Technische Universität Berlin

Fakultät IV – Elektrotechnik und Informatik

Institut für Energie- und Automatisierungstechnik

Fachgebiet für allgemeine Elektrotechnik und Systemelektronik

Diplomarbeit

Dynamik Verbesserung von Traktionssystemen

Entwicklung und Fahrzeugintegration eines Doppelschichtkondensatorenspeichers für ein Elektrofahrzeug.

Cand.-el:
Dimitri Tseronis
Matr.Nr: 184470
Studiengang Elektrotechnik

Betreuer:
Prof. Dr.-Ing. Dietrich Naunin
Dipl.-Ing. Jörg Folchert

Berlin, 11. März 2004

Die selbstständige und eigenhändige Anfertigung versichere ich an Eides Statt.
Berlin, den 11. März 2004

.....
Dimitri Tseronis

Kurzreferat:

Diese Arbeit untersucht die Vorteile, die für ein Elektrofahrzeug entstehen, wenn in sein Traktionssystem Doppelschichtkondensatoren integriert werden. Es werden mehrere Ansätze vorgestellt wie die Doppelschichtkondensatoren in die Antriebs-Topologie integriert werden können. Es wird ein Konzept für eine messtechnische Untersuchung erstellt und der Entwurf der benötigten Elektronik beschrieben. Im Rahmen dieser Arbeit werden sowohl alle erforderlichen Hard- und Software-Module entwickelt als auch alle Experimente durchgeführt, um herauszufinden, ob die Doppelschichtkondensatoren gemäß der „Peak Power Assistance“-Methode eine positive Wirkung auf die Reichweite, Beschleunigung und Wirkungsgrad elektrischer Traktionssysteme haben. Weiterhin wird untersucht, ob die Verbesserung verstärkt bei Antrieben auftritt, die das generatorische Bremsen unterstützen. Letztendlich wird ermittelt werden, welchen Einfluss die Kapazität des Doppelschichtkondensatorenmoduls und die Leistungsdichte der Akkumulatoren auf die Reichweite hat.

1 Verzeichnisse:

1.1 Inhaltsverzeichnis:

1 Verzeichnisse: 4
1.1 Inhaltsverzeichnis: 4
1.2 Abbildungsverzeichnis 5
1.3 Tabellenverzeichnis 6
2 Aufgabenstellung 7
3 Einleitung 9
4 Elektrische Antriebe 10
4.1 Mögliche Ansätze 10
4.2 Doppelschichtkondensatoren 11
4.3 Verbesserungspotential durch den Einsatz von Doppelschichtkondensatoren 14
4.3.1 Peak Power Assistance 15
4.3.2 DC/DC-Wandler als konstante Last 16
4.3.3 DC/DC-Wandler als Hochsetzsteller 17
5 Konzept 18
5.1 Elektronik 19
5.1.1 „Canny“ 22
5.1.2 „Scanner“ 24
5.1.3 „SixPack“ 26
5.1.4 „Data Acquisition” 28
5.1.5 „SPIDAC“ 32
5.2 Programmierung und Kommunikation 33
5.3 Labview 35
5.4 Aufbau Messstand 37
5.5 MiniEl Aufbau 40
6 Messungen 42
6.1 Messstand 42
6.2 MiniEl 46
7 Ergebnisse 53
7.1 Ergebnisse Messstand 53
7.1.1 14 Volt Zwischenkreisspannung 53
7.1.2 28 Volt Zwischenkreisspannung 56
7.1.3 Messstand Zusammenfassung 58
7.2 Ergebnisse MiniEl 59
7.2.1 VARTA Batterien (50Ah) ohne Rückspeisung 61
7.2.2 VARTA Batterien 5,6,7 (50 A) mit EPCOS 2700F ohne Rückspeisung 62
7.2.3 VARTA Batterien (50 A) mit Rückspeisung 64
7.2.4 VARTA Batterien (50 A) mit EPCOS 2700F mit Rückspeisung 65
7.2.5 VARTA Batterien (50 A) mit Montena 2600F mit Rückspeisung 66
7.2.6 VARTA Batterien (50 A) mit Montena 1500F mit Rückspeisung 67
7.2.7 VARTA Batterien (50 A) mit Montena 450F mit Rückspeisung 68
7.2.8 VARTA Batterien (50 A) mit Montena 4100F mit Rückspeisung 69
7.2.9 OPTIMA Batterien (60 A) mit Montena mit Rückspeisung 70
7.2.10 OPTIMA Batterien (60 A) mit Montena mit Montena 450F mit Rückspeisung 71
7.2.11 OPTIMA Batterien (60 A) mit Montena mit Montena 2600F mit Rückspeisung 72
7.3 MiniEl Zusammenfassung 73
7.3.1 Leistungsdichte unterschiedlicher Batterietypen 73
7.3.2 Rückspeisung 76
7.3.3 Kapazität 77
8 Schlussfolgerung 80
9 Literaturverzeichnis 82
9.1 Monografien 82

9.2 Bibliografien ... 82
9.3 Datenblätter ... 83
10 Anlagen ... 85
10.1 Anlage A - MiniEl Messreihen ... 85
10.2 Anlage B – CapCan Anwendungsschicht ... 85
10.3 Anlage C – Dateiliste und CD-ROM ... 85

1.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 4.1: Grundlegende Topologie eines elektrischen Antriebs ... 10
Abbildung 4.2: Doppelschichtkondensatoren-Aufbau (Quelle: Montena) ... 12
Abbildung 4.3: Ragone-Diagramm der Energie- über die Leistungsdichte von Energiespeichern ... 13
Abbildung 4.4: Montena Doppelschichtkondensatoren Baugrößen (Quelle: Montena) ... 13
Abbildung 4.5: Traktions-Strom ... 14
Abbildung 4.6: „Peak Power Assistance"-Ansatz Blockschaltbild ... 15
Abbildung 4.7: Ansatz mit einem DC/DC-Wandler als Laderegler Blockschaltbild ... 16
Abbildung 4.8: Ansatz mit einem DC/DC-Wandler als Energiemanager Blockschaltbild ... 17
Abbildung 5.1: „*Canny*" Blockdiagramm und Foto ... 22
Abbildung 5.2: *„Scanner"* Blockdiagramm ... 24
Abbildung 5.3: Signalkonditionierung der Stromerfassung ... 25
Abbildung 5.4: „*Scanner"* Prototypen ... 26
Abbildung 5.5: *„SixPack"* Blockdiagramm ... 27
Abbildung 5.6: SixPack Prototypen ... 28
Abbildung 5.7: *„Data Acquisition"* Blockdiagramm ... 29
Abbildung 5.8: *„Data Acquisition"* und *„SixPack"* Kombination ... 31
Abbildung 5.9: „SPIDAC" Blockdiagramm ... 32
Abbildung 5.10: „SPIDAC" Prototyp ... 33
Abbildung 5.11: Messstand Labview virtual Instrument Screenshot ... 36
Abbildung 5.12 MiniEl Labview virtual Instrument Screenshot ... 36
Abbildung 5.13: Foto der Stromquelle und Stromsenke ... 37
Abbildung 5.14: Messstand Blockschaltbild mit Batterie ... 38
Abbildung 5.15: Messstand Blockschaltbild mit „Scanner" ... 39
Abbildung 5.16: Messstand Blockschaltbild mit „SixPacks" ... 39
Abbildung 5.17: MiniEl Blockschaltbild mit CURTIS Gleichstromsteller ... 40
Abbildung 5.18: MiniEl Blockschaltbild mit 4QD Gleichstromsteller ... 41
Abbildung 6.1: ECE-15 Zyklus: Geschwindigkeit und Beschleunigung ... 42
Abbildung 6.2: ECE-15 Zyklus: Leistung, Drehmoment, Strom ... 43
Abbildung 6.3: Messstand Beispielmessung. 28V-Zwischenkreis mit Doppelschichtkondensatoren ... 45
Abbildung 6.4: MiniEl Messstrecke (Quelle: BVG) ... 46
Abbildung 6.5: Geschwindigkeitsverlauf für einen Zyklus mit Bezugspunkten ... 48
Abbildung 6.6: Batterie-Strom- und Spannungs-Verlauf für einen Zyklus mit Bezugspunkten ... 48
Abbildung 6.7: Spannungs-, Strom-, Leistungs-, und Geschwindigkeitsverlauf ... 50
Abbildung 6.8: Beschleunigung, Leistungsfaktoren und Temperaturen der SixPacks ... 51
Abbildung 6.9: Symmetriediagramm und Spannungsverläufe der Doppelschichtkondensatoren ... 52
Abbildung 7.1: Anzahl der Zyklen mit „Batterie 2" ... 54
Abbildung 7.2: Anzahl der Zyklen mit „Batterie 3" ... 54
Abbildung 7.3: Batterien 3: Spannungsverläufe –Vergleich ... 55
Abbildung 7.4: Batterie „3": Stromverläufe ... 55

Abbildung 7.5: 28-Volt: Anzahl der Zyklen 56
Abbildung 7.6: Batterien 5&6: Spannungsverlauf-Vergleich 57
Abbildung 7.7: 28-Volt: Stromverläufe 57
Abbildung 7.8: 28-Volt: Stromverlauf-Zoom 58
Abbildung 7.9: Spannungsverlauf: Batterien 5,6,7 nur Batterien ohne Rückspeisung 61
Abbildung 7.10: Batterie 5,6,7 ohne Doppelschichtkondensatoren Stromverlauf 62
Abbildung 7.11: Batterie 5,6,7, mit EPCOS 2700F/2,3V Stromverlauf 63
Abbildung 7.12: MiniEl nur Batterien mit Rückspeisung: Leistungsverlauf 64
Abbildung 7.13: Spannungsverlauf OPTIMA Batterien (60 A) mit Montena 4100F und Rückspeisung... 70
Abbildung 7.14: Reichweiten-Vergleich mit unterschiedlichen Batterien 74
Abbildung 7.15: Reichweitenverbesserung mit unterschiedlichen Batterien 74
Abbildung 7.16: Energie-Vergleich mit unterschiedlichen Batterien 75
Abbildung 7.17:Leistungsfaktor und Wirkungsgrad mit unterschiedlichen Batterien 75
Abbildung 7.18: Rückspeisungs-Energien-Vergleich 77
Abbildung 7.19: Reichweitenverbesserung und normierte Rückspeisungs-Energien 77
Abbildung 7.20: Reichweiten-Vergleich mit unterschiedlichen Kapazitäten 78
Abbildung 7.21: Leistungs-Vergleich mit unterschiedlichen Kapazitäten 78
Abbildung 7.22: Energien-Vergleich mit unterschiedlichen Kapazitäten 79
Abbildung 7.23: Leistungsfaktoren und Wirkungsgrade bei unterschiedlichen Kapazitäten 79

1.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 5.1: Firmware Funktionen 34
Tabelle 7.1: Anzahl der Zyklen Übersicht 58
Tabelle 7.2: Messungen ohne Rückspeisung nur Batterien 61
Tabelle 7.3: Messungen ohne Rückspeisung mit EPCOS 2700F 62
Tabelle 7.4: Messungen mit Rückspeisung nur Batterien 64
Tabelle 7.5: Messungen mit Rückspeisung und EPCOS 2700F 65
Tabelle 7.6: Messungen mit Rückspeisung und Montena 2600F/2,5V 66
Tabelle 7.7: Messungen mit Rückspeisung und Montena 1500F/2,5V 67
Tabelle 7.8: Messungen mit Rückspeisung und Montena 450F/2,5V 68
Tabelle 7.9 Messungen mit Rückspeisung und Montena 2600+1500F/2,5V 69
Tabelle 7.10 Messungen mit OPTIMA Batterien und Rückspeisung 70
Tabelle 7.11: Messung mit OPTIMA Batterien, Rückspeisung und Montena 450F/2,5V 71
Tabelle 7.12 Messung mit OPTIMA Batterien, Rückspeisung und Montena 2600F/2,5V 72
Tabelle 7.13: Messungs-Vergleich mit unterschiedlichen Batterien 73
Tabelle 7.14: Rückspeisungs-Vergleich-Übersicht 76
Tabelle 7.15: Kapazitäten-Vergleich-Übersicht 78

2 Aufgabenstellung

Technische Universität Berlin

- Fakultät IV: Elektronik und Informatik-
- Energie- und Automatisierungstechnik -

Allgemeine Elektrotechnik und Systemelektronik
Sekretariat EN3
Einsteinufer 17
D-10587 Berlin
Tel.: +49(30)314-2121
Fax: +49(30)314-2120
oder - 4508

Berlin, den 18. Juni 2003

Diplomarbeit

für Herrn Dimitri Tseronis, Matr.: 184470

Dynamik-Verbesserung von Traktionssystemen

Entwicklung und Fahrzeugintegration eines
Doppelschichtkondensatorenspeichers für ein Elektrofahrzeug.

Für das institutseigene 1-Personen-Elektrofahrzeug auf Basis eines Mini-El soll ein Doppelschichtkondensatorenspeicher entwickelt, aufgebaut und in das Fahrzeug integriert werden. Anschließend soll mittels umfangreicher Fahrzeugtests das Verhalten eines mit einem ‚Peak-Power'-Doppelschichtspeichers ausgerüsteten Fahrzeugs hinsichtlich Reichweite und Dynamik bei variierenden Batterietypen, Kapazitätsgrößen und Ansteuerungssystemen näher untersucht werden.

Folgende Schwerpunkte soll die Arbeit umfassen:

- Konzeptionierung des Meßsystems
- Entwicklung, Aufbau und Fahrzeugintegration von mehreren Doppelschichtkondensatorenspeichern mit unterschiedlichen Kapazitäten
- Entwicklung, Aufbau und Inbetriebnahme der für die Messreihen notwendigen Elektronikmodulen sowohl für einen Laborteststand als auch für Fahrzeugversuche
- Entwicklung der zum Betrieb der Module notwendigen Mikrokontroller-Software (Assembler) als auch der Meßdatenerfassungssoftware (LABVIEW)
- Messreihen zur Untersuchung des ‚Peak Power'-Ansatzes am Laborteststand
- Messreihen zur Untersuchung des ‚Peak Power'-Ansatzes im Fahrzeug
- Auswertung der Messungen hinsichtlich Reichweite, Beschleunigung, Wirkungsgrad bei:
    - Mit und ohne Doppelschichtkondensatoren
    - Mit und ohne regenerativem Bremsen
    - Unterschiedlichen Kapazitäten
    - Unterschiedlichen Batterietypen

Betreuer: Hochschullehrer:

Dipl.-Ing. Jörg Folchert Professor Dr.-Ing. Dietrich Naunin

3 Einleitung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Verbesserung von elektrischen Traktionssystemen. Unter einem elektrischen Traktionssystem ist ein Antriebssystem zu verstehen, dessen Zugkraft durch einen elektrischen Motor erzeugt wird. Elektrische Traktionssysteme sind in einigen stationären Anwendungen integriert, wie z.B. Förderbänder, Rolltreppen und automatische Tore. Mobile Anwendungen elektrischer Traktionssysteme sind elektrische Fahrzeuge. Elektrische Bahnen für den öffentlichen Personennahverkehr wie U-, S-Bahn, Tram und elektrische Nutzfahrzeuge im Bergbau. Sie beziehen ihre Betriebsenergie aus einem Versorgungsnetz, an das sie stets angeschlossen sind. Elektrische Fahrzeuge, die sich für eine gewisse Zeit unabhängig von einem Versorgungsnetz bewegen können, werden als Pkws, Fahrräder, Indoor-Nutzfahrzeuge (Gabelstapler), Freizeit-Fahrzeuge(Golfcaddys) und Hilfsfahrzeuge für Senioren und Behinderte eingesetzt. Obwohl elektrische Antriebssysteme bei Pkws nicht sehr verbreitet sind, werden ein Reihe unterschiedlicher Modelle von Elektrofahrzeugen angeboten. In der nahen Zukunft werden sich Hybridfahrzeuge durchsetzen, die neben einem Verbrennungsmotor auch einen elektrischen Motor für die Traktion integrieren und die Vorteile beider Antriebstechnologien vereinen.

Verbrennungsmotoren beziehen ihre Energie chemisch, durch die Oxidation von Kraftstoffen, mit einer höheren Energiedichte. Elektrische Antriebe müssen mit elektrischer Energie gespeist werden, die aber nicht direkt in großen Mengen gespeichert werden kann. Dadurch kommen bei Elektrofahrzeugen Akkumulatoren zum Einsatz, die in der Lage sind, die benötigte Traktionsenergie chemisch zu speichern und sie nach Bedarf als elektrische Energie abzugeben. Ist die in den Akkumulatoren gespeicherte Energie aufgebraucht, müssen diese durch eine andere Energiequelle oder über ein Versorgungsnetz geladen werden. Zusätzlich zu den Akkumulatoren existieren noch weitere Möglichkeiten den elektrischen Antrieb mit Energie zu versorgen. Bei Solarfahrzeugen werden die Akkumulatoren über Solarzellen geladen, die fotovoltaisch Energie aus dem Umgebungslicht beziehen. Da Solarzellen nur eine sehr geringe Leistungsdichte haben, sind sie als einzige Energiequelle für einen Pkw ungeeignet. Bei Niederflur-Bussen wird das elektrische Antriebssystem über einen Generator gespeist, der von einem Verbrennungsmotor angetrieben wird. Besonders vielversprechend ist die Brennstoffzellen Technologie, an der zurzeit noch geforscht wird. Brennstoffzellen würden es ermöglichen, Wasserstoff als Energieträger zu verwenden und sie würden eine für Pkws ausreichende Leistungsdichte zulassen. Es existieren bereits die ersten Prototypen. Hauptsächlich werden zurzeit noch Akkumulatoren als Energiespeicher in Elektrofahrzeugen eingesetzt.

Elektrofahrzeuge haben gegenüber Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren einige Vorteile. Handelt es sich um „reine“ Elektrofahrzeuge, ist als wichtigster Vorteil die lokale Emissionsfreiheit und die Lösung vom Primärenergieträger Erdöl zu nennen. Die Emissionsfreiheit ist so zu verstehen, dass während des Betriebs vor Ort keine Emissionen entstehen. Emissionen entstehen in den Kraftwerken, die das öffentliche Stromversorgungsnetz speisen, aus dem auch die Ladegeräte der Akkumulatoren ihre Energie beziehen. Die Energie der Kraftwerke kann aber außer aus fossilen Brennstoffen auch aus regenerativen Energiequellen stammen. Elektrofahrzeuge verursachen im allgemeinen weniger Lärm als die herkömmlichen Verbrennungsmotoren und haben einen sehr wartungsarmen Betrieb. Elektrofahrzeuge benötigen wegen der günstigen Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie der Elektromotoren kein Getriebe und verursachen im Leerlauf keine Schadstoff- oder Geräusch-Emissionen. [13] Elektrofahrzeuge, Hybridfahrzeuge oder Fahrzeugtypen, die mindestens einen elektrischen Motor in ihrem Antriebssystem integrieren, können die kinetische Energie, durch generatorisches Bremsen teilweise zurückgewinnen. Bei „reinen“ Verbrennungsmotor-Fahrzeugen die nur einen Verbrennungsmotor haben, geht diese Energie verloren.

Elektrofahrzeuge haben sich bis heute nicht durchsetzen können, da sie gegenüber den Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren signifikante Nachteile haben. Wegen der niedrigen Energiedichte der Akkumulatoren gegenüber Brennstoffen wie Benzin und Diesel, ist die Energiemenge an Bord eines Elektrofahr-

zeugs eingeschränkt. Daraus resultiert, dass Elektrofahrzeuge eine geringe Reichweite (bis 100km) und eine niedrige Endgeschwindigkeit (durchschnittlich unter 100km/h) haben. Die Möglichkeit eine geringe Nutzlast zu transportieren und das üblicherweise hohe Leergewicht ist ebenfalls auf die Akkumulatoren zurückzuführen. Die hohen Kosten der Akkumulatoren und ihre geringe Lebensdauer (500-1000 Zyklen) sind ebenfalls als Nachteile zu nennen, die einer Anschaffung von Elektrofahrzeugen wiedersprechen. Hinzu kommt, dass Elektrofahrzeuge nur eingeschränkt verfügbar sind. Während der Ladungsphase der Akkumulatoren können sie nicht benutzt werden. Dass sich Elektrofahrzeuge als Pkws jemals durchsetzen werden, ist zweifelhaft. Das kann sich ändern, wenn eine Technologie zur Verfügung steht, die es erlaubt mit höheren Energiedichten regenerative Energieformen zu speichern.

4 Elektrische Antriebe

Die verfügbaren elektrischen Fahrzeuge sind sehr unterschiedlich. Es existieren zahlreiche Technologien, die in einem Elektrofahrzeug zum Einsatz kommen können. Vereinfacht kann man aber behaupten, dass jedes Elektrofahrzeug über einen Motor, eine Batterie und einen Stromsteller verfügt. Der Motor wird für die Traktion benötigt. Die Batterie ist als Primärenergiespeicher vorhanden. Der Stromsteller regelt oder steuert das Drehmoment bzw. die Drehzahl des Motors. Das vereinfachte Blockschaltbild der grundlegenden Topologie eines elektrischen Antriebs ist in Abbildung 4.1 dargestellt.

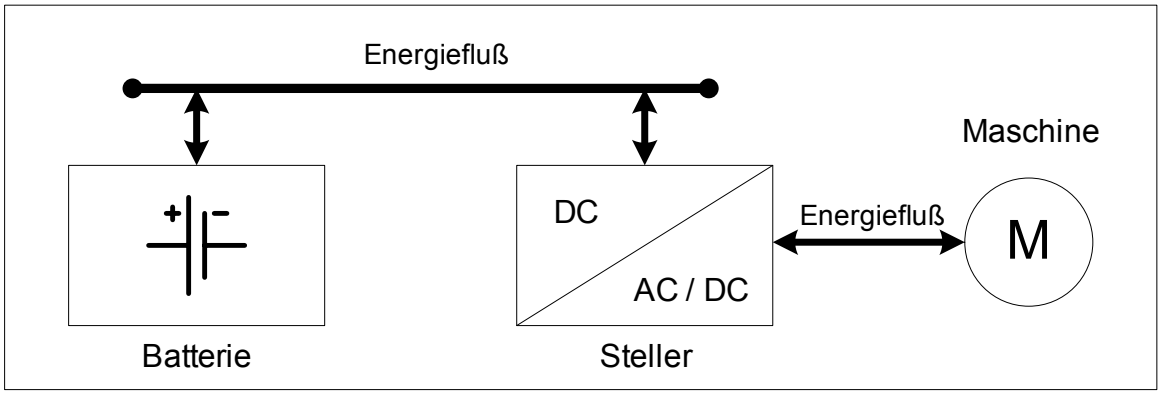


Abbildung 4.1: Grundlegende Topologie eines elektrischen Antriebs

Da Batterien immer eine Gleichspannung zur Verfügung stellen und der Batterie-Strom von dem Lastwiderstand abhängig ist, wird ein Stromsteller benötigt. Für den Fall, dass der Motor eine Gleichstrommaschine ist, muss der Stromsteller je nach Vorgabe des Fahrers die Stromzufuhr von der Batterie zur Maschine regulieren. Für den Fall, dass es sich bei dem Motor um eine Wechselstrommaschine handelt, muss der Stromsteller zusätzlich den Wechselstrom erzeugen. Um mit dem Fahrzeug generatorisch Bremsen zu können, muss der Stromsteller die von dem Motor erzeugte Spannung so umformen, dass die Akkumulatoren auch geladen werden können. Da es viele unterschiedliche Akkumulator- und Maschinen-Technologien gibt, existieren ebenfalls viele Möglichkeiten die Leistungselektronik und Automatisierung des Stromstellers zu realisieren. Es existieren Elektrofahrzeuge, bei denen einige Komponenten vielfach vorhanden sind, z.B. Radnabenmotoren oder auch zusätzliche Komponenten vorhanden sind wie ein fest installiertes Ladegerät.

4.1 Mögliche Ansätze

Unabhängig von den vielen unterschiedlichen Technologien im Fahrzeugbau gilt für Elektrofahrzeuge, dass ihre Reichweite, bei gleichem Belastungsmuster, von der Energiemenge abhängt die in den

Batterien gespeichert ist. Der Wirkungsgrad eines Elektroautos ist das Produkt der Wirkungsgrade seiner Teilkomponenten. Die in den Batterien gespeicherte Energie, abzüglich der Verluste bedingt durch den Wirkungsgrad des Stellers und des Motors ergibt die Traktionsenergie. Diese kann effektiv zur Überwindung des Rollwiderstands, des Luftwiderstands, des Steigungswiderstands und des Beschleunigungswiderstands eingesetzt wird. Folglich kann eine Reichweitenverbesserung nur durch eine Erhöhung der Batteriekapazität oder durch die Verbesserung der Wirkungsgrade der Teilkomponenten stattfinden. [14]

Die Dynamik eines Fahrzeugs wird hauptsächlich durch die Antriebsleistung des Motors und durch das Gewicht bestimmt. Unter Dynamik sind die maximale Beschleunigung und ihre Verfügbarkeit zu verstehen. In Elektrofahrzeugen werden üblicherweise Gleichstrommaschinen integriert. Wegen den vergleichsweise niedrigen Kosten und dem geringen Schaltungsaufwand hat man bei den Gleichstrommotoren die Probleme wie Bürstenfeuer oder die niedrige Leistungsdichte ignoriert. Theoretisch ist die optimale Wahl der Motortechnologie für ein Elektrofahrzeug ein permanent erregter Synchronmotor, da er nicht nur den höchsten maximalen Wirkungsgrad hat, sondern auch die höchste Leistungsdichte aufweist. Die Ansteuerungs- und Leistungselektronik sind für den Synchronmotor zwar etwas aufwendiger, insgesamt ist es aber möglich, gegenüber Gleichstrommotoren, ein Teil der Energie und des Gewichts zu sparen.

