE (High Energy), HP (High Power) und UHP (Ultra HP) [Var97]* 26
***Abb. 2.15**: Zellreaktion der ZEBRA-Zelle [Dau96]* 28
***Abb. 2.16**: Aufbau der ZEBRA-Zelle [Dau96]* 29
***Abb. 2.17**: Komplettsystem der ZEBRA-Batterie [Dau96]* 30
***Abb. 2.18**: Vergleich der Speicherprinzipien Pb-Säure und Ultracap* 31
***Abb. 3. 1**: Problematik unterschiedlicher Modulkapazitäten nach [Prü95]* 35
***Abb. 3. 2:** Zustände des BMS eines EV nach [Scö94]* 37
***Abb. 3. 3**: Ergebnis eigener Laborversuche zur Entladung mit verminder-tem Strom nach dem Erreichen der Entladeschlussspannung.* 39
***Abb. 3. 4**: Eingriff des Batteriemanagementsystems in den Fahrstromkreis zur Vermeidung von Tiefentladungen [Rei97]* 40
***Abb. 3. 5**: Ladeverfahren für Bleibatterien [Nau97]* 42
***Abb. 3. 6**: Gasungsspannung von Bleibatterien in Abhängigkeit der Zellentemperatur [Hei96]* 43
***Abb. 3. 7**: Prinzip der Säureschichtung* 44
***Abb. 3. 8**: Strom- und Spannungsverlauf für EXIDE dryfit bloc Batterien [Han02]* . . . 45
***Abb. 3. 9**: Ladecharakteristik der NiMH-Zelle [VAR97]* 47
***Abb. 3. 10**: Realer Verlauf an einem Panasonic 6,5 Ah Modul bei Ladung mit 3 A [eigene Messung]* 48
***Abb. 3. 11**: Ladekennlinie ZEBRA-Batterie [Böh98]* 49
***Abb. 3. 12**: Symmetrierung der Kondensatorspannung durch galvanisch*

getrennte Spannungsquellen 50
Abb. 3. 13: *Symmetrierung durch passives bypassing* 51
Abb. 3. 14: *Entladespannungsverlauf bei der Tiefentladung einer Bleibatterie Varta 12 V/ 45 Ah [eigene Messung]* 52
Abb. 3. 15: *Tiefentladung einer stark gealterten Bleibatterie [eigene Messung]* 52
Abb. 3. 16: *Strom- und Spannungsverlauf bei Testfahrt mit deaktivierter Strombegrenzung (obere Grafik: Modulspannungen, untere Grafik blau: Stromverlauf, grün: High-Signal bei I < 40 A, sonst Low-Signal)* 53
Abb. 3. 17: *Sprungantwort bei aktivierter Stromabregelung im Versuchsfahrzeug cityEL* 54
Abb. 3. 18: *Umpolung einer NiMH Zelle* 54
Abb. 3. 19: *Umpolung von einzelnen NiMH-Zellen eines Moduls bei Tiefentladung* . . . 55
Abb. 3. 20: *Auswirkungen von SOC und SOH auf Batterieparameter* 57
Abb. 3. 21: *Temperaturverteilung (in [°C]) in einem ungekühlten NiMH System bestehend aus 3x10 Modulen [Pes99]* 58
Abb. 3. 22: *Temperaturverteilung in °[C] im nun luftgekühlen Modul bei gleicher Last [Pes99]* 59
Abb. 3. 23: *Modultemperaturen über der Entladezeit (in [s]) einer Panasonic 95Ah/12V bei Entladung mit 160A* 59
Abb. 3. 24: *Blockschaltbild der Wasserkühlung eines Batteriemoduls* 60
Abb. 3. 25: *Temperaturentwicklung am 95Ah/12V NiMH-Modul bei Wasserkühlung und temperaturabhängiger Leistungsbegrenzung* 61
Abb. 3. 26: *Energy-Balancing System nach [Cho01]* 62
Abb. 3. 27: *Verschiedene Verfahren des Ladungsausgleiches zwischen Batteriemodulen* 63
Abb. 3. 28: *Einbindung der Diagnose in den Wertschöpfungsprozeß* 65
Abb. 3. 29: *Prinzipielle Darstellung moderner Diagnoseabläufe* 66
Abb. 3. 30: *Prinzipielle Struktur eines batterie-betriebenen Elektrofahrzeugs* 68
Abb. 3. 31: *Batterietröge beim Golf II CitySTROMer* 69
Abb. 3. 32: *Laststrom-Ausschnitt aus innerstädtischer Fahrt mit Golf II CitySTROMer* 70
Abb. 3. 33: *Verlauf des Laststromes (blau) und des Durchschnittsstromes (grün) über der Zeit beim cityEL* 71
Abb. 3. 34: *Toyota Hybrid System [Buc98]* 72
Abb. 3. 35: *Mögliches Zweispannungsnetz mit Integriertem Starter Generator (ISG) in zukünftigen Systemarchitekturen* 74
Abb. 3. 36: *Verlauf des SOC einer PV Batterie während eines Monats [Dur01]* 76
Abb. 3. 37: *Ladeverfahren fürSonnenschein SOLAR Batterien nach [Exi06]* 77
Abb. 3. 38: *Typisches Lastprofil eines Notebooks bei Officeanwendungen nach [FfE03]* 78
Abb. 3. 39: *Entladeverhalten einer Li-Ion Batterie bei GSM-Profil nach [Tak03]* 79
Abb. 3. 40: *Konstruktiver Aufbau einer Li-Ion Mobiltelefonbatterie von NEC nach [Tak03]* 79