Damit der Motor und die Batterien eines Elektrofahrzeugs optimal zusammen funktionieren, bedarf es dem richtigen Stromsteller. Jede Motortechnologie benötigt mehr oder weniger komplizierte Schaltungen. Das Volumen oder das Gewicht des Stromstellers ist nicht entscheidet gegenüber dem Wirkungsgrad und der daraus resultierenden Wärme, die abgeführt werden muss. Durch die Verbesserung von den Halbleitereigenschaften können die Verluste minimiert werden, die sich durch das Schaltverhalten und dem Durchlasswiderstand der Leistungsschalter ergeben. Die Entwicklungen in der analogen und digitalen Mikroelektronik führen dazu, dass mit der Zeit die Ansteuerung und die Regelung des Motors immer umfangreicher, detaillierter und dadurch präziser und effizienter realisiert werden kann. Ist ein Stromsteller für ein Fahrzeug zu leistungsschwach dimensioniert, kann er die Dynamik und die Reichweite des Fahrzeugs einschränken. Ist ein Steller optimal für ein Fahrzeug ausgelegt und niederinduktiv angeschlossen, kann er den Wirkungsgrad des Antriebs deutlich verbessern. [22-24]

Es existieren mehrere unterschiedliche Typen von Akkumulatoren mit zahlreichen Vor- und Nachteilen. Die wichtigsten Faktoren der Traktionsbatterien sind: Energiedichte, Leistungsdichte und Selbstentladung. Als Traktionsbatterien kommen sehr häufig Blei-Säure-Akkumulatoren zu Einsatz, da sie relativ preiswert sind und dadurch einen wirtschaftlichen Vorteil gegenüber den neueren Batterietypen haben. Die höchste Energiedichte weisen Lithium-Ionen Batterien auf. Ihre Energiedichte ist bis zu fünf Mal so hoch wie bei Blei-Säure-Akkumulatoren. Die höchste Leistungsdichte wurde mit Nickel-Metalhydrid-Akkumulatoren erreicht. Es existieren zwar Traktionsbatterie-Prototypen der meisten Akkumulator-Technologien, aber mittelfristig werden Blei-Säure-Akkumulatoren den Markt dominieren. [13]

Sind die Teilkomponenten oder der Energiespeicher eines Elektrofahrzeugs aus wirtschaftlichen oder physikalischen Gründen nicht mehr zu verbessern, ist es möglich andere Methoden zu suchen. Ein Ansatz ist es, hohe Kapazitäten in den Antrieb zu integrieren, um die Akkumulatoren eines Fahrzeugs zu unterstützten.

4.2 Doppelschichtkondensatoren

Abgesehen von Batterien sind die Bauelemente mit der höchsten Kapazität im Verhältnis zu ihrem Gewicht und ihrem Volumen Doppelschichtkondensatoren. Doppelschichtkondensatoren sind elektrische Energiespeicher, deren Prinzip auf einem physikalischen Phänomen beruht, das von Hermann von Helmholz schon am Anfang des 19. Jahrhunderts beobachtet worden ist. Sie bestehen aus zwei Aktiv-Kohle-Elektroden, die sich in einem Elektrolyten befinden. Die Elektroden werden durch eine Membran getrennt, die das Passieren der Ionen erlaubt aber keine Elektronen durchlässt. Wird eine Spannung an die

Elektroden angelegt, werden die polarisierten Ionen von den Elektroden angezogen. Zwischen den Elektroden und dem Elektrolyten bilden sich dadurch zwei entgegengesetzt polarisierte Schichten die als elektrochemische Doppelschicht bezeichnet werden. Die Kapazität eines Kondensators ist proportional zu der Fläche seiner Elektroden und umgekehrt proportional zu ihrem Abstand. Durch die dünne Trennschicht von einigen Nanometern und die extrem große Oberfläche der Kohlenstoffelektroden sind mit Doppelschichtkondensatoren hohe Energie- und Leistungsdichten zu erzielen. Die verwendbaren Elektrolyten haben allerdings nur eine geringe Zersetzungsspannung von ein paar Volt. [1-3]

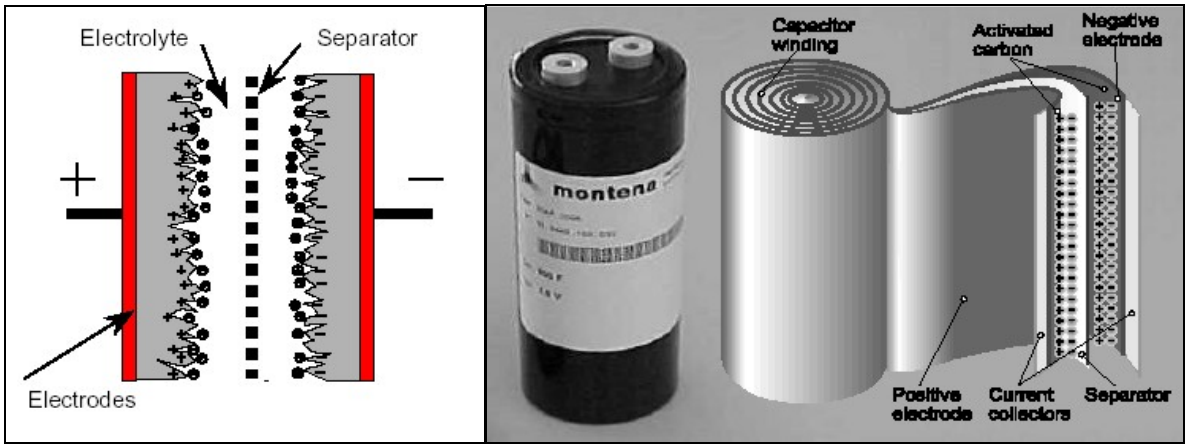


Abbildung 4.2: Doppelschichtkondensatoren-Aufbau (Quelle: Montena)

In einem Doppelschichtkondensator wird Energie elektrisch gespeichert. Im Vergleich zu den chemischen Reaktionen in den Batterien, ist die Bildung der Doppelschicht höchst reversibel und sehr schnell. Wichtig ist, dass für elektrische Anwendungen die Energie nicht umgeformt werden muss, um sie temporär zu speichern, wie es bei Batterien der Fall ist. Doppelschichtkondensatoren werden je nach Hersteller auch Super-, Ultra- und Boostkondensatoren genannt. Ihre spezifische Energiedichte ist deutlich höher als die von Aluminium-Elektrolyt Kondensatoren. Von den Herstellern wird eine Energiedichte von 10 Wh/kg angestrebt. Die spezifische Leistungsdichte ist höher als die von Batterien. Ein Doppelschichtkondensator kann mit höheren Leistungen geladen und entladen werden, als es bei Batterien möglich ist. Die Leistungsdichte ist über 10 kW/kg. Ein Ragone-Diagramm der Energiedichte und der Leistungsdichte gängiger Akkumulatoren und Doppelschichtkondensatoren ist in Abbildung 4.3 zu finden. Doppelschichtkondensatoren haben im Vergleich zu Batterien einen größeren Temperaturbereich. Sie können auch bei niedrigen Temperaturen bis zu -35° Celsius Energie aufnehmen und abgeben. Die genannten Eigenschaften, die geringe Selbstentladung und die niedrigen Produktionskosten machen den Einsatz von Doppelschichtkondensatoren in Elektrofahrzeugen und in unterbrechungsfreien Stromversorgungen sehr attraktiv.

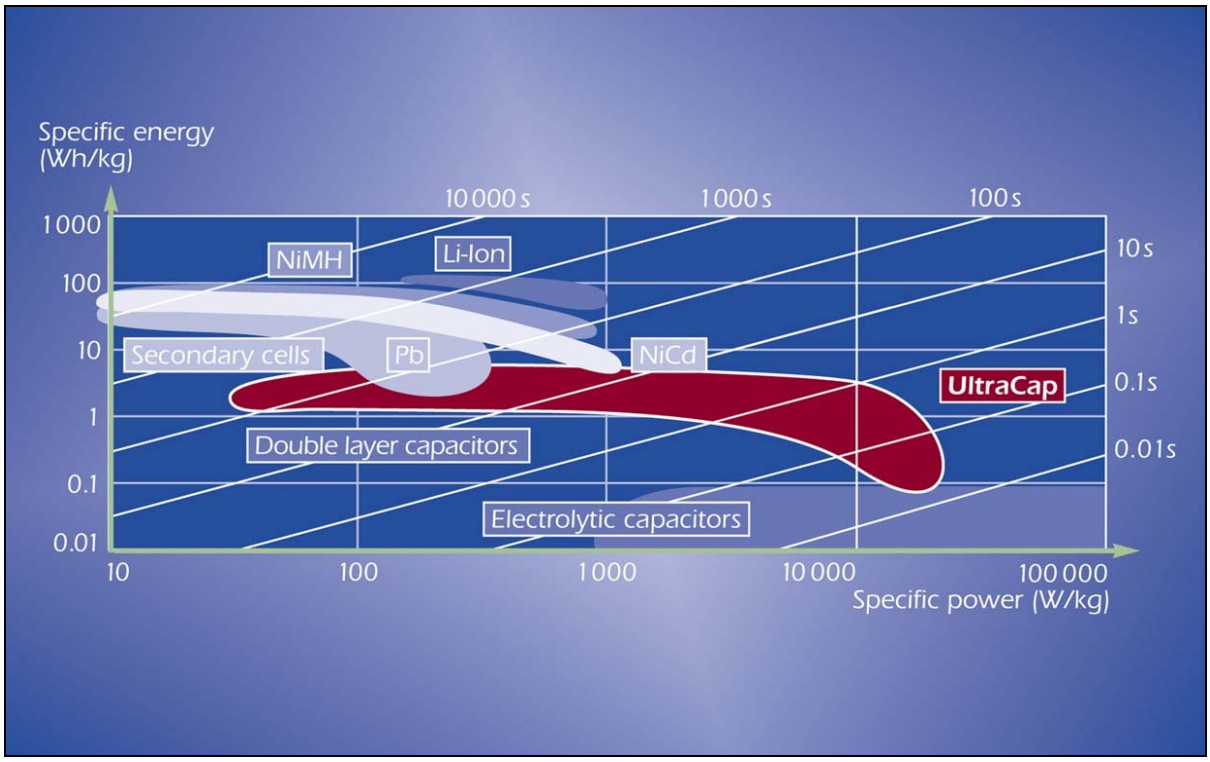


Abbildung 4.3: Ragone-Diagramm der Energie- über die Leistungsdichte von Energiespeichern (Quelle: EPCOS)

Doppelschichtkondensatoren werden in verschiedenen Bauformen gefertigt. Die Kondensatoren mit den höchsten Kapazitäten, die für den Einsatz in einem Elektrofahrzeug in Frage kommen, werden in zwei Baugrößen angeboten, die in Abbildung 4.4 illustriert sind. Es existiert eine zylindrische Form, die einen besonders niedrigen Ersatzserienwiderstand hat und eine prismatische Form die eine höhere mechanische Festigkeit aufweißt. Diese Bauformen werden mit Kapazitäten bis zu 2700 Farad und einer Spannungsfestigkeit von bis zu 2,5 Volt von mehreren Herstellern angeboten. Der maximale Dauerstrom darf 600 A nicht überschreiten. Ihre Lebensdauer wird mit mindestens 500.000 Lade-Entlade-Zyklen angegeben. [1-3]

Abbildung 4.4: Montena Doppelschichtkondensatoren Baugrößen (Quelle: Montena)

4.3 Verbesserungspotential durch den Einsatz von Doppelschicht-kondensatoren

Wegen ihrer geringen Reichweite werden Elektrofahrzeuge hauptsächlich im Stadtverkehr eingesetzt. Charakteristisch am Stadtverkehr sind kurze Strecken mit vielen Beschleunigungs- und Bremsphasen und ein geringer Anteil an Fahrten mit konstanter Geschwindigkeit. Der Verlauf des Stroms, der aus der Batterie entnommen wird, ist sehr unregelmäßig. Um das Fahrzeug zu beschleunigen, stoßen die Batterien an ihre Leistungsgrenzen. Um das Fahrzeug mit einer konstanten Geschwindigkeit zu fahren, ist der Strombedarf eher gering. Bei regenerativen Bremsvorgängen ändert der Strom seine Polarität. Ein Beispiel der Stromentnahme aus der Batterie eines Elektrofahrzeugs ist in der folgenden Abbildung zu erkennen.

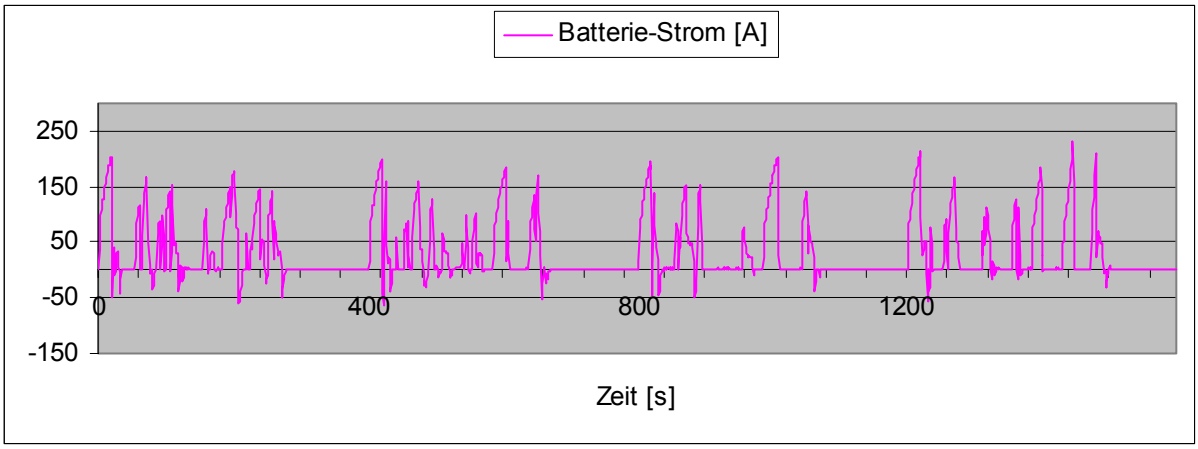


Abbildung 4.5: Traktions-Strom

Das Auftreten der Spitzenströme verursacht Verluste, die über den inneren Widerstand der Batterie und über die ohmschen Widerstände der Verbindungskabel abfallen. Die Verlustleistung über den inneren Widerstand der Batterie hängt von dem Quadrat des Batterie-Stroms ab. Daraus folgt, dass ein gemittelter/gleichmäßiger Stromverlauf gegenüber dem Abgebildetem Stromverlauf weniger Verluste in der Batterie verursachen würde obwohl die mittlere Leistungsentnahme gleich bleiben würde. Das ist mathematisch so zu erklären, dass die Summe der Quadrate der Verlaufswerte immer größer ist als die Summe des Quadrats deren Durchschnitts. Das bedeutet, dass wenn der Batterie-Strom geglättet werden kann, bei gleichbleibender Belastung mehr Nutzleistung der Batterie zu entnehmen ist .

Der hohe Leistungsbedarf und der hohe Leistungsüberschuss von den Beschleunigungs- und Bremsvorgängen entsteht, sind nur durch die Leistung des elektrischen Motors begrenzt. Hat der Motor höhere Leistungswerte als die Batterie, dann können diese Leistungsreserven des Motors nicht genutzt werden. Um dennoch mit einer leistungsschwachen Batterie einen leistungsstarken Motor ausnutzen zu können, ist es möglich, die Batterie durch einen Energiezwischenspeicher mit einer hohen Leistungsdichten zu puffern. Das ist besonders für regenerative Bremsvorgänge wichtig, da die zeitlich langsamen elektrochemischen Vorgänge in den Batterien, durch schnelle Polaritätswechsel nur zum Teil die Bremsleistung wirklich speichern können.

Um den Batterie-Strom zu glätten und um Leistungsspitzen abzufangen, können Doppelschichtkondensatoren eingesetzt werden. Sie sind theoretisch in der Lage entsprechend höhe Ströme, über einen Zeitraum von 0-20 Sekunden Ströme zu speichern. Um die Spannungen zu verkraften, die bei elektrischen Traktionssystemen üblich sind, müssen die Doppelschichtkondensatoren wegen ihrer niedrigen Spannungsfestigkeit in Reihe geschaltet werden. So wird eine äquivalente Kapazität gebildet, die die Gesamt-

spannung auf die in Reihe geschalteten Kapazitäten aufteilt. Um diese Kapazität in den Antrieb zu integrieren, existieren verschiedenen Möglichkeiten, die in den folgenden Kapiteln erläutert werden.

4.3.1 Peak Power Assistance

Eine dieser Möglichkeiten ist der so genannte „Peak Power Assistance“-Ansatz. Wie auch in der Abbildung 4.6 in dem dargestellten Blockdiagramm zu erkennen ist, werden bei diesem Ansatz, das Modul der in Reihe geschalteten Doppelschichtkondensatoren, einfach an den Spannungszwischenkreis angeschlossen. Parallel zur Batterie und dem Eingang des Stromstellers. Die Doppelschichtkondensatoren müssen für die maximale Zwischenkreisspannung dimensioniert sein. Ergibt sich ein höherer Leistungsbedarf, den die Batterie nicht bewältigen kann, können die Doppelschichtkondensatoren den Antrieb mit zusätzlicher Energie versorgen.

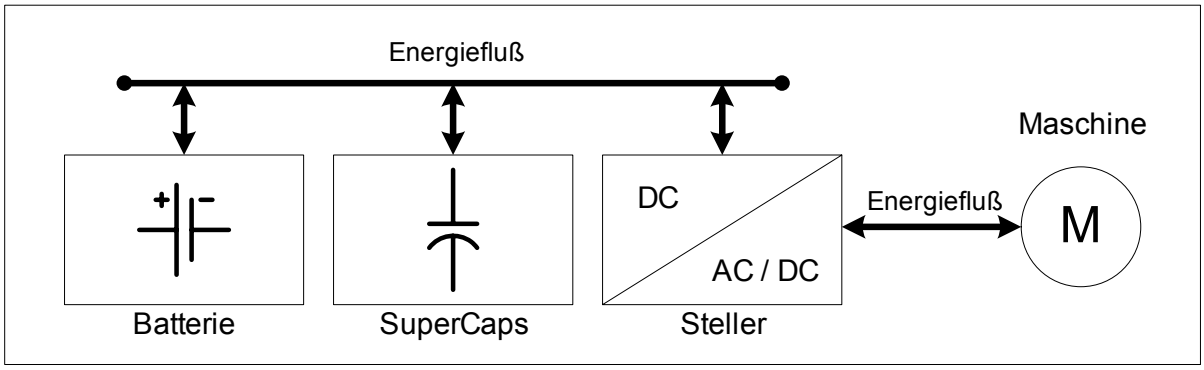


Abbildung 4.6: „Peak Power Assistance”-Ansatz Blockschaltbild

Das elektrische Verhalten der Doppelschichtkondensatoren ist fast identisch zu Aluminium-Elektrolyt-Kondensatoren. Kondensatoren sind spannungsgesteuerte Energiespeicher. Bricht die Zwischenkreisspannung ein, werden die Kondensatoren entgegenwirken und den Zwischenkreis mit Strom versorgen. Würde sich die Zwischenkreisspannung plötzlich erhöhen, würden die Kondensatoren überschüssige Energie aufnehmen. Die Kondensatoren haben eine Tiefpass-Wirkung auf die Zwischenkreisspannung. Der Batterie-Strom kann nur indirekt verändert werden. Obwohl dieser Ansatz sehr einfach zu realisieren ist, da kein zusätzlicher Schaltungsaufwand existiert, ist nur dann eine Reichweitenverbesserung zu erwarten, wenn die Batterie weniger Leistung abgeben/aufnehmen, kann als der verwendete Antrieb. Doppelschichtkondensatoren haben eine kapazitive Entladungskennlinie. Das bedeutet, dass je größer die Spannungsunterschiede zwischen Batterieklemmen und Doppelschichtkondensatoren sind, desto höher sind die Ströme , mit denen der Spannungsunterschied ausgeglichen wird. Weiterhin, ist zu erwarten, dass die Batteriespannung in einem Elektrofahrzeug, zu keinem Zeitpunkt weniger als die Hälfte ihrer Nennspannung beträgt, sodass immer nur ein Teil des Energieinhaltes der Doppelschichtkondensatoren genutzt werden kann.

Dadurch das keine weitere Beschaltung zwischen den Doppelschichtkondensatoren und dem Spannungszwischenkreis besteht, sind die elektrischen Vorgänge nicht steuerbar. Einige Parameter der Doppelschichtkondensatoren dürfen bestimmte Wertebereiche nicht verlassen um die im Datenblatt angegebene Lebensdauer einzuhalten. Doppelschichtkondensatoren sind empfindlich gegenüber Überspannungen, negativen Spannungen und zu hohen Temperaturen. Ohne ein steuerbares Bauelement in dem Verbindungsweg der Doppelschichtkondensatoren können sie im Fehlerfall auch nicht geschützt werden. [28-30]

4.3.2 DC/DC-Wandler als konstante Last

Ein weiterer Ansatz ist es, den Stromfluss aus der Batterie in die Doppelschichtkondensatoren mit einem DC/DC-Wandler zu regeln und den Stromsteller direkt mit den Doppelschichtkondensatoren zu verbinden, so wie es in dem Blockdiagramm der Abbildung 4.7 dargestellt ist. Der DC/DC-Wandler würde für die Batterie eine quasi konstante Last darstellen und nach Bedarf die Doppelschichtkondensatoren mit dem durchschnittlichen Strombedarf laden. Nur die Doppelschichtkondensatoren würden somit dem Stromverlauf des Antriebs unterliegen. Der Strom, der durch das generatorische Bremsen entsteht, könnte in die Doppelschichtkondensatoren zurückgespeist werden. Der Vorteil von diesem Ansatz ist die aktive Glättung des Batterie-Stroms. Der DC/DC-Wandler begrenzt die Leistungsfähigkeit der Batterie, sodass die Doppelschichtkondensatoren einen größeren Teil der Last übernehmen können.

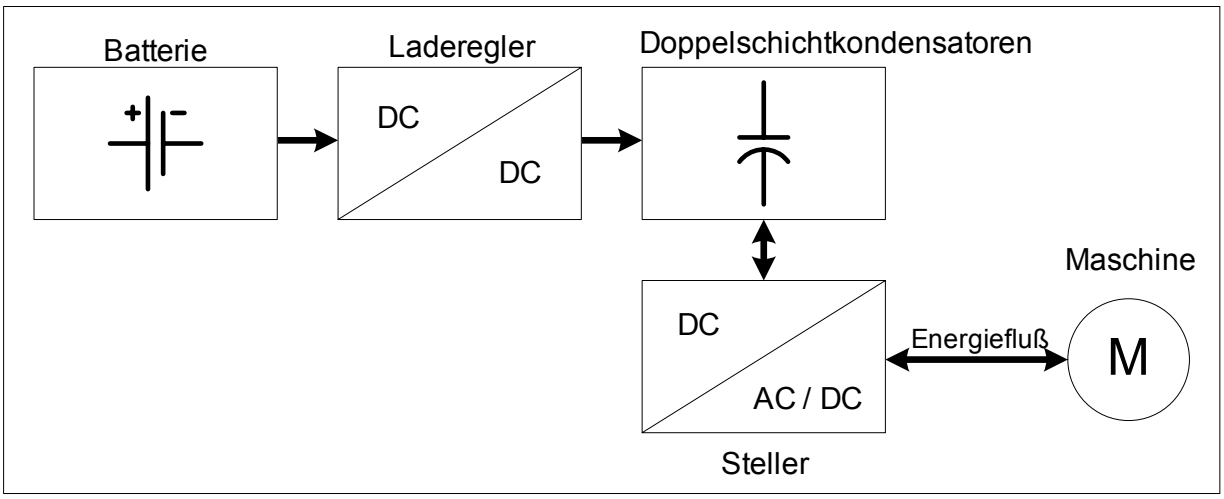


Abbildung 4.7: Ansatz mit einem DC/DC-Wandler als Laderegler Blockschaltbild

Die Realisierung ist etwas komplizierter als bei der „Peak Power Assistance"-Methode. Der benötigte DC/DC-Wandler müsste für den maximalen durchschnittlichen Lade-Strom dimensioniert sein. Er würde als Tiefsetzsteller funktionieren. Es stellt sich die Frage, wie der durchschnittliche Ladestrom festzulegen ist. Ist es ein fester Wert, kann er sich bei abweichenden Fahrweisen als ungünstig erweisen. Ist der Lade-Strom zu groß, wird die Wirkung der Doppelschichtkondensatoren reduziert. Ist der Lade-Strom zu klein, wird die Leistungsfähigkeit des Fahrzeugs eingeschränkt. Wird der Lade-Strom adaptiv berechnet, ist ein komplizierter Algorithmus notwendig und eine entsprechend umfangreiche Elektronik.

Bei dem vorherigen Ansatz existiert die Möglichkeit das die Leistung direkt von der Batterie zum Stromsteller fließt, ohne durch die Doppelschichtkondensatoren gespeichert werden zu müssen. Bei diesem Ansatz wird der Energiefluss von der Batterie zwangsweise durch den DC/DC-Wandler und die Doppelschichtkondensatoren stattfinden. Es muss untersucht werden, ob die Verbesserung die sich durch diesen Ansatz einstellen würde größer ist, als die zusätzlichen Verluste, die durch den Wirkungsgrad des DC/DC-Wandlers und der Doppelschichtkondensatoren verursacht werden.

Auch bei diesem Ansatz ist es schwierig, die Doppelschichtkondensatoren vor Fehlern zu schützen. Es müssen Sicherheitsfunktionen sowohl im Tiefsetzsteller/Laderegler als auch im Stromsteller implementiert sein. Der Stromsteller z.B. dürfte nur so lange Bremsenergie zurückspeisen, bis die maximale zulässige Spannung für die Doppelschichtkondensatoren erreicht wird.

4.3.3 DC/DC-Wandler als Hochsetzsteller

Eine weitere Methode ist, das Doppelschichtkondensator-Modul mit einem DC/DC-Wandler an den Spannungszwischenkreis anzuschließen. Ein Blockschaltbild ist in Abbildung 4.8 zu sehen. Der DC/DC-Wandler muss in der Lage sein einen bidirektionalen Energiefluss zu erlauben und den Stromfluss in beide Richtungen zu regeln. Bei Leistungsbedarf würde der DC/DC-Wandler als Hochsetzsteller funktionieren und Strom in den Spannungszwischenkreis einspeisen. Bei Leistungsüberschuss würde der DC/DC-Wandler als Tiefsetzsteller funktionieren und den Lade-Strom der Doppelschichtkondensatoren regeln. Mit dieser Topologie ist es möglich die komplette Ladung, die in den Doppelschichtkondensatoren enthalten ist, zu nutzen. Theoretisch kann bei diesem Ansatz auch ein Doppelschichtkondensator-Modul mit einer maximalen Spannungsfestigkeit benutzt werden, die nicht dem Spannungszwischenkreis entspricht. Da die Doppelschichtkondensatoren durch den DC/DC-Wandler von den anderen Teilkomponenten getrennt sind, ist die Integration von sämtlichen Sicherheitsfunktionen bei diesem Ansatz realisierbar.

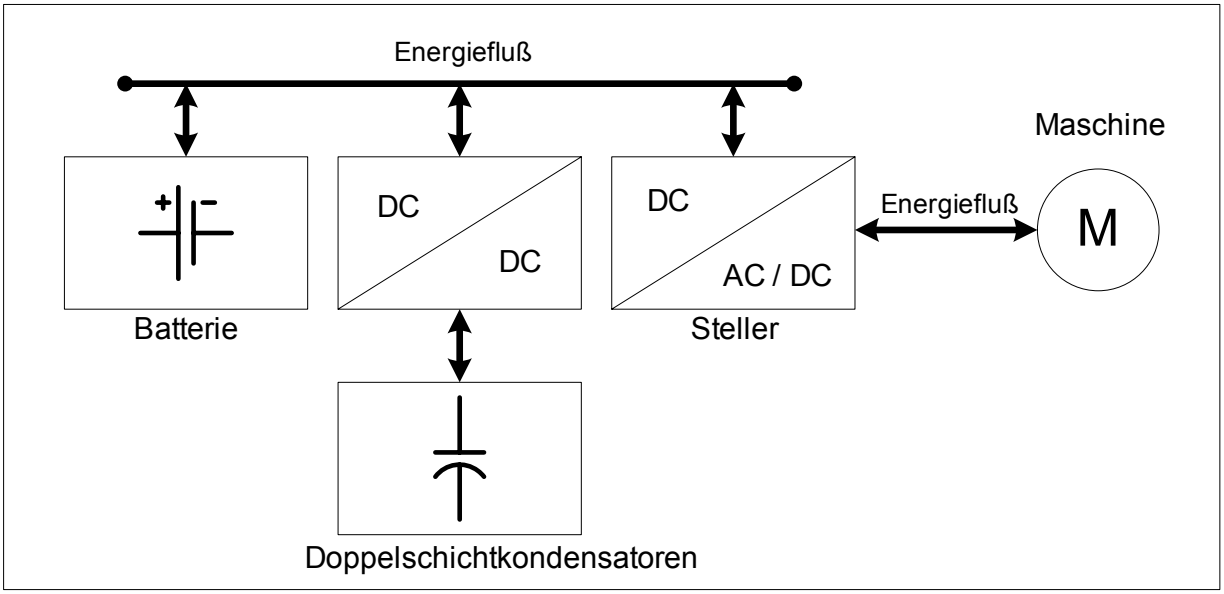


Abbildung 4.8: Ansatz mit einem DC/DC-Wandler als Energiemanager Blockschaltbild

Ist der Energiefluss in und aus den Doppelschichtkondensatoren mit einem bidirektionalen DC/DC-Wandler zu regeln, sind unterschiedliche Strategien denkbar um die Doppelschichtkondensatoren möglichst effizient zu nutzen. Einfach wäre es z.B. den Batteriestrom und die Zwischenkreisspannung zu überwachen. Werden Abweichungen von den Durchschnittswerten festgestellt, kann der DC/DC-Wandler diese ausregeln. Etwas komplizierter wäre es, auch die Geschwindigkeit des Fahrzeugs zu überwachen. Durch die Geschwindigkeits-Information ist eine Prädiktion des Leistungsverlaufs möglich. Hat das Fahrzeug z.B. seine Höchstgeschwindigkeit erreicht, werden die Doppelschichtkondensatoren nicht nachgeladen, um den zu erwartenden Bremsstrom zu speichern.

Dieser Ansatz erfordert einen DC/DC-Wandler, der hohe Kosten verursacht. Die Leistungselektronik des Wandlers müsste für die Spitzenleistungen des Antriebs dimensioniert sein. Er müsste also über den gesamten Spannungsbereich des Ein- und Ausgangs funktionieren und mehrere Kilowatt an Leistung bewältigen können. Die Regelungen und die Ansteuerungselektronik des Wandlers erfordern sehr komplizierte Schaltungen und Algorithmen. Die Energie, die in den Doppelschichtkondensatoren gespeichert wird, müsste den DC/DC-Wandler einmal während des Ladens und einmal während des Entladens passieren. Dadurch wird der Wirkungsgrad dieses Ansatzes beeinträchtigt. [6]

5 Konzept

Um das Verbesserungspotential durch die Integration von Doppelschichtkondensatoren in elektrischen Traktionssystemen zu untersuchen, ist es sinnvoll bei den einfachen Ansätzen zu beginnen und sich schrittweise den komplexeren zu nähern. Als erstes ist das Verhalten der Doppelschichtkondensatoren an sich zu erforschen und zu dokumentieren. Dieser Aufgabe haben sich hauptsächlich die Hersteller der Doppelschichtkondensatoren gewidmet. [1-3] Der nächste Schritt wäre es zu untersuchen, ob sich Doppelschichtkondensatoren dazu eignen in bestimmten Traktionsapplikationen die Batterien zu ersetzen. Da die Energiedichte der Doppelschichtkondensatoren geringer ist als die der Batterien, kommt der Doppelschichtkondensator als einziger Energiespeicher nur für Traktionssysteme mit einer relativ kurzen Reichweiten und großem Volumen in Frage. Es existieren z.B. Pilotprojekte mit Kurzstrecken-Bus-Prototypen. Für andere elektronische Systeme und besonders für die stationäre Energieversorgung eignen sich Doppelschichtkondensatoren viel besser als Batterien. [7]

Der einfachste und unkomplizierteste der Ansätze ist die im vorherigen Kapitel vorgestellte „Peak Power Assistance“-Methode. Bei diesem Ansatz wird ein Doppelschichtkondensatorenmodul parallel zur Batterie an den Spannungszwischenkreis verbunden. Alle anderen Ansätze erfordern einen leistungsstarken DC/DC-Wandler und eine komplexere Regelung. Da für diese Arbeit keine kostspielige Leistungselektronik zur Verfügung steht, beschäftigt sie sich ausschließlich mit der Untersuchung der „Peak Power Assistance“-Methode.

Wenn ein Phänomen wissenschaftlich zu untersuchen ist, existieren mehrere Herangehensweisen. Das zu untersuchende System kann z.B. in kleinere Teilsysteme unterteilt werden, die wiederum analytisch beschrieben werden können. Die Teilsysteme und ihre Interaktionen können dann simuliert werden. Die Simulation ist gegenüber der experimentellen Forschung sehr viel kosteneffektiver, da die Simulation nicht so Hardware-aufwendig ist. Unterteilt man ein elektrisches Traktionssystem in seine Teilkomponenten erkennt man, dass der Stromsteller und der Motor relativ einfach durch Simulation abgebildet werden könnten. Im Gegensatz dazu sind Batterien sehr komplexe chemische Energiespeicher, deren Verhalten nur schwierig und nur sehr vereinfacht analytisch beschrieben werden kann. Aus diesem Grund ist eine Untersuchung mithilfe von Simulationen, wegen Ihrer schlechten Übertragbarkeit, für diese Arbeit nicht geeignet.

Wenn ein Phänomen nicht analytisch beschrieben werden kann, muss es experimentell studiert werden. Für die Untersuchung der Doppelschichtkondensatoren ist es erforderlich, sie in ein Fahrzeug mit einem elektrischen Antrieb zu integrieren und alle notwendigen Größen messtechnisch zu erfassen. Allgemein sind Messungen in Fahrzeugen aufwendiger als Messungen in einem Labor. Gerade wenn eine große Anzahl von Messungen erforderlich ist, weil viele unbekannte Parameter und Schlüsselpunkte existieren, ist der Aufwand für die einzelnen Messungen gering zu halten. Da sich diese Arbeit nur mit der Verbesserung von den Energiespeichern elektrischer Antriebe beschäftigt, ist es möglich, die restlichen Komponenten des Antriebs zu emulieren. Das bedeutet, dass das Verhalten des Stromstellers und des Motors im Labor mit geeigneten Geräten nachgebildet werden kann, um die Batterien und ihre Kombination mit den Doppelschichtkondensatoren auch stationär zu vermessen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden alle erforderlichen Experimente durchgeführt, um herauszufinden, ob die Doppelschichtkondensatoren gemäß der „Peak Power Assistance“-Methode eine positive Wirkung auf die Reichweite, Beschleunigung und den Wirkungsgrad elektrischer Traktionssysteme haben. Weiterhin wird untersucht, ob die Verbesserung verstärkt bei Antrieben auftritt, die das generatorische Bremsen unterstützen. Letztendlich soll ermittelt werden, welchen Einfluss die Kapazität des Doppelschichtkondensatorenmoduls auf die Reichweiten verlängernde Wirkung hat.

Um zu untersuchen, ob die Doppelschichtkondensatoren überhaupt eine positive Wirkung auf den Antrieb haben, genügt es Messreihen mit und ohne Doppelschichtkondensatoren durchzuführen und die

Messergebnisse zu vergleichen. Ein Traktionssystem das generatorisch Bremsen kann, speist während der Bremsphasen Energie in die Batterie zurück. Im Gegensatz zu Fahrzeugen die nur beschleunigen können, wird die Batterie während der Fahrt geladen. Um diesen Unterschied zu untersuchen, benötigt man zwei Stromsteller. Einen mit generatorischem Bremsen und einen ohne die Möglichkeit des generatorischem Bremsens. Der Einfluss der Kapazität kann nur durch unterschiedliche Messreihen hervorgehoben werden, die mit unterschiedlichen großen Kapazitäten von Doppelschichtkondensatoren durchgeführt wurden. Es werden also Messungen mit und ohne Doppelschichtkondensatoren, mit unterschiedlichen Stromrichtern, unterschiedlichen Kapazitäten und unterschiedlichen Batterien durchzuführen sein.

Damit möglichst viele Schlussfolgerungen am Ende der Messvorgänge bewiesen werden können, müssen alle messbaren Faktoren des Traktionssystems erfasst werden. Bei der Batterie ist es notwendig, den Strom und die Spannung zu erfassen. Werden mehrere Batterien in Reihe verwendet, sind auch die Einzelspannungen zu erfassen. Auf die Batterie-Temperatur kann verzichtet werden, da der Temperaturanstieg während der Messungen üblicherweise keinen signifikanten Einfluss auf das elektrische Verhalten der Batterie hat. Um die Reichweite und die Beschleunigung eines Fahrzeugs festzustellen, kann man die Drehzahl und den Drehmoment des Motors messen. Eine weitere Möglichkeit ist, den Strom des Stromrichters und die Motorklemmspannung zu messen, da sie sich proportional zu Drehmoment und der Drehzahl sind. Das Verhalten der Doppelschichtkondensatoren in dem Traktionssystem ist nicht absolut vorhersehbar. Daher ist es wichtig, alle möglichen Größen zu erfassen: die Doppelschichtkondensatoren-Einzelspannungen, die Ströme und die Temperaturen. Diese Daten sind nicht nur wissenschaftlich interessant, sondern die Datenerfassung ermöglicht es die Doppelschichtkondensatoren im Fehlerfall vor Überspannungen und zu hohen Temperaturen zu schützen. Aus den Strömen und den Spannungen können die Leistungen errechnet werden und aus den Integralen der Leistungen über die Zeit ergeben sich die Energieinhalte der Speicher. Sind die Leistungen bekannt, ist es simpel den Wirkungsgrad der Doppelschichtkondensatoren herzuleiten.

Alle Faktoren des Traktionssystems sind analoge Größen, die digital in definierten zeitlichen Abständen gespeichert werden müssen. Es ist eine analog-zu-digital-Wandlung notwendig. Mit dem Gedanken, dass sich die Größen durch die Trägheit des mechanischen Anteils des Antriebs nicht schnell ändern, sollte eine Abtastrate von 1 Hz ausreichend sein. Sicherheitshalber, falls sich dieser Gedanke als fehlerhaft herausstellen sollte, sollte das Messsystem auch in der Lage sein mit der hundertfachen Abtastrate die Daten zu erfassen. Für die Auflösung der Strömwerte genügt 1 A als kleinste Einheit, da die Traktionsströme höher als 200 A werden können. Es genügt, wenn die Auflösung bei den Temperaturen kleiner als 1 °C ist. Geringere Unterschiede sind kein entscheidender Faktor für die Doppelschichtkondensatoren. Bei den Spannungen ist eine höhere Auflösung interessant. Die Spannungen sollten mindestens auf 10 mV genau sein, da bei kapazitiven Elementen kleine Spannungsunterschiede größere Energiemengen ausmachen können. Alle Fehlerfaktoren sollten so gering wie möglich gehalten werden. Da sowohl Experimente im Labor als auch im Fahrzeug geplant sind, muss das Messsystem sowohl für den stationären als auch für den mobilen Einsatz geeignet sein. Das bedeutet, dass eine gewisse mechanische Stabilität der Elektronik notwendig ist. Das Messsystem sollte für die gesamte Doppelschichtkondensatoren-Forschung geeignet sein, unabhängig von dem jeweiligen Forschungsansatz. Insgesamt wird ein Messsystem benötigt, das alle genannten Ströme, Spannungen und Temperaturen präzise genug erfassen kann, evtl. weitere Messeingänge zur Verfügung stellt, modular, erweiterbar und kostengünstig ist.

5.1 Elektronik

Käuflich erwerbbare Messsysteme wie die von National Instruments, Agilent oder von dSPACE haben abgesehen von den hohen Kosten weitere Nachteile. Sie verfügen nur über einen schmalen Messbereich, sodass es notwendig ist, die verfügbaren analogen Eingänge mit teueren Bauelementen galvanisch

untereinander zu trennen. Die Verkabelung dieser Systeme wird unübersichtlich, anfällig und immer wieder von neuem notwendig, wenn sich die Messparameter ändern. Da eine hohe Anzahl an Eingangsgrößen erfasst werden soll und ein käuflich erwerbbares Messsystem nicht geeignet oder zu teuer wäre, ist es Bestandteil dieser Arbeit, ein geeignetes Messsystem zu entwerfen und aufzubauen.

Eine der Schwierigkeiten ist es, die Spannungen der Doppelschichtkondensatoren mit einer hinreichenden Genauigkeit zu messen, ohne teure Bauelemente wie Isolationsverstärker oder Differenzverstärker zu verwenden. Es entstand die Idee die Doppelschichtkondensatoren so zu gruppieren, dass innerhalb einer Gruppe ein gemeinsamer Mess- und Masse-Bezug definiert werden kann und gleichzeitig die maximale Spannung so gering zu halten, dass noch günstige Bauelemente verwendet werden können. Dieser Bezugspunkt sollte unabhängig von der eigentlichen Leistungsmasse sein. Der Bezugspunkt einer Gruppe wird nur für die Datenerfassung und die Kommunikation verwendet und von den anderen Datenerfassungskomponenten galvanisch getrennt sein. Die galvanische Trennung muss nicht wie bei den oben genannten Systemen analog erfolgen, sondern kann nach der Datenverarbeitung über die Kommunikationselektronik realisiert werden. Es entfällt die Notwendigkeit für kostenintensive Differenzverstärker oder analoge Isolationsverstärker. Innerhalb einer Gruppe können handelsübliche kostengünstige Bauelemente verwendet werden, weil die Spannung in Ebenen unterteilt wird und nur digital entkoppelt werden müssen.

Traktionssysteme werden durch ihre Zwischenkreisspannung charakterisiert. Die meisten funktionieren nominell mit 12 oder 24 Volt. Die Bordnetze von Pkws und Lkws nutzen üblicherweise auch diese Spannungsbereiche. Es existieren Fahrzeuge, die sehr viel höhere Spannungen verwenden. Auf dem Zwischenkreis des TWIKE z.B. liegt eine Spannung von 336 Volt an. In der Zukunft sollen Traktionssysteme und Bordnetze mit einer nominellen Spannung von 36 Volt betrieben werden. Werden weitere Traktionssysteme und USV-Systeme betrachtet, erkennt man, dass eine maximale Spannung von 14 Volt und eine nominelle Spannung von 12 Volt der kleinste gemeinsame Teiler dieser Spannungen zu sein scheint. So wie bei Zellenspannungen von Akkumulatoren 1,2 Volt der kleinste gemeinsame Teiler ist.

Doppelschichtkondensatoren werden für maximale Spannungen zwischen 2,3 und 2,5 Volt hergestellt. Um sie in Traktionssysteme zu integrieren, müssen sie in Reihe geschaltet werden. Damit addiert sich die Spannungsverträglichkeit addiert und eine höhere Zwischenkreisspannung kann sie nicht zerstören. Um ein modulares Doppelschichtkondensatoren-Energiespeichersystem zu konstruieren, das in alle elektrischen Traktionssystemen integriert werden kann, ist es sinnvoll sie so zu gruppieren, dass eine Reihenschaltung für eine maximale Spannung von 14 Volt geeignet ist. Dafür werden 6 Doppelschichtkondensaten benötig, die jeweils mit einer Nennspannung von 2 Volt und einer maximalen Spannung von 2,4 Volt belastet werden. Für ein Traktionssystem mit einer max. Zwischenkreisspannung von 28 Volt schaltet man einfach zwei der Sechser-Doppelschichtkondensatoren-Module in Reihe und für ein Traktionssystem mit einer Zwischenkreisspannung von max. 42 Volt verwendet man drei Module u.s.w.

Um die Nachteile der käuflichen Datenerfassungssysteme zu umgehen, sollte das entworfene Messsystem modular aufgebaut sein. Die Datenerfassung kann wie beschrieben in Sechser-Doppelschichtkondensatoren-Gruppen unterteilt werden, um einen flexiblen Einsatz zu ermöglichen. Die erfassten Daten müssen aber auch gespeichert werden. Als Speichergerät kann z.B. ein PC, ein PDA oder ein Bordcomputer verwendet werden. Ein PC eignet sich besser für diese Aufgabe, da die gespeicherten Daten auf dem Computer einfacher ausgewertet werden können. Die Modularisierung des Systems erfordert es, die Schnittstelle(n) zwischen den einzelnen Modulen zu definieren. Das Konzept sieht vor, dass die Datenerfassungsmodule ihre Daten an das Speichergerät senden und dass das Speichergerät die Datenerfassungsparameter der Datenerfassungsmodule ändern kann. Es wird also eine digitale Schnittstelle benötigt, die eine bidirektionale Kommunikation erlaubt und die Kommunikation unter mehreren Teilnehmern verwalten kann. Außerdem sollte sie einfach galvanisch zu entkoppeln sein und eine übersichtliche Verkabelung ermöglichen. Anders ausgedrückt wird ein Feldbus benötigt, schon allein aus dem

Grund, weil es möglich sein soll, eine beliebige Zahl an Datenerfassungsmodulen zu verwenden. Das CAN-Bus-Feldbussystem von Bosch basiert auf der seriellen differenziellen Übertragung von Daten auf einem Adernpaar. Es unterstützt Übertragungsgeschwindigkeiten von bis zu 1 MBit, wird von der Automobilindustrie in Fahrzeugen eingesetzt und hat sich als Quasi-Standard etabliert. Da für den CAN-Bus schon viele integrierte Schaltungen existieren und er sehr resistent gegenüber elektromagnetischen Störungen ist, ist er für die Vernetzung des modularen Messsystems eine optimale Lösung.

Die Vorteile dieser Methode sind, dass nur ein Datenerfassungs-Modul für eines der Sechser-Module entworfen werden muss und für die restlichen Module ausreichende Kopien der gleichen Schaltung gefertigt werden müssen. Für die max. 14 Volt Modulspannung existieren zahlreiche preiswerte Bauelemente. Eine unübersichtliche Verkabelung entfällt wegen der digitalen Kommunikation über die CAN-Bus-Schnittstelle, die nur ein Adernpaar erfordert. Die Messsignale werden durch die Vor-Ort-A/D-Wandlung und differenzielle Übertragungsverfahren des CAN-Busses kaum von elektromagnetischen Störungen beeinflusst. Das Messsystem funktioniert unabhängig davon, ob die Doppelschichtkondensator-Module parallel oder in Reihe angeordnet sind. Dadurch können alle denkbaren Topologien realisiert werden.

Werden gleich große Kapazitäten in Reihe geschaltet, verteilen sich die Spannungen gleichmäßig auf die Kondensatoren auf. Es wird auch von einem kapazitiven Spannungsteiler gesprochen. Wenn die Doppelschichtkondensatoren für eine längere Zeit geladen bleiben, entladen sie sich über ihren inneren parallelen Widerstand (nicht mit dem Ersatzserienwiderstand zu verwechseln). Dieses Phänomen heißt Selbstentladung und die Geschwindigkeit des Ladungsverlustes (Selbstentladungs-Strom oder leakage current) hängt von dem Wert des inneren parallelen Widerstands ab. Dieser Widerstand ist sehr groß, sodass es nur zu Entladungsströmen von max. 5 mA kommt. Herstellungsbedingt sind die Entladungsströme nicht bei allen Doppelschichtkondensatoren gleich, sodass in einer Reihenschaltung bei einem längeren Ladungszustand die Einzelspannungen der Doppelschichtkondensatoren auseinander driften.[4] Das kann dazu führen, dass einige Kondensatoren weniger und andere mehr geladen werden und die maximale Spannungsverträglichkeit einzelner Kondensatoren überschritten wird, oder dass bei einer vollständigen Entladung sich zwar ein Mittelwert von 0 Volt einstellt, aber manche Zellen negativ geladen sind. Da an den Modulklemmen nur die algebraische Summe der Einzelspannungen anliegt, ist dieses Symmetrie-Problem nur zu erkennen, wenn alle Einzelspannungen gemessen werden. Da die Kapazitäten der Reihenschaltung die Ladungsunterschiede nicht von selbst ausgleichen können, pflanzt sich diese Unsymmetrie fort, bis sie explizit behoben wird. Wenn parallel zu jedem Kondensator gleich große Widerstände angebracht werden, die den Selbstentladungsstrom für alle Kondensatoren auf 10mA festlegen, wird der innere Widerstand „umgangen“. Diese Symmetrierungswiderstände werden gleich mit in die Datenerfassungsmodule integriert. Es existieren auch andere Ansätze die Ladungen der Reihenschaltung auszugleichen, die unter [1-3] zu finden, aber für diese Anwendung nicht geeignet sind. Basierend auf den eben genannten Anforderungen, wurden im Rahmen dieser Arbeit die in dem folgenden Kapitel beschriebenen Schaltungen entworfen.

5.1.1 „Canny“

Die Modularität des Messsystems beschränkt sich nicht nur auf die einzelnen Schaltungen für die Datenerfassung, Datenverarbeitung und Datenspeicherung, sondern die Schaltungen an sich sind modular gegliedert. Jede Schaltung besteht aus einer analogen Signalkonditionierung, einer Arithmetisch-Logischen-Einheit, einer Stromversorgung und einer Kommunikationseinheit. Der Kern, der sich aus Mikrocontroller und Kommunikationscontroller ergibt, wird in den folgenden Schaltungen wiederholt verwendet und trägt den Namen „*Canny*“. Dieser Grundbaustein des Messsystems besteht aus einem ATMEL AVR AT90S8535 Mikrocontroller, einem Philips SJA1000T „stand alone“ CAN-Bus-Controller und einem Philips PCA82C250 Transceiver.