***Abb. 3. 41**: Auswirkungen bei nicht vorhandenem oder unzureichendem Batteriemanagement 80*
***Abb. 3. 42**: Grundlegendes Prinzip des Batteriemanagements 81*
***Abb. 3. 43**: Beispielkonfiguration elektronischer Steuergeräte im Elektrofahrzeug 82*
***Abb. 3. 44**: Prinzipielle Struktur eines BMS für Bleibatterien 84*
***Abb. 3. 45**: Prinzipielle Struktur eines BMS für NiMH Batterien [Hei99] 85*
***Abb. 3. 46**: Sicherheitsrelevante Maßnahmen für Li-Ion Batterien auf Zell-, Pack- und Modulebene [Köh05] 87*
***Abb. 3. 47**: Lithium-Ion Batterie bestehend aus Zellen, BMS und thermischem Management 87*
***Abb. 3. 48**: Funktionen des Batteriemanagements der ZEBRA-Batterie [Böh96] 88*
***Abb. 3. 49**: Innenwiderstandsverlauf der ZEBRA Zelle in Abhängigkeit des SOC für die Zelltypen SL09 und ML1 . . . . . 89*
***Abb. 3. 50**: Einzelzellspannungen am Modul 42V/67F im Pulsbetrieb 91*
***Abb. 3. 51**: Temperaturverhalten des Moduls 42 V/67 F im Pulsbetrieb mit 4 kW Entladeleistung und anschließender Abkühlung 91*
***Abb. 4.1**: Ruhespannung in Abhängigkeit des Ladegrades nach [Sti05] 97*
***Abb. 4.2**: Ruhespannung nach einstündigem Einschwingen aus der Lade- bzw. Entladephase heraus [Sti05] 97*
***Abb. 4.3**: Spannungsverlauf Übergang zur Ruhespannung im realen Fahrzyklus (oben: Modulspannungen, unten: Entladestrom) 98*
***Abb. 4.4**: Elektrische Ersatzschaltung des Bleiakkumulators nach Runge [RUN-74] 101*
***Abb. 4.5**: Elektrisches Ersatzschaltbild der Bleibatterie nach Gretsch 104*
***Abb. 4.6**: Modell des Widerstandes r_{dE} in PSpice 106*
***Abb. 4.7**: Gesamtschaltung zur Simulation des elektrischen Ersatzschaltbildes nach Gretsch 107*
***Abb. 4.8**: Bestimmung der Überspannungen aus Meßreihen 108*
***Abb. 4.9**: Modell zur Bestimmung des Restladegrades 108*
***Abb. 4.10**: Umsetzung des stromabhängigen Faktors im Pspice-Modell des transienten Innenwiderstandes 109*
Abb. 4.11: *Endgültige Simulation basierend auf dem Modell von Gretsch mit dem Ziel der Bestimmung des Klemmenspannungsverlaufes und des Entladeschlusses bei Konstantstromentladungen 111*
***Abb. 4.12**: Simulation des auf Modul neu3 angepassten Modells bei Konstantstromentladungen und einer Betriebstemperatur von 40 °C . . 112*
***Abb. 4.13**: Entnehmbare Ladung bei pulsförmiger Belastung, variabler Pulsdauer und konstantem I_{AV} (blau: 1min; grün: 3 min; rot: 10 min; magenta: 30 min) 113*
***Abb. 4.14**: Simulationsergebnis Pulsentladung (sw: Messung, ma: Simulation 114*
***Abb. 4.15**: Simulation mit einem 4-stufigen Pulsmuster (sw: Messung; ma: Simulation) 114*
***Abb. 4.16:** Fuzzy-Sets der linguistischen Eingangsvariablen 'disCurrent' und 'batTemp' zur Bestimmung des Restladegrades 116*

***Abb. 4.17**: Fuzzy-Sets der Ausgangsvariable 'Restladegrad' als Singletons 117*
***Abb. 4.18**: Matlab-Simulation des Fuzzy-Systems zur Restladegradbestimmung mit einer Systemdefinition aus Labormessungen 118*
***Abb. 5.1**: Technische Daten des VW Golf CitySTROMer A2 nach [Wab98] 119*
***Abb. 5.2**: Energieflüsse im Golf CitySTROMer A2 nach [Wab98] 120*
***Abb. 5.3**: Innerstädtischer Fahrzyklus mit teilentladener Batterie bis zum Entladeschluß [eigene Messung] 121*
***Abb. 5.4**: Prinzipielle Struktur des Batteriemanagementsystems BattMobil3 für Pb-Gel Batterien 122*
***Abb. 5.5**: Prinzip der Datenerfassung des Voltage-Scanners (traktionsseitig) 124*
***Abb. 5.6**: Analogmodul des Voltage-Scanners 124*
***Abb. 5.7**: Bypass-Schaltung zum Ladungsausgleich [Rei98] 126*
***Abb. 5.8**: Aktiver Bypass zum Ladeende mit einem Bypass-Strom von 2A [Rei97] . . 126*
***Abb. 5.9**: Modulspannungsverläufe bei fehlender Symmetrierung der Batterien (rot: Modul 7, blau: Modul 9, grün: Modul 15) 127*
***Abb. 5.10**: Modulspannungsverläufe nach Symmetrierung im Ladeverfahren über vier Zyklen (rot: Modul 7, blau: Modul 9, grün: Modul 15) 127*
***Abb. 5.11**: Grafikdisplay im Textmodus 128*
***Abb. 5.12**: Durch 'Cycle Setup' generierte Testzyklen für den Batterieteststand 129*
***Abb. 5.13**: Versuchsfahrzeug Elektroleichtfahrzeug vom Typ cityEL 130*
***Abb. 5.14**: Struktur des Batteriemanagementsystems für das cityEL 131*
***Abb. 5.15**: Filterung und Überspannungsschutz der Messdatenvorverarbeitung 131*
***Abb. 5.16**: Aufbau des Batterietroges mit Heizmatte im Winterbetrieb 132*
***Abb. 5.17**: Fahrzyklus mit untemperierter Batterie bei 0 °C (oben: Modulspannungen, unten: blau Stromverlauf und Durchschnittsstrom, grün High Signal bei I<40A) 133*
***Abb. 5.18**: Fahrzyklus bei gleicher Strecke und auf 10 °C vorgeheizter Batterie bei einer Umgebungstemperatur -2 °C (oben: Modulspannungen, unten: blau Stromverlauf und Durchschnittsstrom, grün High Signal bei I<40 A) 133*
***Abb. 5.19**: Aufbereitung des Geschwindigkeitssignals 134*
***Abb. 5.20**: Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit (unten), Batteriespannung (oben) und -strom (Mitte) am cityEL 134*
***Abb. 5.21**: Modul-Bypass zum Ladungsausgleich 135*
***Abb. 5.22**: Ladeverfahren mit nachgeschalteter Symmetrierungsphase (von oben nach unten: Modulspannungen, Ladestrom, Ladung (bl) und Leistung (rt), Netzenergie) 135*
***Abb. 5.23**: Limp home durch Begrenzung des Fahrstromes beim Erreichen der Tiefentladespannung (von oben nach unten: Modulspannungen, Ultracapspannung, Stromverlauf (blau), entnommene Ladung) 136*
***Abb. 5.24**: Entnommene Ladung, bestimmter SOC und Fehlerbetrachtung bei der Auswertung der Modulspannungen bei T_{amb} = 25 °C (von*

oben nach unten: Modulspannungen und aufgetretenes Minimum aller Modulspannungen, Stromverlauf und aufgelaufener Durchschnittsstrom, entnommene Ladung und Leistung, blau: entnommene Ladung- schwarz: prognostizierter SOC- magenta: nachträglich berechnete Fehlerkurve) 138

***Abb. 5.25**: Bestätigung der Gültigkeit des Ansatzes auch bei tiefen Temperaturen (von oben nach unten: Modulspannungen und aufgetretenes Minimum aller Modulspannungen, Stromverlauf und aufgelaufener Durchschnittsstrom, entnommene Ladung und Leistung, blau: entnommene Ladung- schwarz: prognostizierter SOC- magenta: nachträglich berechnete Fehlerkurve)* 139

***Abb. 5.26**: Linguistische Variablen zur Bestimmung des SOC aus dem Modulspannungsminimum und Ausgangsregelbasis des noch nicht adaptierten Systems* 140

***Abb. 5.27**: Resultierendes Kennfeld des nicht adaptierten Fuzzy-SOC-Meters* 140

***Abb. 6.1**: Vergleich der Sprungantwort des Spannungsverlaufes bei impulsförmiger Stromanregung von Batterie und Ultracap (Quelle: Epcos interne Messung)* 142