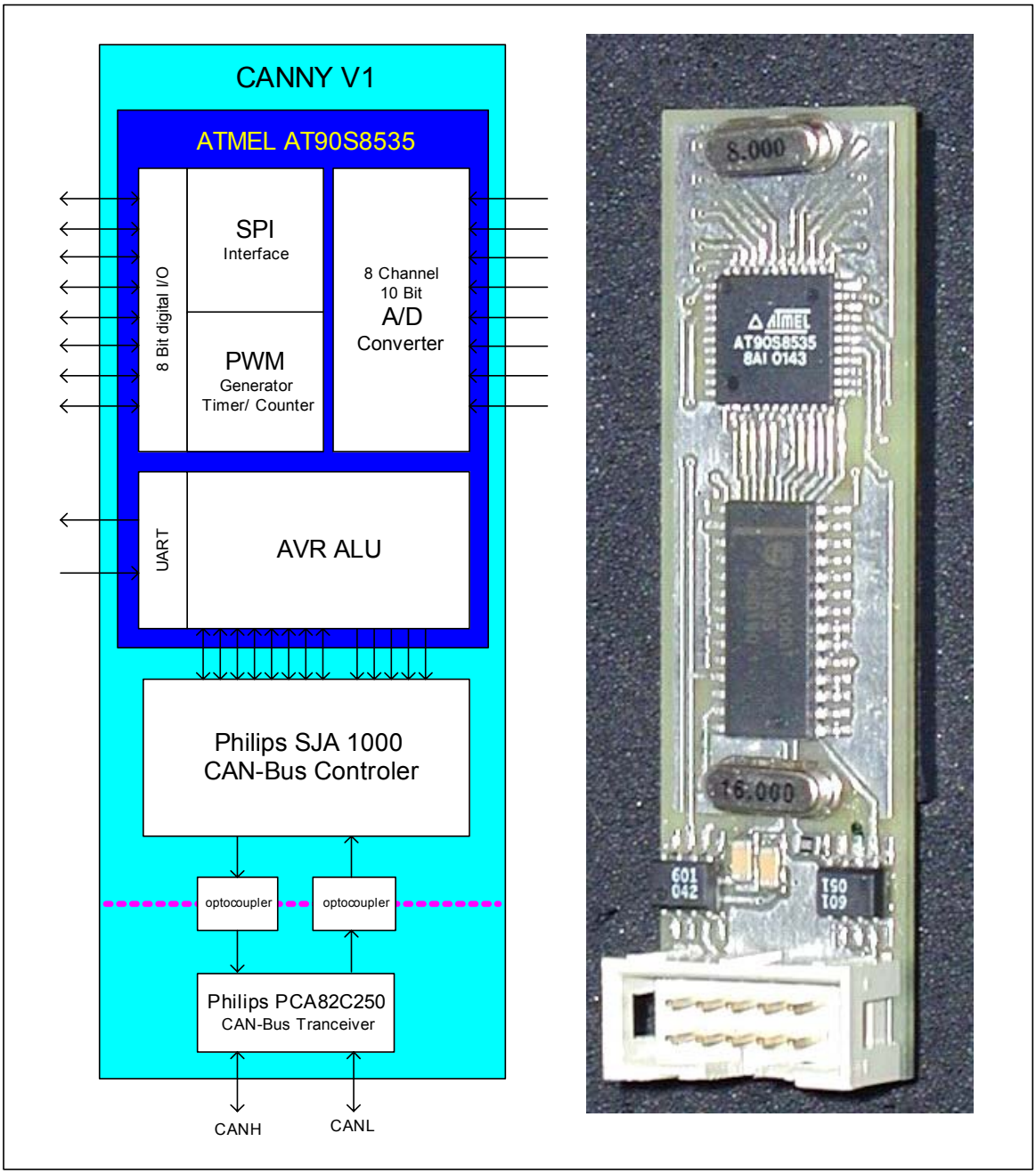


Abbildung 5.1: „*Canny*“ Blockdiagramm und Foto

Der AT90S8535 enthält einen 8-Bit-RISC-Prozessor in Harvard Architektur. Er hat einen niedrigen Stromverbrauch und einen Durchsatz von 8 MIPS bei einem Systemtakt von 8 MHz. Er verfügt über einen 8 Kilobyte großen, nichtflüchtigen Flashspeicher für den Programmcode und ein jeweils 512 Byte großes EEPROM und SRAM für Daten. Die integrierte Peripherie besteht aus einem 10-Bit-Analog/Digital-Wandler mit 8 Kanälen, einer synchronen und einer asynchronen seriellen Schnittstelle, 3 Zählereinheiten, einem „Watchdog“, einer Multiplikationseinheit und einem analogen Komparator. Der AT90S8535 kann in mehrere stromsparende Zustände versetzt werden und bietet außer den genannten Schnittstellen noch 32 digitale multifunktionale-Ein/Ausgänge.

Der Analog/Digital-Wandler des AT90S8535 arbeitet nach dem „Sample and Hold“ Prinzip. Der Analog/Digital-Wandler des AT90S8535 verfügt über eine Auflösung von 10 Bit bei einer absoluten Genauigkeit von 2 Bit und einer integralen Nichtlinearität von 0,5 Bit. Bei der niedrigsten und genauesten Geschwindigkeit dauert die Konversion 65 µs. Jeder der 8 Eingangskanäle des PORT A ist durch einen analogen Multiplexer mit dem integrierten Analog/Digital-Wandler verbunden. Um alle acht Eingangskanäle einmal abzutasten, braucht der Wandler dementsprechend ungefähr eine halbe Millisekunde, da er sie nacheinander abtasten muss..

Der SJA1000 beinhaltet den „object layer“, den „transfer layer“ des CAN-Netzwerks und die Schnittstelle zum Mikroprozessor. Er unterstützt zwei Betriebsmodi. Der „Basic“-Modus ist für den Betrieb in einem CAN-Bus-System vorgesehen, das nach der Spezifikation 1.2 arbeitet und nur 11-Bit-Adressen unterstützt. Der „Pelican“-Modus unterstützt aktiv die CAN 2.0B Spezifikation. Der PCA82C250 enthält die physikalische Schicht der CAN-Netzwerk Spezifikation. Er empfängt von dem SJA1000 einen logischen seriellen Datenstrom und wandelt diesen in das differentielle CAN-Bus-Signal um. Weiterhin kontrolliert der Transceiver die Steilheit der differentiellen Signale, um die EM-Strahlung zu minimieren. Er wird über zwei Optokoppler mit dem SJA1000 verbunden, sodass eine galvanische Trennung zu den restlichen Netzwerkteilnehmern entsteht.

Der AT90S8535 und der SJA1000 verfügen über keine kompatible Schnittstelle. Der SJA1000 stellt eine Motorola- oder Intel-Registerspeicher-Schnittstelle zur Verfügung, der AT90S8535 besitzt dagegen nur serielle Schnittstellen. Um die integrierten Schaltungen dennoch zu kombinieren, ist es möglich, die fehlende Register-Schnittstelle auf die I/O-Leistungen des AT90S8535 zu programmieren. Es entsteht ein kleiner, handlicher Baustein mit 8 analogen Eingängen und 8 digitalen I/Os. Der Aufwand, einen Mikrokotroller mit einem CAN-Interface nachzurüsten, obwohl schon einige auf dem Markt existieren, zahlt sich aus. Die AVR-Mikrokontroller-Familie und „Canny“ zeichnen sich durch ihre übersichtliche Architektur und der entsprechenden niedrigen Einarbeitungszeit aus. Die Entwicklungsumgebung wird vom Hersteller kostenlos gestellt und es existiert eine große Anwendergemeinde, sodass für viele Probleme schon Lösungen erhältlich sind. *Canny´s* SMD Version findet auf einem DIL-40-Sockel Platz und benötigt lediglich eine stabilisierte Spannungsversorgung von 5 Volt. Alle notwendigen Programmteile wie Initialisierung, Sende- und Empfangsroutinen sind in einer Programmbibliothek zusammengefasst und können modular und flexibel eingesetzt werden.

5.1.2 „Scanner“

Die Schaltung mit der Bezeichnung „*Scanner*” ist der erste Versuch, das konzipierte Datenerfassungsmodul zu realisieren. Es werden die Spannungen, der Strom und eine Temperatur von sechs in Reihe geschalteten Doppelschichtkondensatoren erfasst und über der CAN-Bus übertragen.

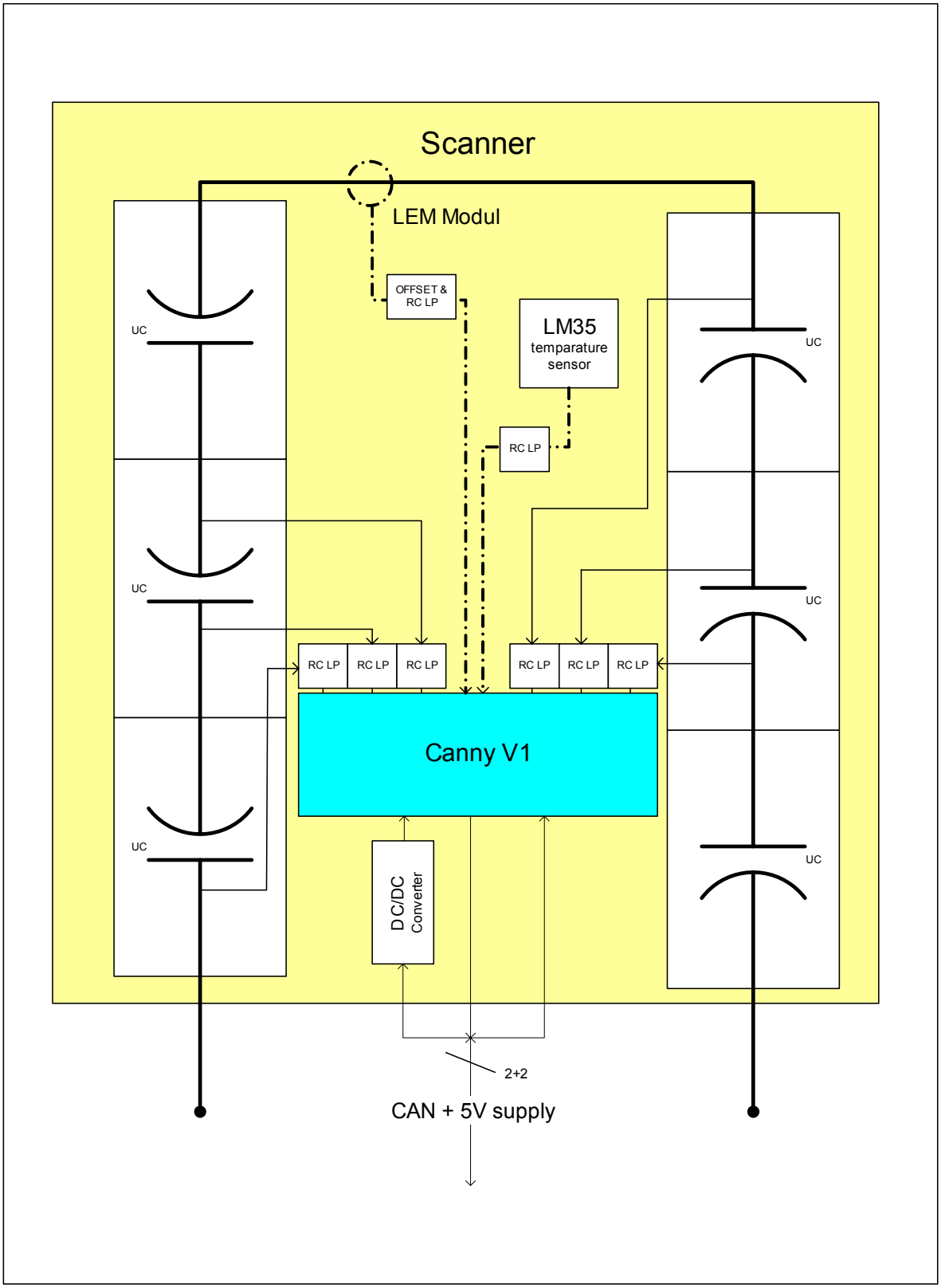


Abbildung 5.2: „*Scanner*“ Blockdiagramm

Der Kern dieser Schaltung ist der im vorherigen Unterkapitel beschriebene „*Canny*“. Die Aufgabe des Mikrocontrollers ist lediglich, die analogen Messwerte zu digitalisieren und mit einer konstanten Frequenz an das Speichergerät zu senden. Bevor der A/D-Wandler die Werte abtastet, werden sie von der Signalkonditionierung wie folgt angepasst:

Die sechs Spannungen werden auf das Potential des negativen Pols des Doppelschichtkondensators bezogen, der im positiven Sinn die niedrigste Spannungsebene einnimmt. Das bedeutet, dass die Spannungen der einzelnen Doppelschichtkondensatoren akkumuliert gemessen werden. Die maximale Spannung eines Doppelschichtkondensators darf nicht über 2,5 Volt sein. Entsprechend sollte die höchste Spannung des Sechserpacks 15 Volt sein. Die Spannungen werden in einem Verhältnis von 1:3 durch einen Spannungsteiler auf den Spannungsbereich (0 bis 5 Volt) des A/D-Wandlers angepasst und tiefpassgefiltert. Die Auflösung des A/D-Wandlers ist 10 Bit bzw. 1024 Schritte oder 15V/1024=15mV. Der Filter ist ein einfacher RC-Tiefpass erster Ordnung und wurde für eine Grenzfrequenz von 100 Hz dimensioniert. Die maximal mögliche Abtastrate liegt knapp über 100 Hz. Unter dieser Frequenz treten keine Verfälschungen der Messwerte, ausgelöst durch die Störungen der Pulsweitenmodulation des Stromrichters, auf.

Der Strom, der durch die Doppelschichtkondensatoren fließt, wird von einem LEM-Stromwandlermodul induktiv erfasst. Das LEM-Modul transformiert die tatsächliche Stromstärke in ein 1:1000 schwächeres Stromsignal (0..200mA). Dieses Signal wird über einen 50-Ohm-Shunt in ein Spannungssignal (0..10V) umgewandelt und in einem Verhältnis von 1:5 geteilt (0..2V). Um mit einem unipolaren A/D-Wandler ein bipolares Spannungssignal messen zu können, muss das Signal mit einem 2,5-Volt-Offset versehen werden, damit sich ein zu null symmetrischer Messbereich ergibt. Das resultierende Signal wird mit einem Mehrfachgegenkopplung-Tiefpass zweiter Ordnung mit einer 100 Hz Grenzfrequenz von den Störsignalen befreit. Daraus ist ersichtlich, dass Ströme von -200 A bis +200 A gemessen werden können. Kurzzeitig können auch Ströme bis zu +/-250 A erfasst werden. Die Auflösung des Messsystems befindet sich bei 500 A/1024=0,5 A. Der gegen Spannungsspitzen sensible A/D-Wandler-Eingang wird von einer Zenerdiode geschützt. Die soeben beschriebene Schaltung wird im folgenden Schaltbild dargestellt.

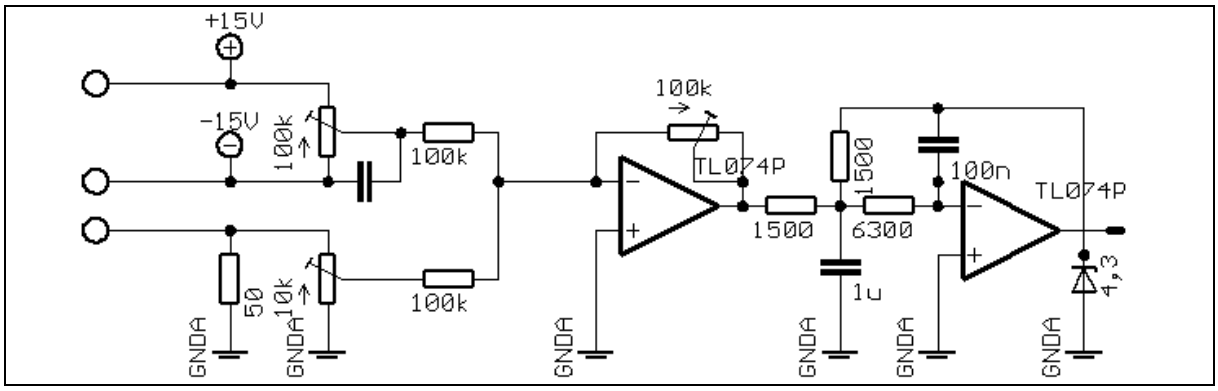


Abbildung 5.3: Signalkonditionierung der Stromerfassung

Die Temperatur wird Mithilfe des Präzisions-Temperatursensors LM35D erfasst, dessen Ausgangsspannung proportional zu der gemessenen Temperatur in Grad Celsius ist. Der Messbereich des Temperatursensors erstreckt sich von 0 bis 100 Grad Celsius. Die Ausgangsspannung gemäß dem Proportionalitätsfaktor von 10 mV pro Grad Celsius befindet sich im Bereich von 0 bis 1 Volt. Die Auflösung des Sensors liegt bei 0,5 Grad Celsius. Der Sensor muss nicht kalibriert oder abgestimmt werden, hat eine vernachlässigbare Selbsterwärmung und benötigt lediglich eine Stromversorgung. Das Temperatursignal

wird mit einem einfachen RC-Glied mit einer Grenzfrequenz von 100 Hz tiefpassgefiltert, bevor es von dem A/D-Wandler digitalisiert wird. Der Temperatursensor wird an der Außenwand von einem der sechs Doppelschichtkondensatoren befestigt (nicht an einer der Elektroden).

Auf jeder Platine ist Platz für optionale Symmetrierungswiderstände vorgesehen, die parallel zu den Doppelschichtkondensatoren angebracht sind. Die gefertigte Platine der Messschaltung dient nicht nur der Datenerfassung, sondern auch der mechanischen Stabilität der zusammengeschalteten Doppelschichtkondensatoren und Sensoren. Zu den Vorteilen von *„Scanner“* zählt, dass die verwendete Anzahl von Doppelschichtkondensatoren nur durch die Anzahl der CAN-Netzwerkadressen begrenzt wird. Zu den Nachteilen zählt, dass der Messaufbau für jedes Sechserpaket einen *„Canny“* benötigt, obwohl ein separater A/D-Wandler und die Signalkonditionierung ausreichend wären.

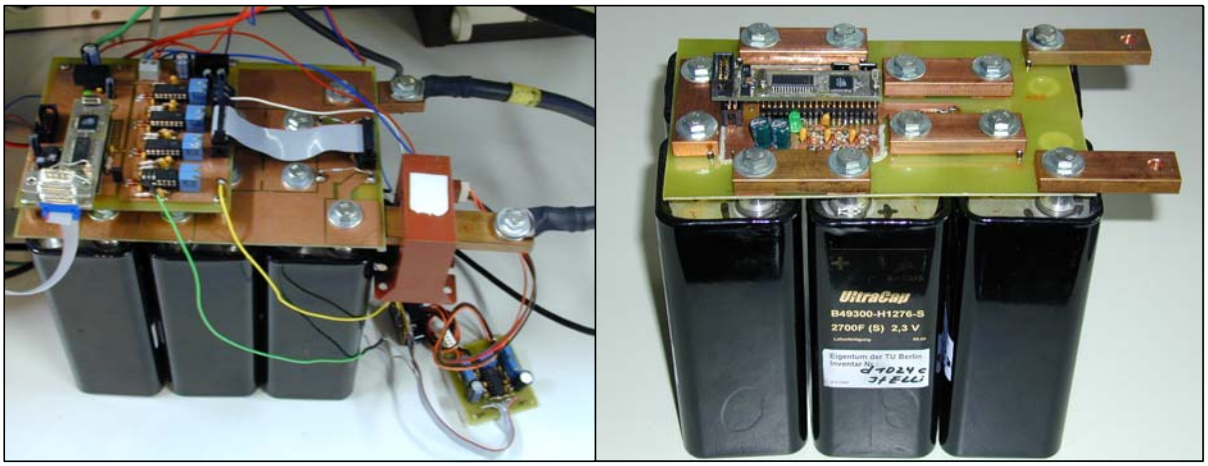


Abbildung 5.4: „*Scanner*“ Prototypen

5.1.3 „SixPack“

„SixPack“ wurde konstruiert, um die Spannungen und zwei Temperaturen von sechs in Reihe geschalteten Doppelschichtkondensatoren zu erfassen. Im Unterschied zu dem im vorherigen Unterkapitel beschriebenen *„Scanner“* verfügt *„SixPack“* über keine Strommessung und besteht nur aus der Signalkonditionierung und einem A/D-Wandler mit SPI-Schnittstelle. *„SixPack“* ist nur in Kombination mit der in dem nächsten Unterkapitel beschriebenen *„Data Acquisition“* -Schaltung als Messsystem geeignet.

Obwohl das *„Scanner“*-Modul für die Messarbeiten dieser Arbeit eigentlich ausreichend wäre, wurde das „*SixPack*“-Modul entworfen um Kosten einzusparen und gleichzeitig die Messgenauigkeit zu erhöhen. Da alle Doppelschichtkondensatoren-Module für die Messungen in Reihe geschaltet werden, ist es nicht notwendig für jeden der 6 Kondensatoren den Strom separat zu erfassen. Es genügt, wenn der Strom vor dem Zwischenkreis-Sternpunkt gemessen wird, da durch alle Doppelschichtkondensatoren wegen der Reihenschaltung zwangsweise der gleiche Strom fließt. Weiterhin ist es nicht notwendig für jedes der „*SixPack*“-Doppelschichtkondensator-Module eine Logik- und Kommunikationseinheit vorzusehen. Für den Fall das man drei oder vier *„SixPacks“* verwenden möchte, ist es kostengünstiger alle A/D-Wandler über die SPI-Schnittstelle abzufragen und nur eine Logik- und Kommunikationseinheit zu verwenden, die die gesammelten Daten verarbeitet und über den CAN-Bus weiterleitet.

Die Signalkonditionierung des *„SixPack“*-Moduls ist im Vergleich zu „Scanner“ weitgehend unverändert. Anstelle der Strommessung befindet sich ein weiterer LM35 Temperatursensor an der Platine. Die zwei Temperatursensoren messen die Temperatur an der Außenwand von 2 der 6 Doppelschichtkondensatoren. Da der verwendete *A/D*-Wandler bipolar digitalisieren kann und der Messbereich auch nega-

tive Werte annehmen kann (-5..5 Volt) wurden die Zenerdioden zum Schutz gegen Überspannungen am Eingang des A/D-Wandlers entsprechend angepasst.

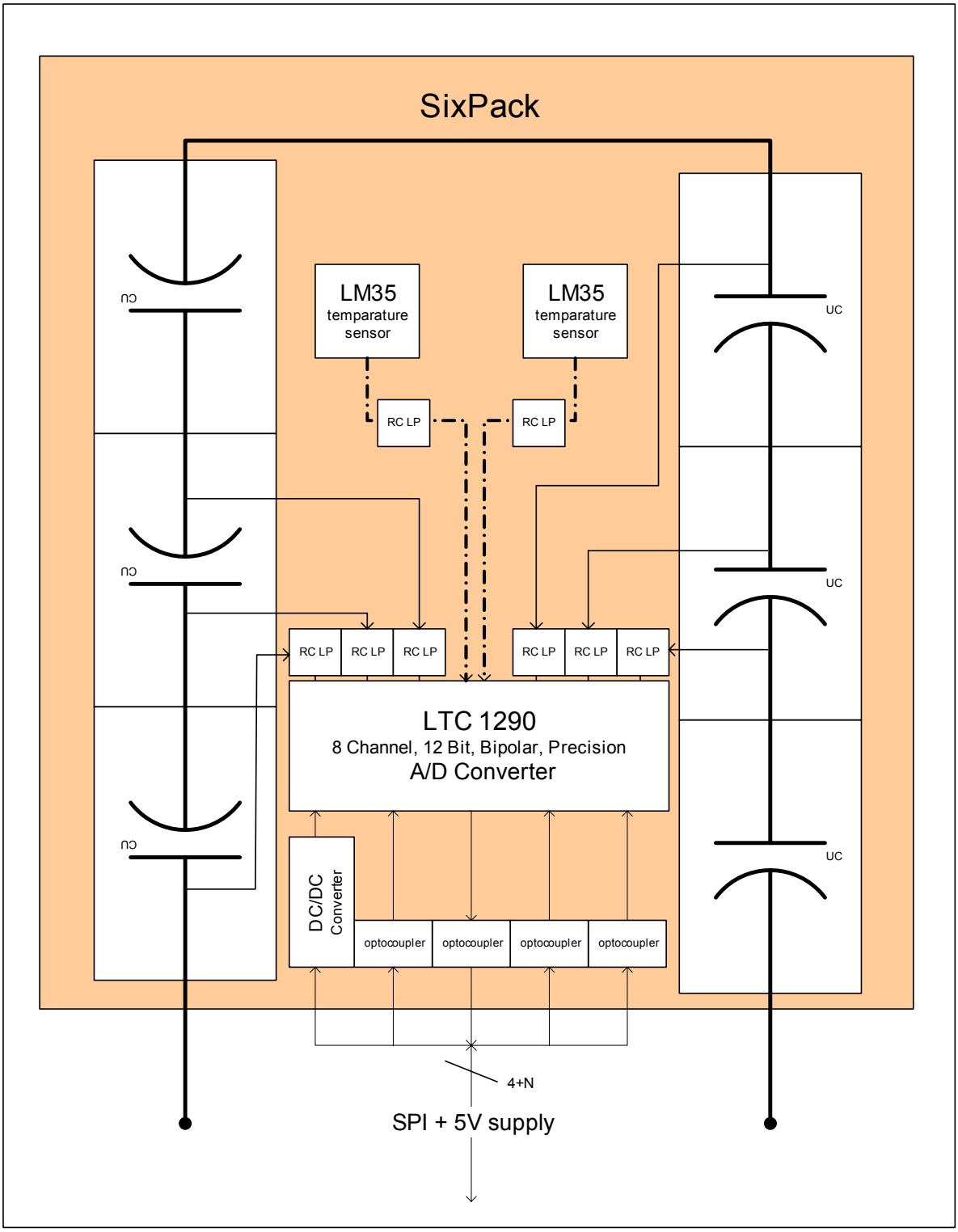


Abbildung 5.5: „*SixPack*“ Blockdiagramm

Das „*SixPack*“-Modul enthält nur einen integrierten Baustein, den A/D-Wandler LTC1270 von Linear Technologies. Der LTC1270 arbeitet nach dem „Sample and Hold“ Prinzip und verfügt über einen analogen Multiplexer mit 8 Eingangskanälen. Für unipolare Messungen beträgt die Genauigkeit 12Bit und

für bipolare jeweils Messungen 11Bit, bei einer integralen Nichtlinearität von 0,5 Bit. Die maximal mögliche Abtastrate für einen Kanal ist 50kHz und für acht Kanäle entsprechen 6.250 Hz. Die serielle synchrone Schnittstelle (SPI) des LTC1290 gehört zu den standardisierten Schnittstellen der Mikroelektronik, kann deshalb von den meisten Mikrokontrollern mit einem geringen Programmieraufwand ausgelesen werden und benötigt keine zusätzliche Beschaltung (Pegelwandler oder Tranceiver).

Im Unterschied zu *„Scanner"* wird der Messbereich von 15 auf +-15 Volt erweitert und die Auflösung von 10 auf 12 Bit erhöht. Das bedeutet, dass die Auflösung bei 30V/4096=0,00732421875Volt liegt. Die bipolaren Werte werden im Zweierkomplement-System dargestellt. Die Spannungen der Doppelschichtkondensatoren sollten idealer Weise keine negativen Werte annehmen. Bei einer starken asymmetrischen Spannungsverteilung in der Reihenschaltung der Doppelschichtkondensatoren könnte es aber theoretisch während der Entladung dazu kommen. Um diesen Fall zu untersuchen, ist ein bipolarer Messbereich notwendig.

Da wie bei dem *„Scanner"*-Modul, die Spannungen auf das Potential des negativen Pols des Doppelschichtkondensators bezogen werden der im positiven Sinn die niedrigste Spannungsebene einnimmt, muss das „SixPack"-Modul von den restlichen Modulen galvanisch getrennt werden. Diese Aufgabe übernimmt für die Spannungsversorgung ein 1W-DC/DC-Modul und für die SPI-Schnittstelle 4 digitale Optokoppler. *„SixPack"* ist im Vergleich zu *„Scanner"* kostengünstiger, benötigt aber für jeden SPI-Teilnehmer ein zusätzliches „Chip Select" Signal und ist nur für Reihenschaltungen von Doppelschichtkondensatorenmodulen geeignet.

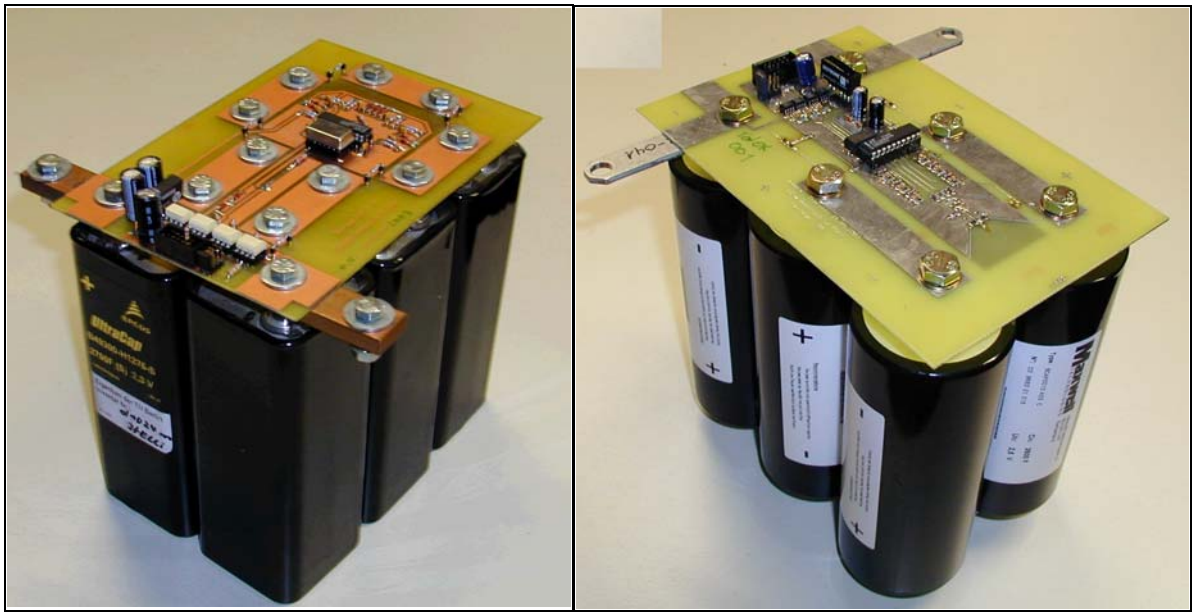


Abbildung 5.6: SixPack Prototypen

5.1.4 „Data Acquisition"

Die *„Scanner"*-Module können direkt ihre Daten über den CAN-Bus an die Speichereinheit senden die *„SixPack"*-Module hingegen benötigen eine Funktionseinheit, die in der Lage ist, die Daten über den SPI-Bus abzufragen, in CAN-Nachrichten zu bündeln und den Strom zu erfassen. Diese Aufgaben übernimmt das *„Data Acquisition"*-Modul. Zusätzlich umfasst dieses Modul auch weitere analoge Eingänge um weitere Spannungen zu erfassen, Treiber-ICs um Leistungshalbleiter anzusteuern, eine Schnittstelle zur seriellen Kommunikation mit einem PC und einen Eingang für einen HALL-Sensor zur Drehzahlerfassung. Das *„Data Acquisition"*-Modul wird in dem folgenden Blockdiagramm dargestellt.

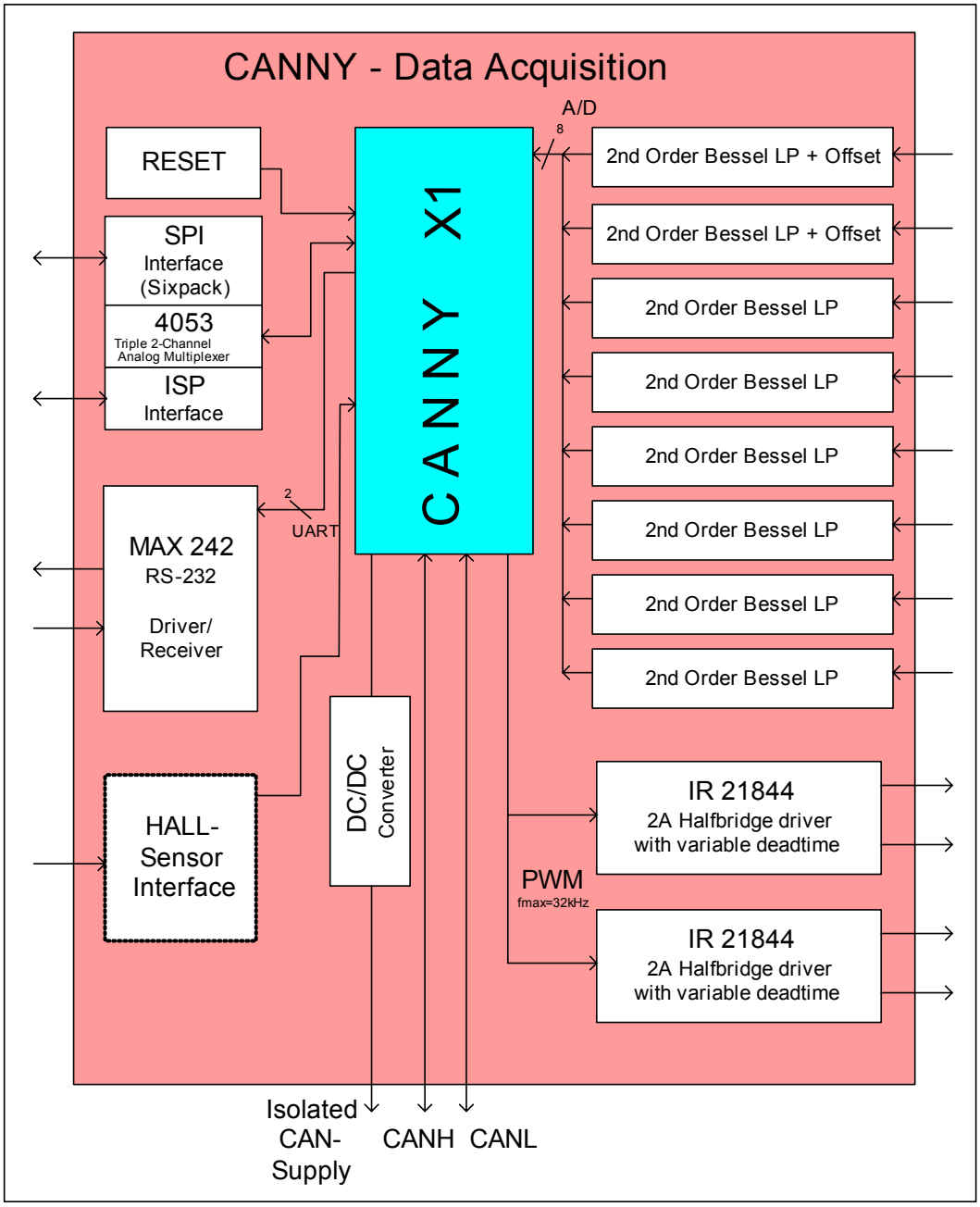


Abbildung 5.7: *„Data Acquisition“* Blockdiagramm

Wie in dem Blockdiagramm zu erkennen ist, ist der Kern des *„Data Acquisition“*-Moduls ein *„Canny“*. Die SPI-Schnittstelle wird durch einen dreifach-Zweikanal-Multiplexer aufgeteilt. Mit aktiviertem „Reset“-Signal, wird die SPI-Schnittstelle in eine Programmier-Schnittstelle für den „Canny“ umgeschaltet (ISP= In System Programming). Ist das „Reset“-Signal nicht aktiv, steht die SPI-Schnittstelle zur Kommunikation mit den *„SixPacks“* zur Verfügung. Abgesehen von den Standard-Signalleitungen „MISO“, „MOSI“, „SCLK“ sind weitere 5 „Chip Select“-Signale für die Adres*sierung* der *„SixPacks“* und eine +5-Volt-Spannungsversorgung vorgesehen. Es können also bis zu fünf „SixPacks“ an einem *„Data Acquisition“*-Modul betrieben werden.

Die in dem Mikroprozessor integrierte UART-Schnittstelle ist mit einem MAX242 Pegelwandler von MAXIM versehen, so existiert eine weitere Möglichkeit außer dem CAN-Bus mit einem PC oder einem anderen Speichergerät zu kommunizieren. Für die Schnittstelle werden nur die RX und TX Signallei-

tungen verwendet. Weiterhin ist es möglich mit dieser Schnittstelle ein Eingabegerät zu verbinden, z.B. eine Tastatur. Diese Schnittstelle hat sich während der Entwicklung der Prototypen als sehr hilfreich erwiesen.

Die Messmodule sind für den stationären Einsatz im Labor als auch für den mobilen Einsatz in einem Elektrofahrzeug konzipiert. Da es in einem Elektrofahrzeug an der Möglichkeit fehlt eine streng definierte Lastkurve zu fahren, ist es für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse essentiell eine Größe für die Gewichtung der gesammelten Daten zu haben. Aus diesem Grund wurde ein digitaler Eingang für einen HALL-Sensor vorgesehen, der zur Drehzahlmessung im Fahrzeug gedacht ist. Die Schaltung des Eingangs ist ein RC-Tiefpass, der zur Entprellung dient und eine Stromversorgung für den Sensor.

Es existieren mehrere unterschiedliche Möglichkeiten, Topologien und Strategien Doppelschichtkondensatoren in einen elektrischen Antrieb zu integrieren. Einige dieser Ansätze benötigen Schaltungen der Leistungselektronik von einfachen elektronischen Ventilen bis zu DC/DC-Wandlern und Ladereglern. Deshalb wurde das *„Data Acquisition“*-Modul vorsorglich mit Treiberschaltungen für Leistungshalbleiter ausgestattet. Die zwei Halbbrücken-Treiberbausteine IR21844 von International Rectifier werden direkt an den in dem Mikroprozessor integrierten PWM-Generator angeschlossen. Jeder der IR21844 verfügt über einen „lowside“ und einen „highside“ Spannungsausgang, der mit 2A maximalem Ausgangsstrom dazu geeignet ist, MOSFETs und IGBTs im Kilowattbereich zu schalten. Der AT90S8535 kann PWMs mit einer Schaltfrequenz von bis zu 32kHz erzeugen und der IR21844 übernimmt das Einfügen der Totzeiten für Halbbrücken-Topologien. Die Totzeiten sind über ein Potentiometer zwischen 0-2µs einstellbar. Die Stromversorgung für die „highside“-Schalter wird durch eine in den IR21844 integrierte Ladungspumpe realisiert. Es stehen somit insgesamt vier vollfunktionsfähige Treiberausgänge zur Verfügung mit denen die meisten DC/DC Topologien angesteuert werden können.

Die 8 analoge Eingänge von *„Canny“* sind an die Signalkonditionierung angeschlossen, die sich in 2 LEM-Wandler Eingänge zur Strommessung und in 6 weitere Eingänge zur Spannungsmessung aufteilen. Die Schaltung zur Strommessung ist identisch zu der von dem *„Scanner“*-Modul von Abbildung 6.3 dargestellt ist. Die Signalkonditionierung der Spannungseingänge unterscheidet sich von der zur Strommessung dadurch, *dass* kein Offset-Abgleich vorgesehen ist. Für den „Peak Power Assistance“-Ansatz ist nur ein Strom- und ein Spannungseingang notwendig. Die restlichen verfügbaren Eingänge können z.B. zur Überwachung der Batteriespannungen dienen. Für kompliziertere Ansätze z.B. mit DC/DC-Wandler sind auch die restlichen analoge Eingänge für die Regelung der Leistungselektronik notwendig.

Die Stromversorgung der Komponenten von *„Data Acquisition“* ist dezentral aufgebaut. Das Modul besitzt einen großen Spannungseingangsbereich von 10 bis 36 Volt. Aus der Eingangsspannung werden Mithilfe von DC/DC-Modulen alle anderen Spannungen erzeugt:

- 5 Volt für *„Canny“* und die Versorgung der *„SixPacks“*
- 5 Volt galvanisch getrennt für die CAN-Bus-Versorgung
- +-15 Volt für die Signalkonditionierung und die LEM-Module
- 12 Volt für die Treiber der Leistungshalbleiter (optional)

Die Kombination von „Data Acquisition“ und mehreren „SixPacks“ stellt dementsprechend eine komplette messtechnische Lösung für die Integration und Untersuchung von Doppelschichtkondensatoren in elektrischen Antrieben dar. Ein Beispiel ist in der folgenden Abbildung zu erkennen.

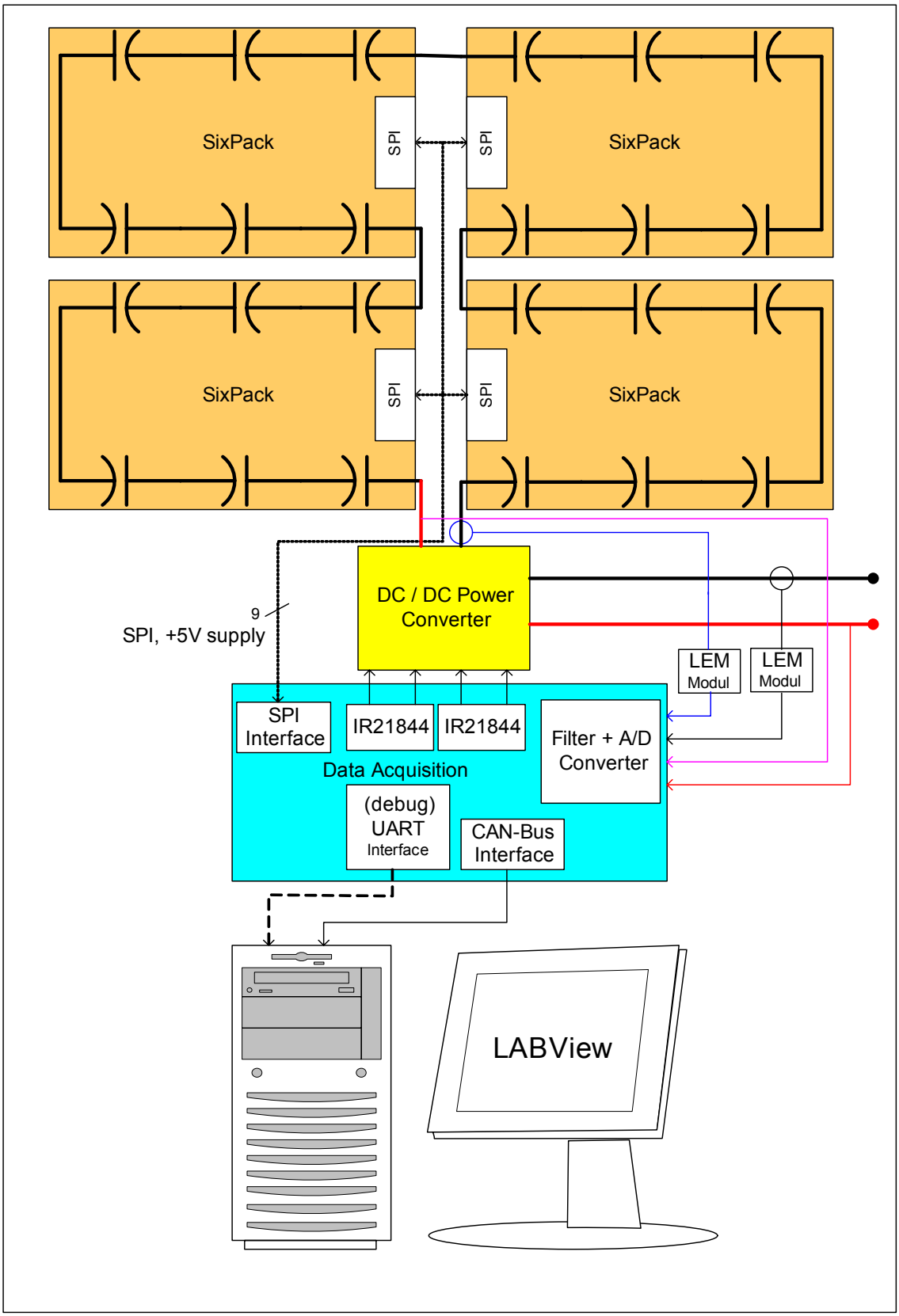


Abbildung 5.8: *„Data Acquisition“* und *„SixPack“* Kombination

5.1.5 „SPIDAC“

Im Allgemeinen möchte man auf ein aufwendiges Experiment verzichten, bis die Gewissheit herrscht, dass es sich lohnen könnte. Bevor also aufwendige Messfahrten unternommen werden, ist es sinnvoll das Verhalten von Batterien und Doppelschichtkondensatoren im Labor zu untersuchen. Die analytischen Methoden und Simulationsmöglichkeiten approximieren das reale Verhalten der Energiespeicher nicht zufrieden stellend. Um das Verhalten dennoch im Labor zu studieren, können Stromquellen und Spannungsquellen so verschaltet werden, dass mit wenig Aufwand das Verhalten eines elektrischen Antriebs emuliert werden kann. Um den Messvorgang zu automatisieren, so das auch stets vergleichbare Ergebnisse entstehen wurde das „SPIDAC“-Modul entworfen. Das Modul hat die Möglichkeit über analoge und digitale Ein- und Ausgänge alle notwendigen Laborgeräte anzusteuern.

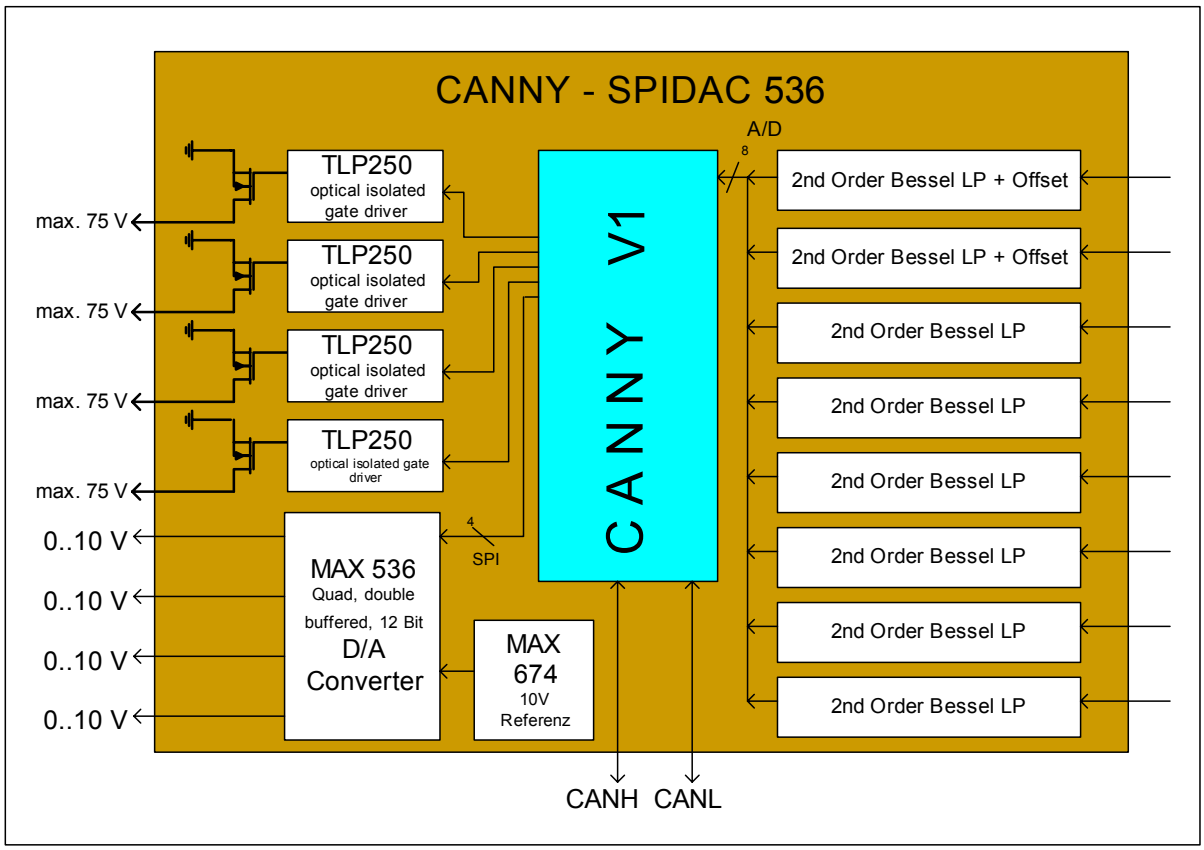


Abbildung 5.9: „SPIDAC“ Blockdiagramm

Wie in dem Blockdiagramm zu beobachten ist, unterscheidet sich die rechte Hälfte der Schaltung kaum von dem im letzten Kapitel behandeltem *„Data Acquisition“*-Modul. Die Signalkonditionierung ist identisch. An der Stelle der restlichen Peripherie befinden sich 4 MOSFETs und ein D/A-Wandler. Die 4 MOSFET-Schalter werden von dem TLP250 Treiber-ICs von Toshiba angesteuert. Der TLP250 kann einen maximalen Strom von 2A leiten und entkoppelt den Eingang optisch vom Ausgang. Die MOSFETs sind für einen maximalen Strom von 20A und einer maximalen Spannung von 75 Volt ausgelegt. Mit diesen Schaltern können Lasten zu- und weggeschaltet werden oder einfache Bauelemente wie Relais angesteuert werden. Der D/A-Wandler ist ein MAX536 von MAXIM. Er besitzt vier Ausgänge von 0 bis 10 Volt und verfügt über eine Genauigkeit von 12 Bit (10 Volt/4096=2,441mVolt) und einen Restfehler von 1 LSB. Der MAX536 empfängt von *„Canny“* seine Steuerwörter per SPI-Schnittstelle. Als Spannungsreferenz kommt ein MAX674 Baustein ebenfalls von MAXIM zum Einsatz. Die Spannungsreferenz ist

notwendig, da es möglich ist, das zum einen die Spannungsversorgung des Moduls schwanken kann und zum anderen, da es nicht garantiert ist, das eine galvanische Verbindung zum Laborgerät existiert. Die D/A-Wandler Ausgänge sind gepuffert und eignen sich um Geräte mit analogen Eingängen zu steuern, z.B. Spannungsquellen oder Stromsenken. *„SPIDAC“* ist so programmiert, dass die Ausgänge über CAN-Nachrichten ferngesteuert werden können. In der folgenden Abbildung ist einer der *„SPIDAC“*-Prototypen zu erkennen.