***Abb. 6.2**: Testfahrt Berufsverkehr* 144

***Abb. 6.3**: Testfahrt normaler Verkehr* 144

***Abb. 6.4**: Schematische Darstellung einer leichten Bergauffahrt mit Umschalten auf Ultracap ca. bei Meßpunkt 6500* 145

***Abb. 6.5**: Erwärmung des 67F/42V Moduls bei Zyklierung mit 4kW Pulsen* 147

***Abb. 6.6**: Thermisches Verhalten eines 67F/42V Moduls im Boost Modus [Die02]* . 148

***Abb. 6.7**: Prinzipielle Symmetrierung von Ultracaps mit 2-Punkt Regler* 148

***Abb. 6.8**: Ultracapmodul 42 V/67 F mit aktiver Symmetriereinheit* 149

***Abb. 6.9**: Grundprinzip der Kombinationvon Batterie und Ultracap mit Ucap<Ubat [Dix00]* 151

***Abb. 6.10**: Spitzenlast wird vom Ultracap bereitgestellt* 152

***Abb. 6.11**: Umschaltung zwischen Batterie und Ultracap* 153

***Abb. 6.12**: Energieflüsse bei reinem Batteriebetrieb und mit Ultracaps* 154

***Abb. 6.13**: Entladeverhalten Bleibatterien mit jeweils Iav = 45A und unterschiedlichen Pulsmustern (margenta: Konstantstromentladung, rot: Pulsentladung mit Imax = 80 A, blau: an Lastprofil CityEL angenäherte Pulsentladung* 154

***Abb. 6.14**: Vergleich unterschiedlicher Ladeströme und Ladestrategien und deren Auswirkung auf die Verfügbarkeit des Ultracaps zur Abdeckung der Lastspitzen (von oben nach unten: Spannung Ultracap, Laststrom, Batteriespannung, umgesetzte Ladung).* 156

***Abb. 6.15**: 134F Modul; DC-DC Ladestrom 40 A; Switchlevel 40 A* 158

***Abb. 6.16**: 67 F ; DCDC Ladestrom 20 A* 159

***Abb. 6.17**: 134 F; DC-DC Ladestrom 40 A; Switchlevel 60 A* 159

***Abb. 6.18**: 134 F ; DC-DC Ladestrom 40 A; Switchlevel 40 A-wie Abbildung 19, jedoch Zyklus länger* 160

***Abb. 6.19**: Struktur des Energiemanagements im city-el* 161
***Abb. 6.20:** EMS basierend auf TC1775A* 162
***Abb. 6.21**: Prinzipielle Schaltung zur Bestimmung der Systemströme DAQ-I* 162
***Abb. 6.22**: Prinzip des entwickelten DC-DC-Wandlers* 163
***Abb. 6.23**: Normaler Fahrzyklus mit dem hybriden System bei 2-stündiger Fahrt (von oben nach unten: Modulspannungen, Spannung des Ultracapmoduls, Laststrom und Durchschnittsstrom, Leistung (rot) und entnommene Ladung (blau)* 165
***Abb. 6.24**: Fahrt mit Deta 12 V/ 70 Ah bei 2 ℃ mit hybridem System (von oben nach unten: Modulspannungen, Spannung des Ultracapmoduls, Laststrom, entnommene Ladung)* 166
***Abb. 6.25**: Rein batterieelektrische Fahrt auf gleicher Strecke bei 2 ℃ (von oben nach unten: Modulspannungen, Spannung am Ultracapmodul, Laststrom, entnommene Ladung)* 166
***Abb. 6.26**: Rein batterie-elektrisches Fahren bei -7 ℃ (Gesamtspannung, entladener Ultracap, Laststrom, entnommene Ladung)* 167
***Abb. 6.27**: Testfahrt mit komplettem EMS bei -7 ℃* 168

Tabellenverzeichnis

***Tab. 2.1:** Vergleichsdaten verschiedener Batteriesysteme* 5
Tab. 2.2: *Nennspannungen verschiedener Batteriesysteme* 6
Tab. 2.3: *Alterungseffekte und Ursachen am Beispiel der Bleibatterie* 16
Tab. 2.4: *Vergleich von Eigenschaften Pb-Säure und Ultracap* 31
Tab. 3.1: *Typische Lasten von ausgesuchten Verbrauchern im 42 V Bordnetz* 76
***Tab. 4.1:** Elektrolytschichtung bei Bleisystemen* 98
***Tab. 4.2:** Vergleich der genannten Batteriemodelle* 103
Tab. 5.1: *Aufgaben des Batteriemanagements sowie zugeordnete Aktoren und Sensoren* 123
***Tab. 6.1:** Typische Lastmomente cityEL* 146
***Tab. 6.2**: Versuche zur Systemauslegung* 157