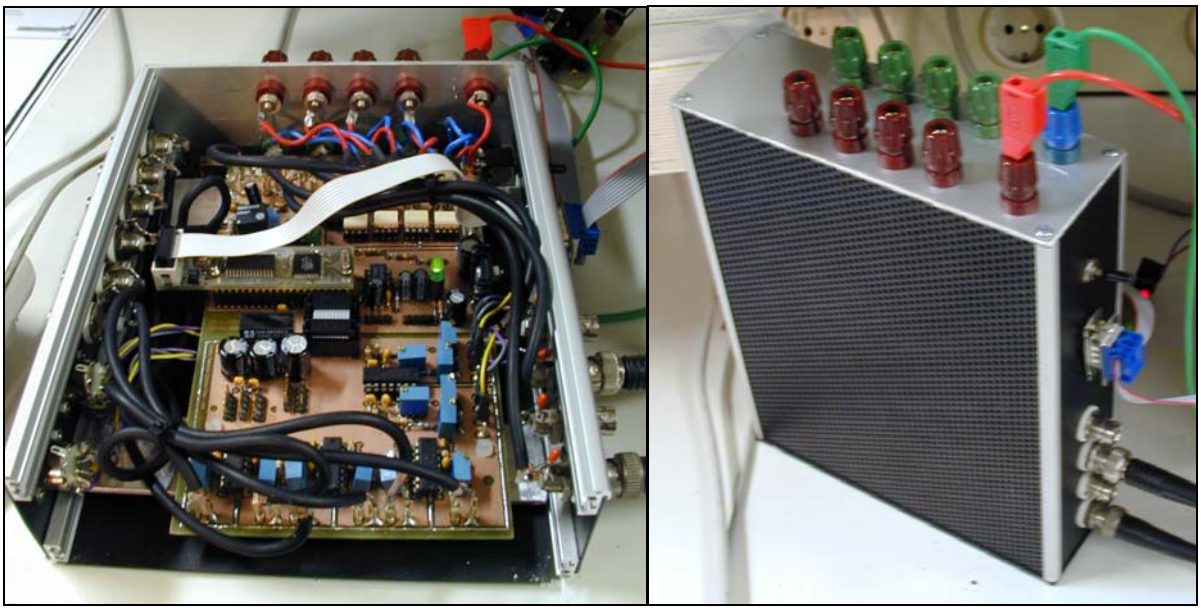


Abbildung 5.10: „SPIDAC“ Prototyp

5.2 Programmierung und Kommunikation

Alle Module der Messelektronik außer dem *„SixPack“*-Modul enthalten einen Mikrocontroller. Damit der Controller auch die gewünschten Aufgaben erfüllt, muss er mit einer Firmware programmiert werden. Unter Firmware versteht man eine in Assembler geschriebene Software, die in einem Gerät mit einer dedizierten Aufgabe eingesetzt wird. Die Aufgaben der Module ähneln sich und unterscheiden sich durch leichte Abweichungen von Modul zu Modul, wie man aus der folgenden Tabelle entnehmen kann.

<table>
<tr><td colspan="3">Gemeinsame Firmware Funktionen:
• Initialisierung des Messsystems
• Initialisierung der CAN-Bus Kommunikation
• Die an den analogen Eingängen anliegenden Größen erfassen und zwischenspeichern.
• CAN-Nachrichten empfangen, um Datenerfassungsparameter zu ändern.
• CAN-Nachrichten senden, um die erfassten Daten an das Speichergerät zu übertragen.
• Die erfassten Werte auf Grenzwertüberschreitungen prüfen und ggf. Warnungen zu versenden.</td></tr>
<tr><td>Scanner:
keine Extras</td><td>Data Acquisition:
• „SixPack“-Daten über den SPI-Bus abfragen.
DC/DC-Wandler Ansteuerung
o Softstart
o Dynamische Schaltfrequenz
o Strom oder Spannungsregelung
• Nichtflüchtige Konfigurationsdatenspeicherung
• UART-Kommunikation
• Drehzahlerfassung</td><td>SPIDAC:
• D/A-Wandler Ansteuerung
• MOSFET Ansteuerung</td></tr>
</table>

Tabelle 5.1: Firmware Funktionen

Auf dem AT908535 sind keine Betriebssystemkomponenten implementiert. Demnach existiert auch kein Scheduler, mit dem die Aufteilung der Prozessorzeit koordiniert werden kann. Die Funktionen werden unkompliziert erst nach Prioritätsebene und ansonsten sequentiell ausgeführt. Die Initialisierungsroutinen werden natürlich nur nach einem „RESET-Signal“ des Gerätes einmalig durchgeführt. Es werden drei Prioritätsebenen definiert und die Funktionen sind wie folgt gegliedert:

- **Höchste Priorität.** Die „Timer2“ Zeitgebereinheit löst einen periodischen Interruptzyklus aus der alle anderen Funktionen unterbrechen kann. Dieser Zähler definiert die Abtastrate der Datenerfassung und führt der Reihe nach die folgenden Funktionen aus:
  - Abtasten und Zwischenspeichern der analogen Eingangswerte
  - Die erfassten Werte auf Grenzwertüberschreitungen prüfen**.** DC/DC-Wandler Regelung (nur *„Data Acquisition“*)
- **Hohe Priorität.** Die „Timer0“ Zeitgebereinheit löst einen periodischen Interruptzyklus aus, der das Hauptprogramm unterbrechen kann. Dieser Zähler definiert die Senderate an das Speichergerät
  - CAN-Nachrichten senden. UART-Nachrichten senden (nur *„Data Acquisition“*)
  - Drehzahl einlesen und senden (nur „Data Acquisition“)
- **Normale Priorität.** Das Hauptprogramm wird immer ausgeführt, wenn keine der höheren Prioritätsebenen es unterbrochen hat.
  - Falls vorhanden, CAN-Nachrichten empfangen und bearbeiten**.** Nichtflüchtige Konfigurationsdatenspeicherung (nur *„Data Acquisition“*)
  - D/A-Wandler Ansteuerung (nur *„SPIDAC“*)
  - MOSFET Ansteuerung (nur *„SPIDAC“*)
  - Wiederholungsschleife

Die Aufteilung nach Prioritätsebenen ist notwendig um deterministische Zeiten für die Abtastung, das Senden und die Regelung der Pulsweitenmodulation definieren zu können. Die Interruptzyklen werden durch im Controller integrierte Funktionen ausgelöst und koordiniert. Zu beachten ist, dass es dem Programmierer selbst überlassen bleibt, den aktuellen Programmstatus zu sichern, falls eine Unterbrechung auftritt. Die eben beschriebene Programmstruktur hat sich während dieser Arbeit als sehr robust erwiesen.

Die verwendete Kommunikationselektronik für den CAN-Bus übernimmt das Senden und Empfangen der Nachrichten und die Bus-Verwaltung. Der Programmierer muss lediglich die Nachrichten in den jeweiligen Sendepuffer laden bzw. aus dem Empfangspuffer lesen. Die CAN-Spezifikation-2.0 sieht zwei Nachrichtenformate vor: das „Simple Frame Format“ (SFF) und das „Extendet Frame Format“ (EFF) die sich nur durch die Länge der Nachrichtenadressierung unterscheiden. Da für die folgenden Anwendungen ein Adressbereich von 11 Bit völlig ausreichen ist, wird das SFF verwendet. Jede Nachricht kann bis zu 8 Byte Nutzdaten enthalten. Die Nachrichtenadresse wird wie folgt gegliedert:

- Das 11. Bit unterscheidet die Priorität der Nachricht. Die Nachrichten der Datenerfassung und der Verwaltung werden als normal priorisiert implementiert. Die Warnnachrichten durch eine Grenzwertüberschreitung oder Notabschaltung werden als höher priorisiert behandelt.
- Die Bits 10,9,8,7 dienen als Modul-Adresse. Mit diesen Bits ist es möglich zu identifizieren, welches Modul eine Nachricht gesendet hat.
- Das 6. und 5. Bit kategorisieren die Nachrichten in Funktionsgruppen. Die Nachrichten an das Speichergerät z.B. gehören einer Funktionsgruppe an.
- Die niederwertigsten 4 Bit identifizieren den Inhalt der Nachricht.

Die Programmierung der Module sieht unterschiedliche Sendeparameter vor. Durch Konfigurationsnachrichten ist es möglich festzulegen ob ein Modul seine gespeicherten Daten nur auf Anfrage oder auch welche periodisch versendet. Wenn das periodische Senden aktiviert ist kann festgelegt werden, in welchen Zeitabständen die Nachrichten an das Speichergerät versendet werden sollen. Weiterhin ist mit einer Konfigurationsnachricht möglich die Abtastrate des Moduls zu variieren. Empfängt ein Modul eine Nachricht vom Bus, wird sie durch den SJA1000 gefiltert und nur an den Controller weitergeleitet, wenn die Nachricht auch für das Modul bestimmt ist. Liest der Controller eine Nachricht aus dem Empfangspuffer des SJA1000, wird sie nach den 4 niederwertigsten Bit gefiltert und der Inhalt der entsprechenden Unterfunktion übergeben. Einer Übersicht und die detaillierte Struktur der verwendeten CAN-Nachrichten ist im Anhang C dokumentiert.

5.3 Labview

Als Speicher- und Konfigurationsgerät dient ein PC mit einer CAN-Bus-Schnittstellenkarte. Für die Erstellung der Benutzerschnittstelle und des Speicherprogramms wurde die grafische Programmierungsumgebung Labview 6.0 von National Instruments verwendet. In den folgenden Abbildungen sind die programmierten virtuellen Instrumente für die Messungen im Labor und im Fahrzeug zu erkennen. Das Programm sendet automatisch alle nötigen Parameter an die Module, speichert und stellt gleichzeitig die empfangenen Daten in Diagrammen dar. Der bedeutende Vorteil von Labview ist die Flexibilität und die kurzen Entwicklungszeiten durch die grafischen Programmierung. Änderungen und Verbesserungen benötigen nur geringen Aufwand um implementiert zu werden.

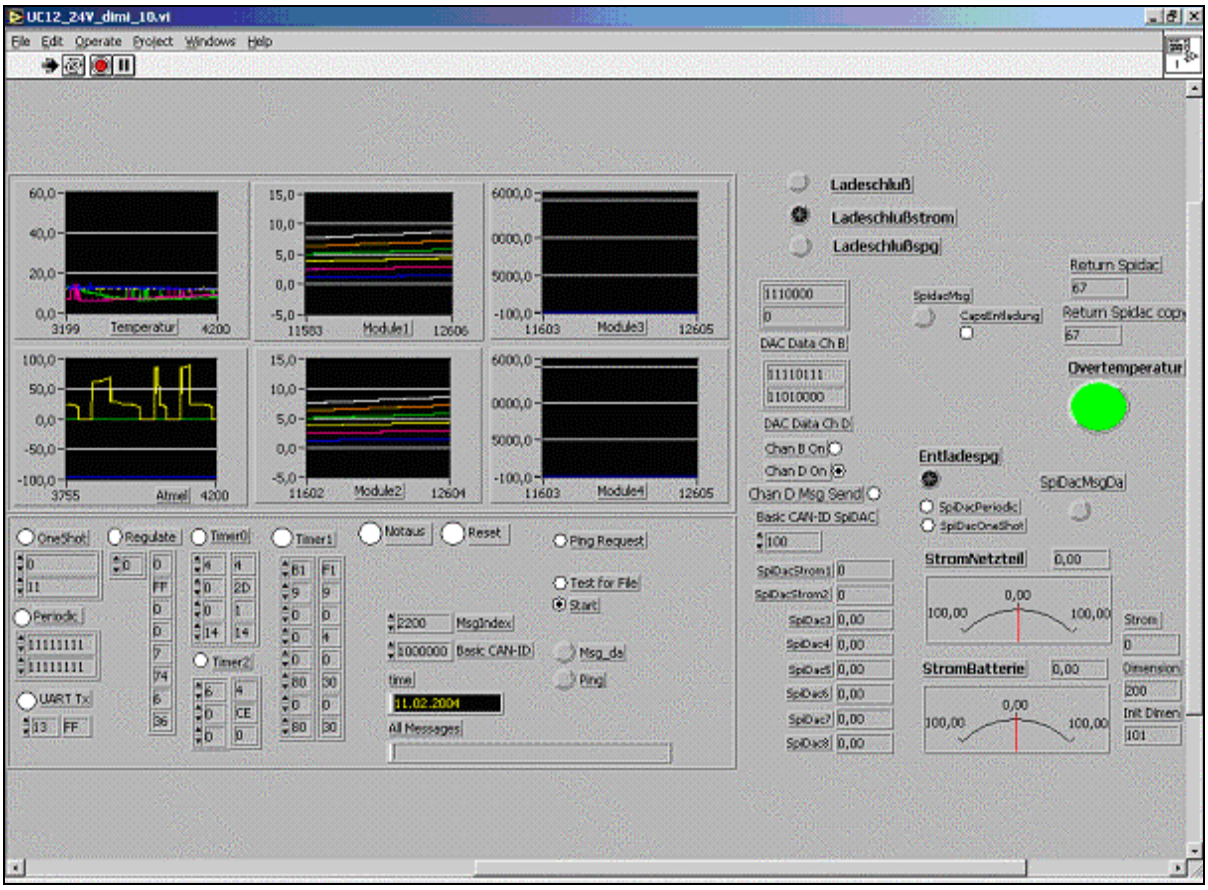


Abbildung 5.11: Messstand Labview virtual Instrument Screenshot

Abbildung 5.12 MiniEl Labview virtual Instrument Screenshot

Die Kombination der selbst entwickelten elektronischen Modulen, des CAN-Busses und der Labview Programme ermöglichen die komplette Automatisierung der Messverfahren. Die Messungen können auf Knopfdruck gestartet werden und beenden sich automatisch. Anschließend wird die Wiederauflaufladung der verwendeten Batterien initiiert.

5.4 Aufbau Messstand

Im Bild 5.1 war die klassische Topologie eines elektrischen Antriebs dargestellt. Die Schnittstelle der Energiespeicher und der Leistungselektronik des Motors ist der Spannungszwischenkreis. Der Motor hat keine direkte Verbindung zu den Energiespeichern. Das Verhalten des Stromstellers unterscheidet sich stark je nach verwendeter Technologie. Es kann von sehr einfach z.B. Tiefsetzsteller mit Gleichstrommotor bis zu sehr kompliziert z.B. mehrere Synchronmotoren mit Drehfeldorientierten-Regelung sein. Etwas vereinfacht läßt sich sagen, dass der Stromsteller dem Zwischenkreis entweder Strom entnimmt oder in den Zwischenkreis Strom einspeist (regeneratives Bremsen), solange sich die Zwischenkreisspannung in einem bestimmten Spannungsbereich befindet.

Um einem Versuchsaufbau Strom zu entnehmen, kann eine Stromsenke verwendet werden und um Strom einzuspeisen, kann eine Stromquelle verwendet werden. Um das Verhalten eines Stromstellers nachzubilden, müssen die Laborgeräte elektronisch durch ein weiteres Gerät angesteuert werden, welches eine Last- bzw. Ladekurve vorgibt. Für diesen Zweck sind Laborgeräte üblicherweise mit einem analogen oder digitalen Eingang ausgestattet. Die Quelle (Delta Elektronika 30-100D) und die Senke (Höckler&Hackl 1604), die für die Labormessungen zur Verfügung standen, waren mit einem analogen Eingang versehen. Für diesen Zweck wurde das im letzten Kapitel beschriebene „*SPIDAC*“-Modul entworfen. Das „*SPIDAC*“-Modul empfängt eine Belastungskurve von einer LabView Instanz und steuert über seine D/A-Wandler-Ausgänge die Laborgeräte an. Um diese Funktionalität zu verifizieren, wird ständig der Strom gemessen, der in und aus dem nachgebildetem Antrieb fließt. Zusätzlich, wird von „*SPIDAC*“ noch die Zwischenkreisspannung erfasst. Das Verhalten des emulierten Antriebs zum Zwischenkreis hängt einzig und allein von der vorgegebenen Belastungskurve ab.

Abbildung 5.13: Foto der Stromquelle und Stromsenke

Für die Messungen im Labor waren insgesamt drei unterschiedliche Versuchsanordnungen notwendig. Damit das Verbesserungspotential der Doppelschichtkondensatoren zu Vorschein kommt, sind ver-

gleichende Messungen notwendig. Aus diesem Grund ist es essentiell, die Batterien erst mal ohne Doppelschichtkondensatoren zu vermessen, so dass eine Vergleichsbasis entsteht. Für den ersten Versuch wurde nur eine 12 Volt Batterie verwendet. Die Batterie wird wie im klassischen Fall (Bild5.1) nur mit dem nachgebildeten Antrieb verbunden. Diese Anordnung ist im Bild 6.14 in der Form eines Blockschaltbilds zu erkennen. Die Zwischenkreisspannung ist in diesem Fall identisch zur Batteriespannung und der Batteriestrom ist identisch zum Antriebsstrom. Das bedeutet, dass der gemessene Batteriestrom relativ genau der vorgegebenen Belastungskurve entsprechen muss. Werden mehr als eine Batterie verwendet, dann sind die einzelnen Batteriespannungen zusätzlich zu erfassen. In dieser Versuchsanordnung ist „*SPIDAC*“ das einzige Messmodul das benötigt wird.

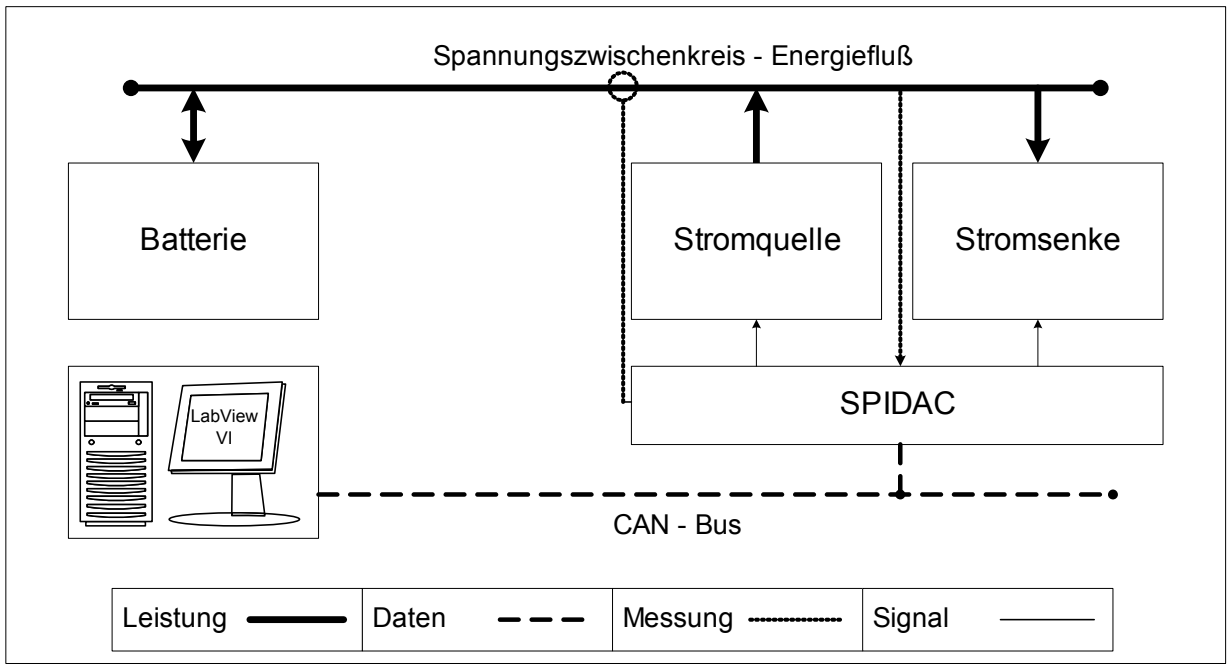


Abbildung 5.14: Messstand Blockschaltbild mit Batterie

Aufbauend auf der ersten Versuchsanordnung, um den Einfluss der „Peak Power Assistance“-Methode zu untersuchen, werden sechs in Reihe geschaltete Doppelschichtkondensatoren, parallel zur Batterie, an den Zwischenkreis angeschlossen. Diese Anordnung ist im Bild 6.15 in der Form eines Blockschaltbilds zu erkennen. Die Spannungen und Temperaturen der Doppelschichtkondensatoren werden mit „*Scanner*“-Modul protokolliert. Der Strom der zwischen dem Spannungszwischenkreis und den Doppelschichtkondensatoren fließt wird von „*Scanner*“ ebenfalls erfasst. Die algebraische Summe des Antriebstromes und des Doppelschicht-Stromes ergeben den Batteriestrom. Die Spannung der Batterie, der Doppelschichtkondensatoren und des Antriebs sind durch die parallele Anordnung identisch. Für diese Versuchsanordnung sind die Module „*SPIDAC*“ und „*Scanner*“ erforderlich.

Die zweite Anordnung ist für einen 14 Volt Spannungszwischenkreis gedacht. Wird die Spannungsebene auf 28 Volt erhöht, werden 2 Batterien und 12 Doppelschichtkondensatoren benötigt. Die höhere Spannungsebene erfordert daher eine weitere Versuchsanordnung. Um die Daten der 12 Doppelschichtkondensatoren zu erfassen könnten zwei „*Scanner*“-Module verwendet werden. Aber es hat Vorteile zwei „*SixPack*“-Module und ein „*Data Acquisition*“-Modul zu benutzen. Die „*SixPack*“-Module erfassen die Doppelschicht-Spannungen und -Temperaturen und das „*Data Acquisition*“-Modul misst den Doppelschicht-Strom. Für diese Versuchsanordnung sind die Module „*SPIDAC*“, 2x „*SixPack*“ und „*Data Acquisition*“ erforderlich und sie ist in der Abbildung 5.16 wiederzuerkennen. Würde die Stromsenke eine höhere Spannungsbelastbarkeit aufweisen, währe es einfach mit einer zusätzlichen Batterie, 6 weiteren

Doppelschichtkondensatoren und einem „*SixPack*“ auch Versuche mit 42 Volt Zwischenkreisspannung durchzuführen.

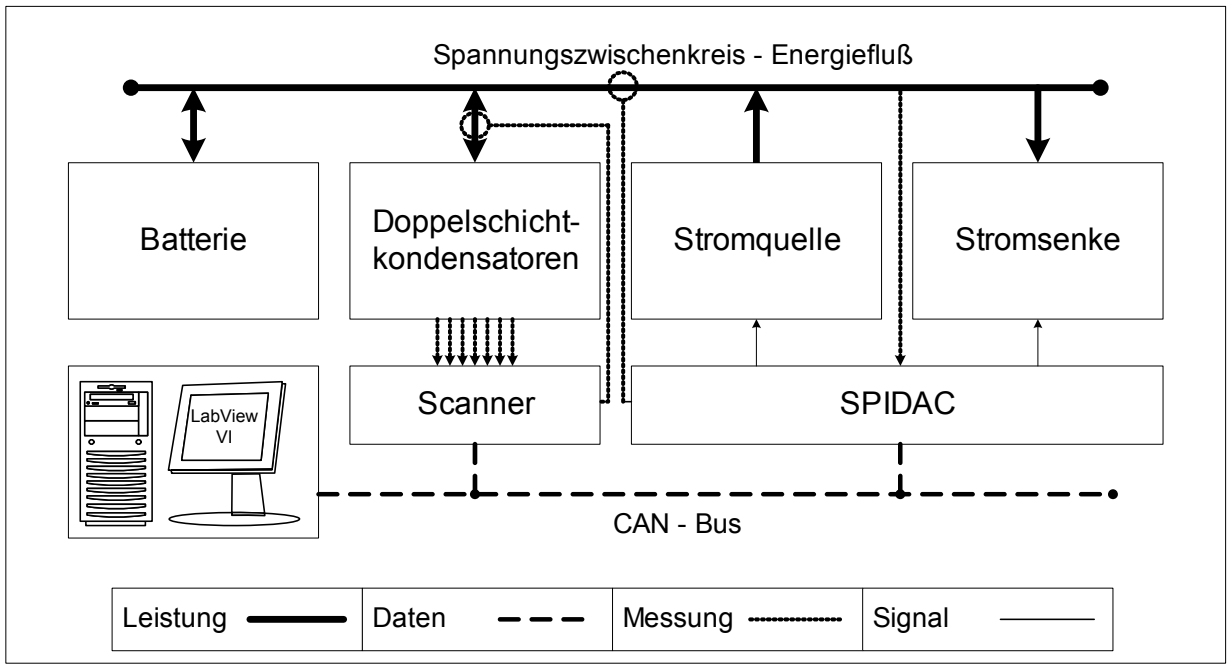


Abbildung 5.15: Messstand Blockschaltbild mit „Scanner“

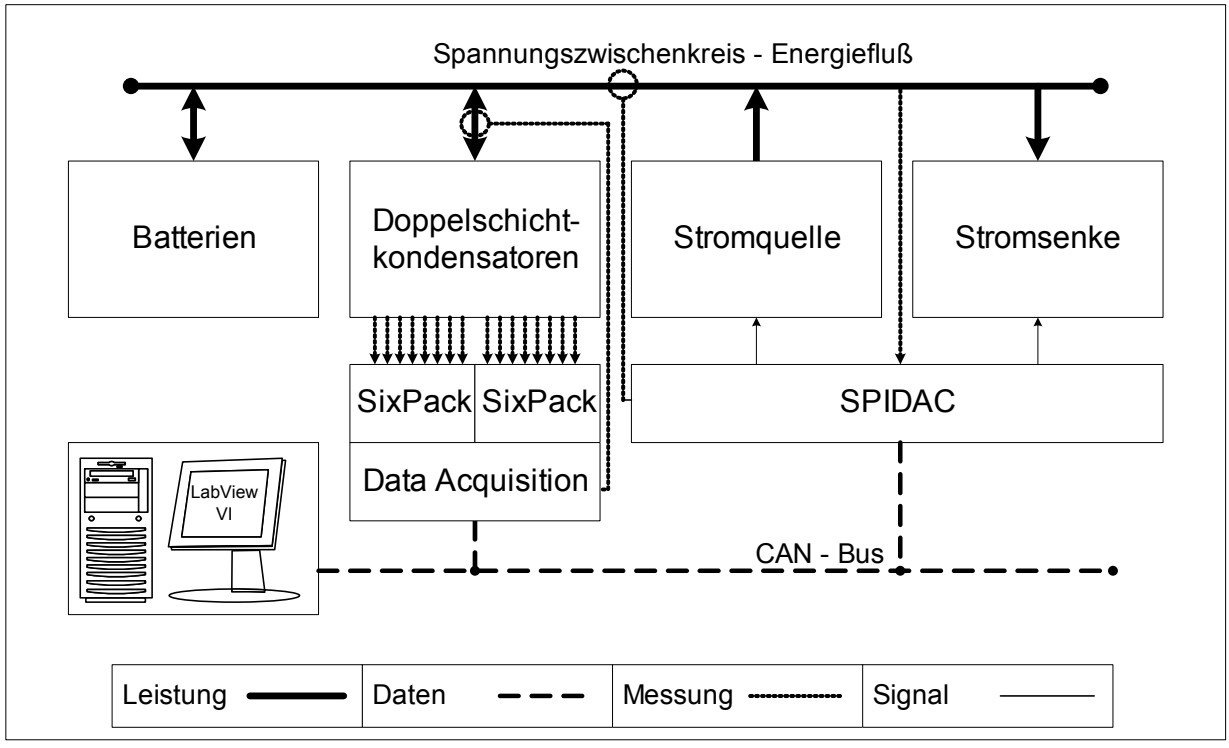


Abbildung 5.16: Messstand Blockschaltbild mit „SixPacks“

5.5 MiniEl Aufbau

Viel aussagekräftiger als emulierte Messungen im Labor sind natürlich Messungen in einem Fahrzeug mit einem elektrischen Antrieb. Der emulierte Antrieb hatte den Vorteil einer genau definierten Lastkurve zu folgen. Der Fahrer des Elektrofahrzeugs hingegen kann nur annährend eine reproduzierbare periodische Belastung vorgeben. Um die Messungen dennoch vergleichen zu können, wird zusätzlich zu den anderen Daten die Drehzahl bzw. die Geschwindigkeit des Fahrzeugs aufgezeichnet.

Für die Messungen dient ein älteres Elektroleichtfahrzeug des Typs MiniEl des Herstellers El-Trans. Um die maximale Leistung des Antriebs zu erhöhen, wurde das Fahrzeug für die Messungen stark modifiziert. Anstelle des Originalmotors wurde ein 6,4 kW permanenterregter Lynch Gleichstrommotor eingebaut. Als Gleichstromsteller diente für die ersten Versuchsreihen ein CUTIS 1204 [31], der zu der Originalausstattung des Fahrzeugs gehört. Nach den ersten Erfahrungen wurde der CURTIS Stromsteller durch einen 4QD-300 [25] ersetzt, da dieser Stromsteller auch das regenerative Bremsen beherrscht. Das Blockschaltbild mit dem CURTIS Stromsteller ist in Abbildung 6.17 dargestellt und das Blockschaltbild mit dem 4QD-Stromsteller ist in Abbildung 5.18 zu finden

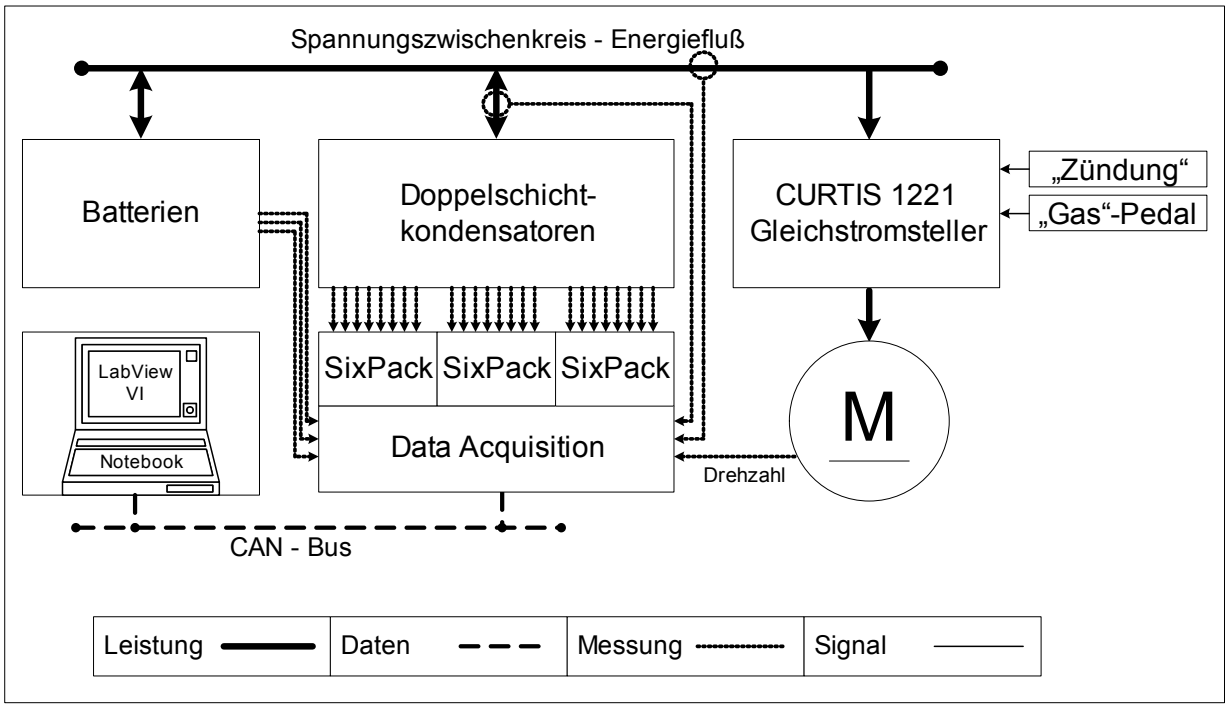


Abbildung 5.17: MiniEl Blockschaltbild mit CURTIS Gleichstromsteller

Bei dem Messaufbau im Fahrzeug handelt es sich um ein Antriebssystem mit einer nominellen Zwischenkreisspannung von 42 Volt. Das bedeutet, dass drei 12 Volt Batterien und 18 Doppelschichtkondensatoren als Energiespeicher nötig sind. Wie bei den Messungen im Labor, so soll auch bei dieser Anordnung der Einfluss der „Peak Power Assistance“ Methode betrachtet werden. Die in Reihe geschalteten Doppelschichtkondensatoren bilden einen Energiespeicher, der parallel zur Batterie am Spannungszwischenkreis angeschlossen ist. Es ist zu erwähnen, dass die Doppelschichtkondensatoren mit einem Schalter vom Zwischenkreis trennbar sind, so dass auch Messungen ohne Doppelschichtkondensatoren nur mit Batterien gefahren werden können.

Die Spannungen und Temperaturen der Doppelschichtkondensatoren werden durch drei „*SixPack*“-Module erfasst, die ihre Daten an ein „*Data Acquisition*“-Modul weiterleiten. Außer dem Doppelschicht-

Strom erfasst das Modul zusätzlich die Einzelspannungen der Batterien, den Antriebsstrom und die Drehzahl. Das ist notwendig, da „SPIDAC“ aus dieser Anordnung fehlt. Der BatterieStrom ergibt sich aus der algebraischen Summe der gemessenen Ströme. Die Messelektronik wird über eine separate 12 Volt Batterie versorgt.

Anstelle eines normalen Desktop PCs wird ein Notebook zum Speichern der Daten verwendet. Der Computer ist kleiner, findet Platz im Fahrzeug, verfügt über seine eigenen Batterien und wird nur über den CAN-BUS an die Fahrzeugelektronik gekoppelt.

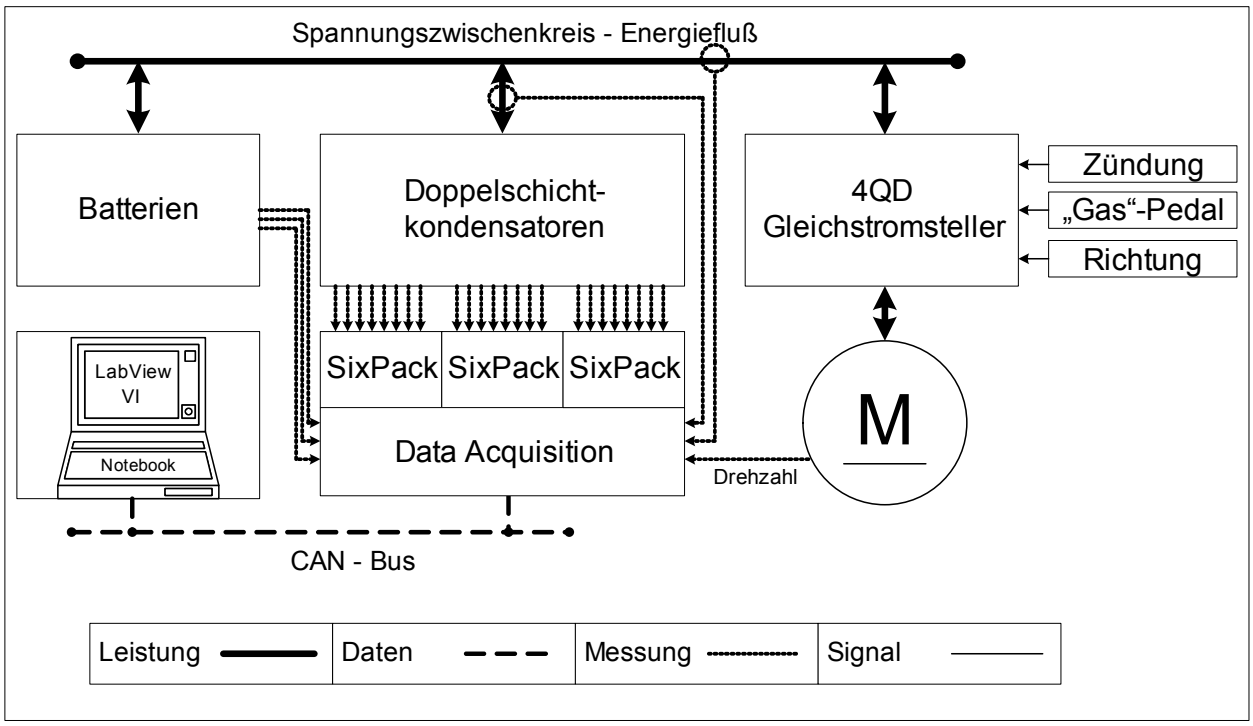


Abbildung 5.18: MiniEl Blockschaltbild mit 4QD Gleichstromsteller

In den Blockschaltbildern 6.17 und 6.18 des MiniEl Aufbaus fehlt gänzlich das 12 Volt Bordnetz. Die Zwischenkreisspannung wird von einem DC/DC-Wandler heruntergesetzt und der Bordelektronik des Fahrzeuges (Beleuchtung, Lüfter und Pumpen) zur Verfügung gestellt. Da der Energieverbrauch der Bordelektronik sehr klein gegenüber der Traktionsenergie ist, wird er bei den Messungen vernachlässigt.

Ebenfalls nicht in den Blockschaltbildern enthalten ist das Ladegerät für die Batterien. Um das Ladegerät nach einer Messfahrt zu aktivieren, ist das Stromversorgungskabel mit einem Niederspannungsdose zu Verbinden. Das Ladegerät initiiert eine Spannungsladung mit einer Strombegrenzung von 8 A. Das Ladeverfahren ist nach zirka 10 Stunden beendet, wenn der Zwischenkreis eine Spannung von 41 Volt erreicht hat und nur ein geringer Ruhestrom fließt.

Der Messaufbau des MiniEl war sehr zeitintensiv und aufwendig. Bis der Antrieb funktionierte und alle Mess-Module in das Fahrzeug integriert waren, vergingen einige Wochen. Das MiniEl ist eins der kleineren Elektrofahrzeuge, daher ist die Integration von zusätzlichen platzraubenden Modulen wie z.B. Doppelschichtkondensatoren eine Herausforderung der besonderen Art gewesen.

6 Messungen

Ziel dieser Arbeit ist es, durch die Analyse der aus den Messungen gewonnenen Daten Aussagen über das Verhalten der Doppelschichtkondensatoren in einem elektrischen Antrieb zu treffen. Aus diesem Grund ist es wichtig, das die Messergebnisse vergleichbar und reproduzierbar sind. Um solche Ergebnisse zu bekommen, sind bei allen Messungen die gleichen Konditionen zu erhalten. Unter Konditionen versteht man nicht nur den gleichen Messaufbau sondern auch den gleichen Messablauf. Zum Messablauf gehören: die Anfangsbedingung, die Endbedingung, der Belastungsverlauf, die Anzahl der wiederholten Messvorgänge und alles andere, was die Messergebnisse beeinflussen könnte. Andere Parameter, die einen nur vernachlässigbaren Einfluss auf die Messungen haben können, wie Umgebungstemperatur oder Luftfeuchtigkeit sind nur grob einzuhalten. Zum Beispiel sollte man keine Messung verwerten, die bei Umgebungstemperaturen nahe dem Gefrierpunkt gemacht wurden.

6.1 Messstand

Damit vergleichende Messungen mit dem Messstand durchgeführt werden können, ist es notwendig, eine Belastungskennlinie zu definieren. Die Belastung ist so zu wählen, dass der nachgebildete Antrieb das Verhalten eines Elektrofahrzeugs im Stadtverkehr emuliert. Es ist zu erwarten, dass die Doppelschichtkondensatoren bei variierenden Fahrzeuggeschwindigkeiten wie im Stadtverkehr einen stärkeren Einfluss auf die Energiebilanz haben als bei konstanten Geschwindigkeiten wie bei Langstreckenfahrten. Da die Zwischenkreisspannung konstant ist, muss der Strom berechnet werden, der über die Zeit bei einer typischen Stadtfahrt dem Zwischenkreis entnommen werden müsste.

Um die Emissionswerte von Pkws und Lkws zu vermessen, existieren internationale Normen, definiert von der Economic Commission for Europe (UN-Organisation). Diese Richtlinien wurden zwar erstellt um zu prüfen ob neue Fahrzeuge den Emissionsrichtlinien unterliegen, definieren, aber dadurch wie typische Belastungskennlinien von Fahrzeugen sind. Eine dieser Richtlinien ist der ECE-15 Zyklus, der seid 1971 gültiger Europa-Fahrzyklus für Pkws und Lkws bis 3.5 t Bruttogewicht ist, repräsentativ für Stadtverkehr und für Fahrzeuge mit einer maximalen Geschwindigkeit von 50 km/h. Der ECE-15 Zyklus ist als Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm in der Abbildung 6.1 dargestellt. Er ist über einen Zeitraum von 200 Sekunden definiert. Sind längere Zeiträume zu vermessen, ist der Zyklus ohne Unterberechnung zu wiederholen.

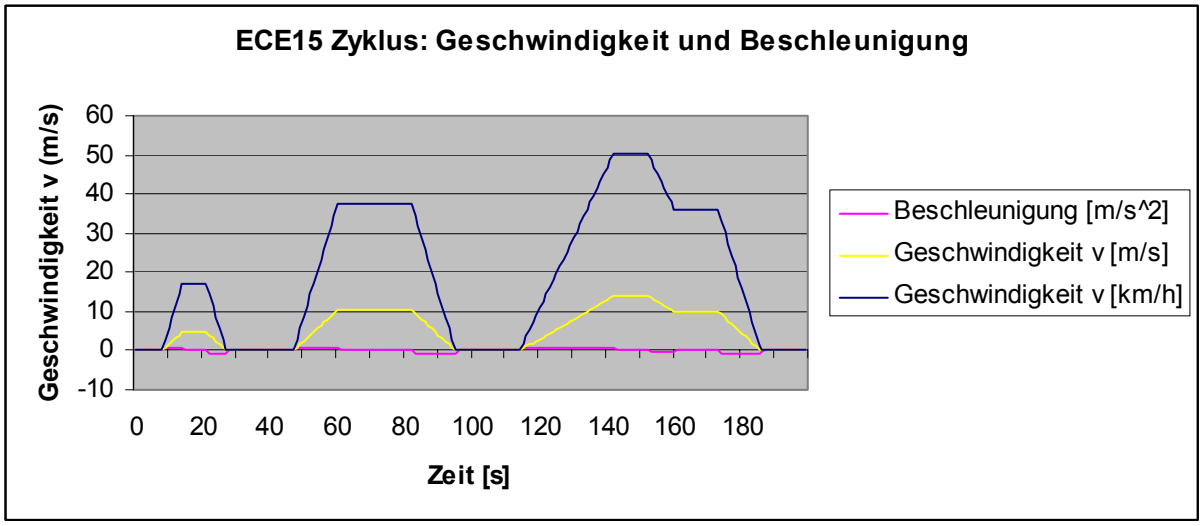


Abbildung 6.1: ECE-15 Zyklus: Geschwindigkeit und Beschleunigung

Eigenschaften des ECE-15 Zyklus sind Folgende:

- minimale Testdauer: 4.195=780 sec (min. 4 Wiederholungen)
- minimale Distanz: 4.052 km (min. 4 Wiederholungen)
- mittlere Geschwindigkeit: 19 km/h
- maximale Geschwindigkeit: 50 km/h
- Leerlauf: 35.4%
- Konstantfahrt: 29.3%
- Beschleunigung: 21.6%
- Verzögerung: 13.8%.

Um von dem durch die Norm definierten Geschwindigkeitsverlauf auf den Laststromverlauf zu kommen, sind einige Rechnungen erforderlich. Im ersten Schritt sind alle Fahrzeugwiderstände zu errechnen und zu addieren. Diese sind: der Rollwiderstand, der Luftwiderstand, der Steigungswiderstand und der Beschleunigungswiderstand. Die Widerstände sind anhand der fahrzeugspezifischen Kenndaten zu ermitteln. Da für den Fall des Messstands keine fahrzeugspezifischen Daten vorliegen, wurden Fahrzeugdaten aus einem früheren Forschungsprojekt des Instituts für Energie- und Automatisierungstechnik verwendet die einem Elektroleichtfahrzeug entsprechen. Das Projekt lief unter dem Namen: „Innovative electric traction module for zero emission downsized urban vehicle - ZED - Joule/Thermie Programme PL970117“. Die summierten Fahrzeugwiderstände stellen eine Kraft dar, die in entgegengesetzter Richtung zur Beschleunigung wirkt. Diese Kraft multipliziert mit der vorgegebenen Geschwindigkeit ergeben den Leistungsverlauf des gesamten Antriebs. Um den Leistungsverlauf der Batterie zu bekommen, sind die Wirkungsgrade des Motors und der Stromsteller-Leistungselektronik zu berücksichtigen [7]. Da die Zwischenkreis-/ Batteriespannung bekannt ist, ergibt sich der Stromverlauf, der für den Antrieb benötigt wird. Auf Formeln und Rechnungen wird an dieser Stelle verzichtet und auf das ZED-Projekt verwiesen. In der folgenden Abbildung (6.2) sind die errechneten Verläufe der Antriebsleistung, des Rad-Drehmoments, des Motor-Drehmoments und des Batteriestroms zu erkennen. Der Verlauf des benötigten Batteriestroms wird als Laststromverlauf für die Messungen dieser Arbeit verwendet.

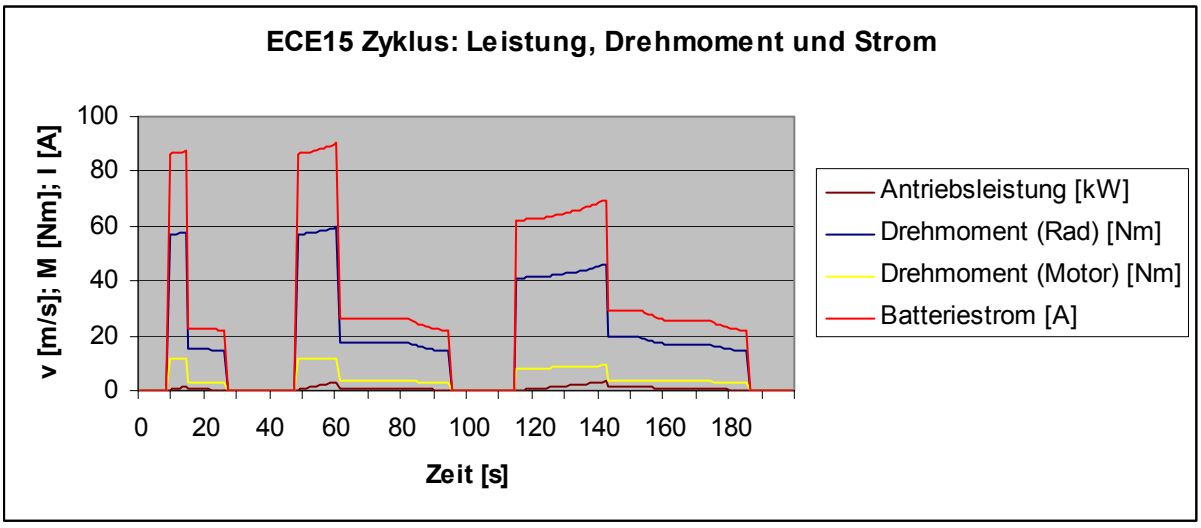


Abbildung 6.2: ECE-15 Zyklus: Leistung, Drehmoment, Strom

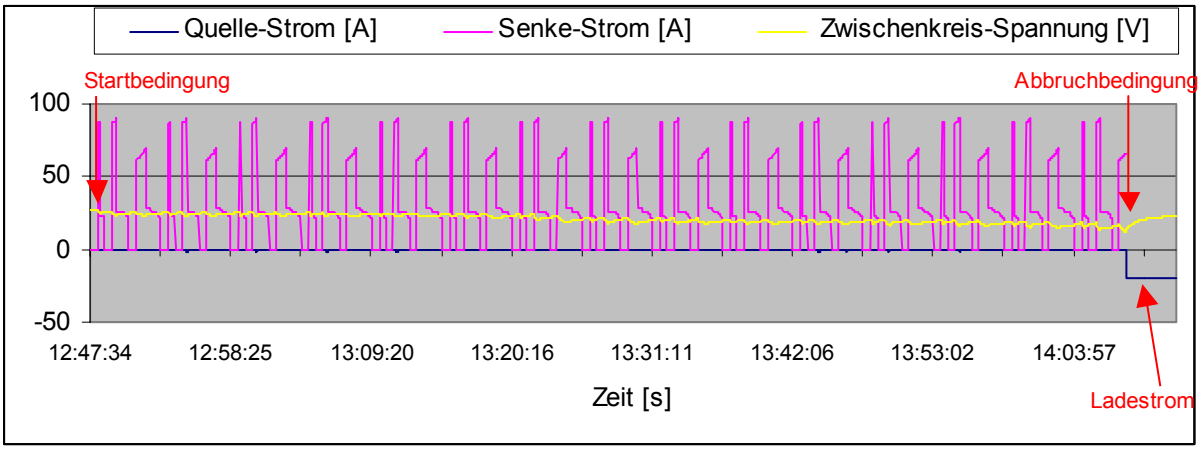
Damit mit den Messungen eine Aussage über die Reichweite eines Elektrofahrzeugs gemacht werden kann, ist es notwendig, den verwertbaren Energieinhalt der Speicher zu ermitteln. Dazu müssen die

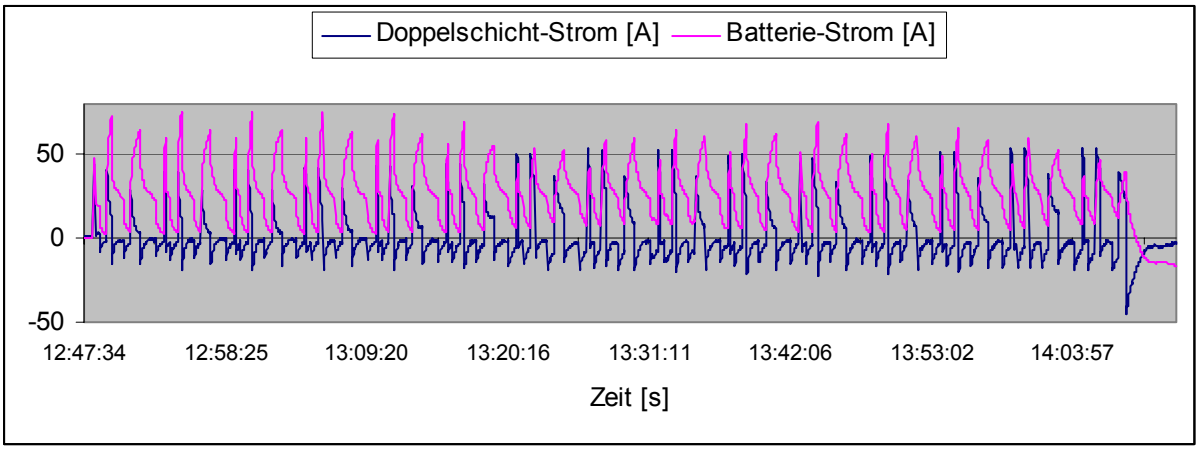
Energiespeicher von dem vollständig geladenen Zustand bis zu einem Zustand entladen werden, bei dem wegen Leistungsmangel, die Fahrzeugfunktionalität nicht mehr aufrecht gehalten werden kann. Die Anfangsbedingung einer Messung ist, dass die verfügbaren Energiespeicher bis zu dem Zustand geladen werden bei dem sie keine weitere Energie mehr aufnehmen können und demnach „voll“ sind. Der Zustand „voll“ tritt also ein, wenn die Traktionsbatterien ihre Ladeschluss Spannung erreicht haben und einen Strom kleiner als 100mA annehmen. Die Abbruchsbedingung hingegen tritt ein, wenn die Energiespeicher einen Zustand erreicht haben, in dem sie nicht mehr die erforderliche Energie abgeben. Dieser Zustand wird als „leer“ bezeichnet. Das ist der Fall, wenn die Traktionsbatterien unter Belastung die Hälfte ihrer nominellen Spannung erreicht haben. Für 12 Volt Batterien ist die Ladeschlussspannung 14 Volt und die Hälfte der nominellen Spannung 6 Volt. Für einen 24-Volt-Zwischenkreis verdoppeln sich die Spannungen und sind entsprechend 28 und 12 Volt. Um die Bedingungen präzise einzuhalten, wurden die LabView VIs so programmiert, dass die Anfangsbedingung vor dem Start der Messung überprüft wird und die Endbedingung die Datenerfassung beendet.

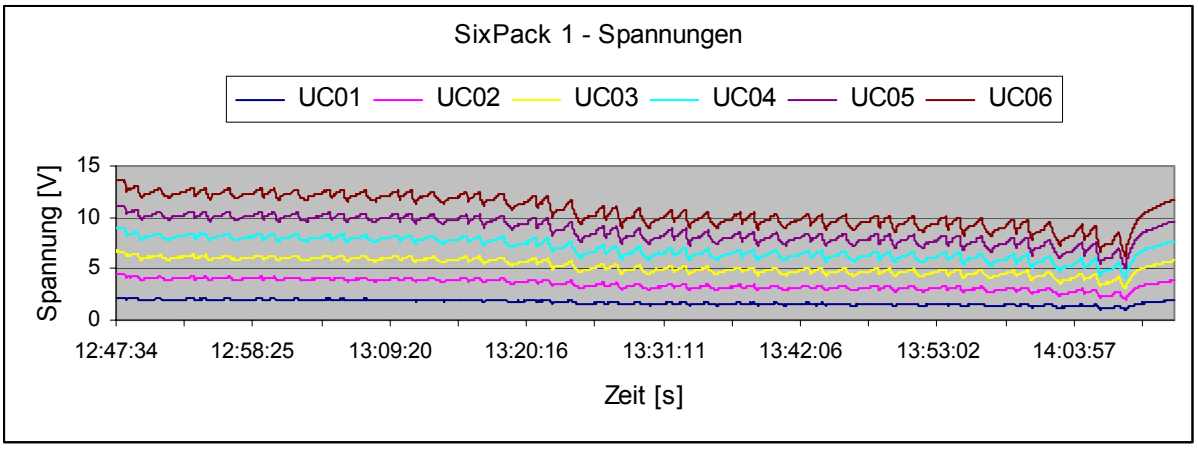
Insgesamt wurden mit dem Messtand 32 verwertbare Messungen über einem Zeitraum von 2 Monaten durchgeführt. Bevor das Messsystem und die Messtandautomatisierung vollständig funktionstüchtig waren, wurden ungefähr noch mal so viele Messungen durchgeführt. Es wurden vier verschiedene Akkumulatoren verwendet. Die Batterien mit den Bezeichnungen „2“ und „3“; zwei ältere Blei-Säure-12-Volt-90-Ah-Akkumulatoren, die für zwei Messreihen mit einem 14-Volt-Zwischenkreis gedient haben. Die Batterien mit der Bezeichnung „5“ und „6“; zwei gebrauchte 12-Volt-50Ah-Blei-Gel-“Solar“-Akkumulatoren der Firma VARTA, die für eine Messreihe mit einem 28-Volt-Zwischenkreis gebraucht wurden. Die Messungen mit den Batterien „2“, „3“ und „5&6“ wurden jeweils fünf bis sechs Mal mit und ohne Doppelschichtkondensatormodul durchgeführt. Im Nachhinein kann man behaupten, dass die fünf Wiederholungen nicht notwendig waren, da die Ergebnisse unter gleich bleibenden Parametern fast identisch ausfielen. Für die Kondensatoren-Module wurden EPCOS Doppelschichtkondensatoren des Typs B49300-H1276-S mit einer Kapazität von 2700 Farad, einer Spannungsverträglichkeit von 2,3 Volt in prismatischer Bauform verwendet.

Eine Messung wird initiiert, nachdem die Batterien geladen wurden. Die Laborgeräte werden angeschaltet, das LabView-Programm wird gestartet und übernimmt die Kontrolle über die Geräte. Nachdem die Startbedingung überprüft wurde, startet die LabView-Instanz die Datenerfassung und den Zwischenkreis mit den ECE-15 Stromverlauf zu belasten. Der ECE-15 Zyklus wiederholt sich so lange, bis die Zwischenkreisspannung die Abbruchbedingung erfüllt. Nach dem Eintreten der Abbruchbedingung wird die Zwischenkreisbelastung abgeschaltet und die erfassten Daten in einer Datei gespeichert. Kurz danach wird die Stromquelle aktiviert, um die Akkumulatoren mit einer Konstantstromladung wieder aufzuladen. Die Batterien benötigen eine Ladezeit von ungefähr 10 Stunden. Zu dem Zeitpunkt, zu dem die Startbedingung wieder erfüllt ist, wird nach einer manuellen Bestätigung eine neue Messung initiiert.

In (nächste Seite) Abbildung 6.3 ist ein Beispiel für eine Messung mit dem Messtand illustriert. Die Diagramme entsprechen einer Messung mit einem 28-Volt-Zwischenkreis mit Doppelschichtkondensatormodul. Nach 14 vollständig durchlaufenen ECE-15 Zyklen wird während des 15. Durchlaufs die Abbruchbedingung erfüllt und der Laststrom abgeschaltet. Das Doppelschichtkondensator-Modul lädt sich noch auf, bis es das gleiche Potential wie die Zwischenkreisspannung erreicht hat und überläst den Ladenstrom vollständig den Blei-Gel-Batterien. Die Summe des Batterie- und des Doppelschicht-Stomes ergeben die Belastungskurve. Im zweiten Diagramm ist deutlich zu erkennen, wie die Speicher sich die Last teilen. Die zugehörigen Temperaturverläufe haben sich wegen eines Messfehlers als ungültig herausgestellt und werden daher nicht illustriert.







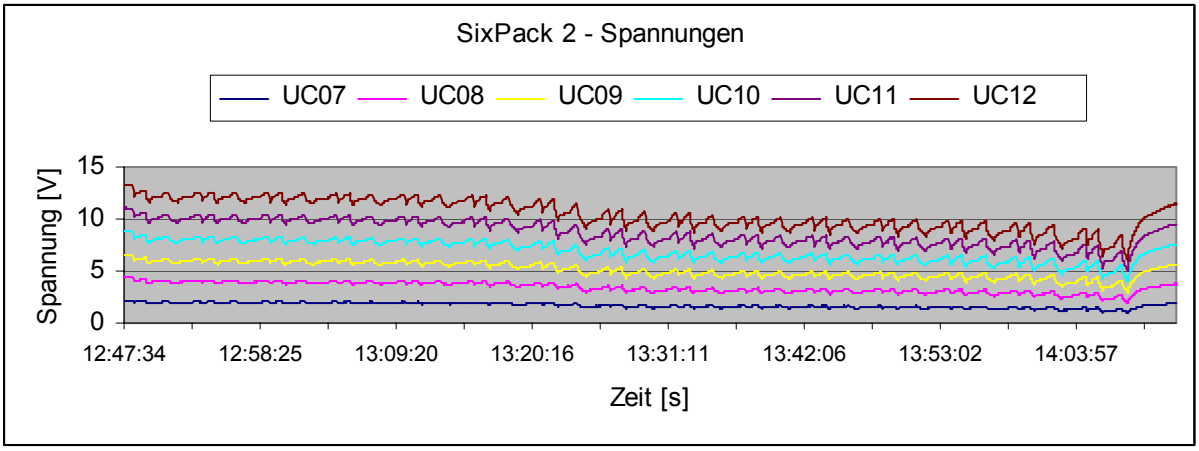


Abbildung 6.3: Messstand Beispielmessung. 28V-Zwischenkreis mit Doppelschichtkondensatoren

6.2 MiniEl

Wie auch für den Messstand so muss auch für die Messungen im MiniEl eine Belastungskurve definiert werden. Ideal wäre es, wenn man auf einer Teststrecke den ECE-15 Zyklus fahren könnte. Leider ist das nicht möglich, da keine Teststrecke zur Verfügung steht. Signifikant ist es den Unterschied zwischen einer Messung mit und einer Messung ohne Doppelschichtkondensatoren hervorzuheben, daher ist es nicht unbedingt notwendig, die Messungen gemäß einer internationale Norm durchzuführen. Es genügt, wenn die Messungen unter sich vergleichbar bleiben. Dazu kann eine beliebige Belastungskennlinie definiert werden.

Der Stellplatz des MiniEl sowie auch das Institut für Energie- und Automatisierungstechnik befinden sich auf dem Nordcampus der Technische Universität Berlin. Da es keine Möglichkeit gibt die Testfahrten auf dem Campus oder in einem abgeschlossenen Bereich zu machen, blieb als einzige Lösung die Messungen im regulären Straßenverkehr durchzuführen. Die Messungen sollten nicht zu weit von dem Stellplatz sein und die Strecke sollte so wie der ECE-15 dem typischen Stadtverkehr entsprechen. Mangels anderer Möglichkeiten wurde eine Strecke rund um den Nordcampus gewählt. Die Strecke ist in Abbildung 7.4 dargestellt und besteht aus folgenden Bezugspunkten:

Abbildung 6.4: MiniEl Messstrecke (Quelle: BVG)

A. Begin. Ausfahrt EN Gebäude (Einsteinufer 17) Nord: maximale Beschleunigung
   Strecke: 160 m mittlere Fahrzeit: 20s

B. Ausfahrt EN Gebäude (Einsteinufer 17) Süd: Fahrt mit maximal 50km/h
   Strecke: 240 m mittlere Fahrzeit: 20 s

C. Ampel Kreuzung Straße des 17. Juni und Einsteinufer: Fahrt mit maximal 50km/h
   Strecke: 290 m mittlere Fahrzeit: 60 s

D. Ampel Straße des 17. Juni zwischen Mathematik und Hauptgebäude: Fahrt maximal 50km/h
   Strecke: 280 m mittlere Fahrzeit: 50 s

E. Ampel Kreisverkehr Straße des 17. Juni und Ernst-Reuter Platz: Fahrt 20 km/h
   Strecke: 50 m mittlere Fahrzeit: 30 s

F. Ampel Kreisverkehr Ernst-Reuter Platz und March-Straße: Fahrt maximal 60 km/h
   Strecke: 490 m mittlere Fahrzeit: 70 s

G. Ampel Kreuzung March-Straße und Einsteinufer: Fahrt 60 km/h
   Strecke: 280 m mittlere Fahrzeit: 20 s

A. Ausfahrt EN Gebäude (Einsteinufer 17) Nord: Stop. Auf ein Vielfaches von 400 s Warten.

Ein Zyklus hat eine gesamt Länge von 1.790 Metern und dauert 400 Sekunden. Da fünf Lichtsignalanlagen auf der Strecke den Fluss des Verkehrs steuern und ihre Schaltphasen nicht exakt vorauszusehen sind, gilt dieser Zyklus mit einer gewissen Toleranz. Ein Zyklus dauert im Durchschnitt etwa 250 Sekunden, er kann aber bei einer ungünstigen Verkehrslage maximal 400 Sekunden dauern. Um die Unregelmäßigkeiten des Verkehrsflusses auszugleichen, wird am Ende von jedem Zyklus eine Wartezeit eingeführt bis zu einem ganzzahligem Vielfachen von 400 Sekunden, so dauert jeder Zyklus gleich lang. Die Bezugspunkte der Messungen sind in Abbildungen 6.5 und 6.6 direkt in den Geschwindigkeits- und Stromverlauf eingetragen.

Das MiniEl hat einen 42-Volt-Zwischenkreis. Für einen Teil der Messungen werden drei gebrauchte 12-Volt-50Ah-Blei-Gel-“Solar“-Akkumulatoren der Firma VARTA verwendet die in dieser Arbeit als Batterien „5“, „6“ und „7“ bezeichnet werden. Batterien „5&6“ wurden auch für die Messstands-Messungen verwendet. Für die restlichen Messungen werden drei gebrauchte 12-Volt-60Ah-Blei-Gel-Akkumulatoren der Firma OPTIMA verwendet die in dieser Arbeit als Batterien „8“, „9“ und „10“ bezeichnet werden.

Damit die Anfangsbedingung der Messung erfüllt ist, müssen die Batterien „voll“ sein. Das bedeutet, dass der Zwischenkreis die Ladeschlussspannung von 41 Volt erreicht haben muss und das Ladegerät keinen Strom mehr in die Batterien laden kann. Die Endbedingung sollte erreicht werden, wenn die Energie der Speicher nicht mehr ausreicht um die Fahrzeugfunktionalität aufrecht zu erhalten. Da es sehr aufwendig ist das Fahrzeug zu seinem Stellplatz zurückzuschieben, wenn die Endbedingung irgendwo auf der Messstrecke erreicht wird, gilt als Endbedingung das Erreichen einer Zwischenkreisspannung von 20 Volt. Versuche außerhalb der beschriebenen Messreihen haben gezeigt, dass wenn das Fahrzeug erstmalig eine Zwischenkreisspannung von 20 Volt erreicht hat, die restliche Energie zwar genügt um den aktuellen Zyklus zu beenden, aber nicht um einen weiteren zu fahren. Tritt die Endbedingung ein, wird der aktuelle Zyklus noch beendet, sodass eine Messung immer aus einer ganzzahligen Anzahl von gefahrenen Zyklen besteht.

In den Abbildungen 6.5 und 6.6 sind die definierten Bezugspunkte und der Geschwindigkeitsverlauf und der Stromverlauf aus einer Messung zusammen dargestellt. In der Abbildung 6.5 sind die einzelnen Phasen des Zyklus deutlich zu erkennen. Die Lichtsignalanlage an dem Punkt „C“ hat das Fahrzeug immer auf die folgenden Signale synchronisiert. Fährt man mit anschließendem grünem Licht von Punkt „C“ los, dann wird Punkt „D“ meistens dann erreicht, wenn die Ampel gerade von Rot auf Gelb schaltet, was ein kurzes Abbremsen und erneutes Beschleunigen erzwingt. Der Punkt „E“ und „F“ werden während der roten Ampelphasen erreicht und erfordern eine durchschnittliche Wartezeit von 15 Sekunden. Die Lichtsignalanlage bei Punkt „G“ wird meistens während der grünen Ampelphase erreicht, aber das Fahrzeug muss abgebremst aufgrund der scharfen Rechtskurve und um den Fußgängern und den Radfahrern die Vorfahrt zu gewähren. In Abbildung 6.6 sind die Beschleunigungs- und Bremsphasen durch den Stromverlauf zu erkennen. Beschleunigt das Fahrzeug, steigt der Stromverbrauch, bis der Motor 6kW an Leistung umsetzt. Wenn generatorisch gebremst wird, ändert der Strom seine Flussrichtung um die Traktionsenergie teilweise zurückzuspeisen und ist in dem Diagramm mit einem negativen Vorzeichen dargestellt.

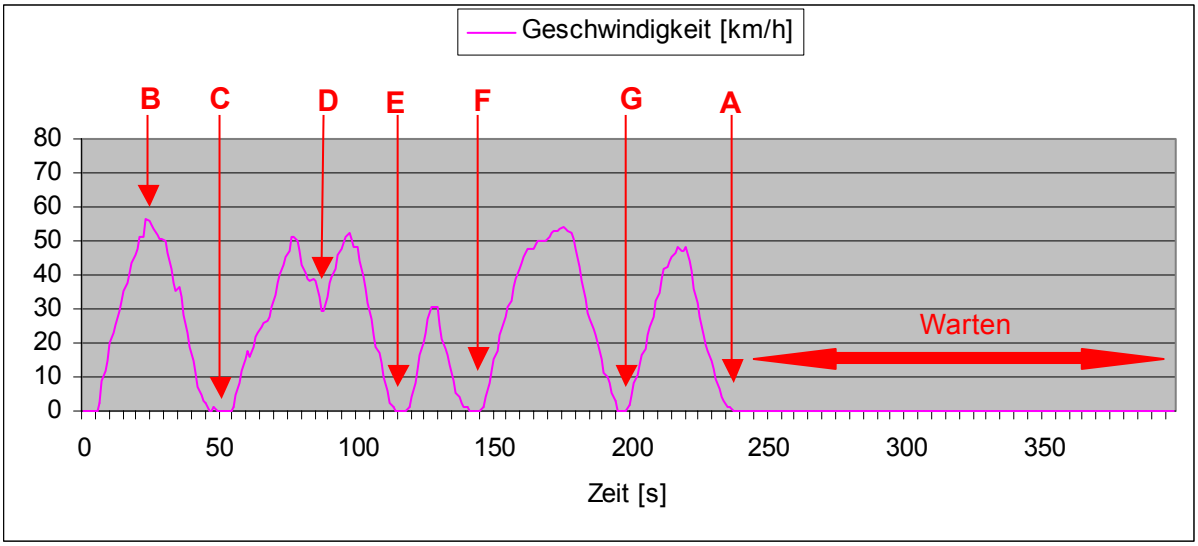


Abbildung 6.5: Geschwindigkeitsverlauf für einen Zyklus mit Bezugspunkten

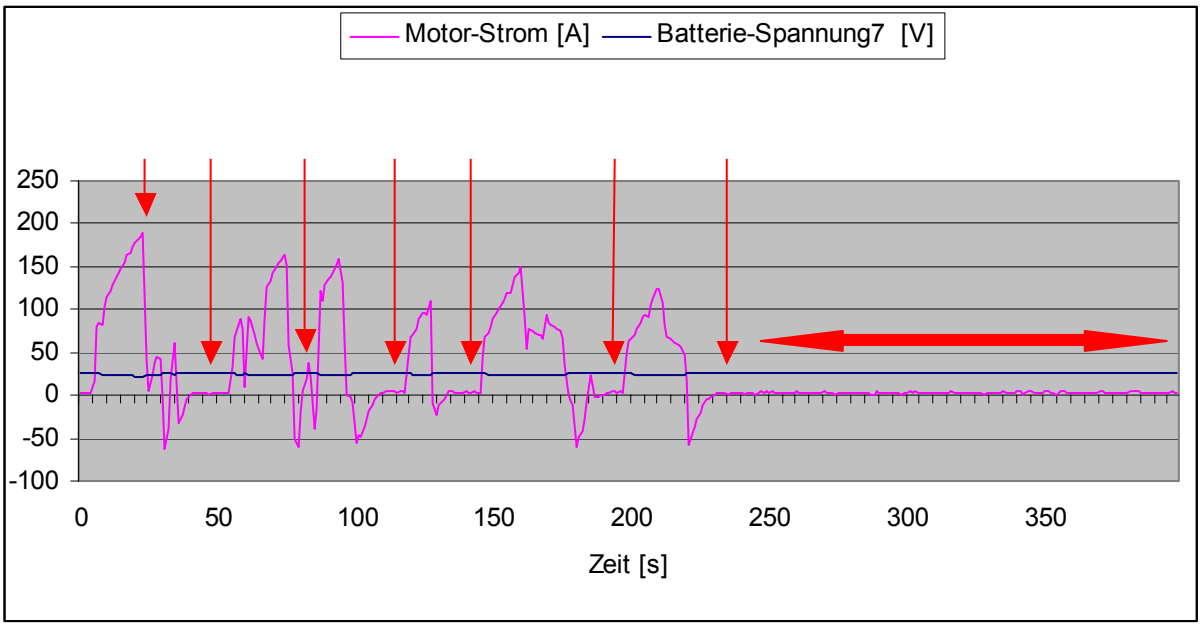


Abbildung 6.6: Batterie-Strom- und Spannungs-Verlauf für einen Zyklus mit Bezugspunkten

Damit eine durchgeführte Messung als gültig bzw. verwendbar betrachtet werden kann, dürfen während der Messung keine signifikante Abweichungen von den eben aufgezählten Richtlinien stattgefunden haben. Bundestagkonvois, Unfälle und spontane Studentendemonstrationen auf der Straße des 17. Juni waren oft die Ursache für einen Abbruch einer Messung. Ein Lagerschaden, ein gerissener Zahnriemen, ein Defekt im Messsystem, ein platter Reifen und eine defekte Beleuchtung haben auch einige Messungen unterbrochen. Es wurde stets versucht die Messungen bei einer relativ durchschnittlichen Verkehrslage durchzuführen. Insgesamt wurden 33 gültige Messungen über einen Zeitraum von 4 Monaten durchgeführt. Die Messungen teilen sich wie folgt auf:

- 4 Messungen ohne generatorisches Bremsen nur mit **Varta 50Ah Batterien.**
- 4 Messungen ohne generatorisches Bremsen aber mit **Varta 50Ah Batterien und mit EPCOS 2700F/2,3V**
- 4 Messungen mit generatorischem Bremsen nur mit **Varta 50Ah Batterien.**
- 5 Messungen mit generatorischem Bremsen, mit **Varta 50Ah Batterien und mit EPCOS 2700F/2,3V**
- 4 Messungen mit generatorischem Bremsen, mit **Varta 50Ah Batterien und mit Montena 2600F/2,5V**.
- 4 Messungen mit generatorischem Bremsen, mit **Varta 50Ah Batterien und mit Montena 1500F/2,5V**.
- 4 Messungen mit generatorischem Bremsen, mit **Varta 50Ah Batterien und mit Montena 450F/2,5V**.
- 1 Messung mit generatorischem Bremsen, mit **Varta 50Ah Batterien, mit Montena 2600F+1500F/2,5V**.
- 1 Messung mit generatorischem Bremsen und mit 60Ah **Optima Batterien**.
- 1 Messung mit generatorischem Bremsen und mit 60Ah **Optima Batterien und Montena 450F/2,5V**.
- 1 Messung mit generatorischem Bremsen und mit 60Ah **Optima Batterien und Montena 2600F/2,5V**.

Alle Messungen wurden nach dem gleichen Prinzip durchgeführt. Nach einer optischen Begutachtung der Mechanik des Fahrzeugs wurde es von seinem Stellplatz zur Anfangsposition „Punkt A“ gefahren und somit gleichzeitig das Messsystem getestet. Wenn alle mechanischen und elektronischen Systeme in Ordnung waren, die Batterien geladen waren und eine durchschnittliche Verkehrslage herrschte konnte die Messung beginnen. So weit nichts Ungewöhnliches eintrat wurde die Messung Zyklus für Zyklus um den Nordcampus der TU-Berlin abgefahren. Nach dem erstmaligen Erreichen einer Zwischenkreisspannung von 20 Volt, wurde die Messung nach der letzen Wartezeit beendet und das Datenerfassungssystem abgeschaltet. Das MiniEl wurde zurück zu seinem Stellplatz gefahren (oder geschoben) und das Ladegerät der Batterien mit Strom versorgt. Alle Messungen wurden stets mit einer angeschalteten Beleuchtung durchgeführt. Da auch im Dunkeln Messungen gefahren worden sind, war es notwendig auch bei Tageslicht die Beleuchtung anzuschalten, damit die Ergebnisse nicht durch den Mehrverbrauch des Bordnetzes beeinflusst werden können.

Auf den folgenden drei Seiten in den Abbildungen 6.7, 6.8 und 6.9 ist ein Beispiel für eine Messung mit dem MiniEl illustriert. In dem ersten Diagramm ist der Spannungsverlauf der Batterien zu erkennen. Die Spannung der Batterie „7“ ist gleichzeitig die Zwischenkreisspannung. Das folgende Diagramm illustriert die Stromverläufe der Doppelschichtkondensatoren, der Batterie und des Antriebs (Motor-Strom). Die Batteriespannungen brechen ein, sobald der Antrieb einen höheren Strom erfordert. Aus den Strömen und den Spannungen werden während der Messung die Leistungsverläufe errechnet und ebenfalls als Diagramm dargestellt. Aus den Leistungsverläufen werden im Nachhinein die Leistungsfaktoren und die Energiemengen der Speicher berechnet. Die Geschwindigkeit und die Beschleunigung des Fahrzeugs werden über die Daten des Drehzahlsensors bestimmt. Die letzten fünf Diagramme enthalten die Temperaturen der SixPacks und die Doppelschichtkondensatoren-Einzelspannungen. Das Balkendiagramm dient zur Beurteilung der Modulsymmetrie und wird mit den Einzelspannungen am Anfang der Messung anliegen. Alle Diagramme mit den Verläufen der MiniEl Messungen und weitere Auswertungen sind in Anhang A dieser Arbeit zu finden.

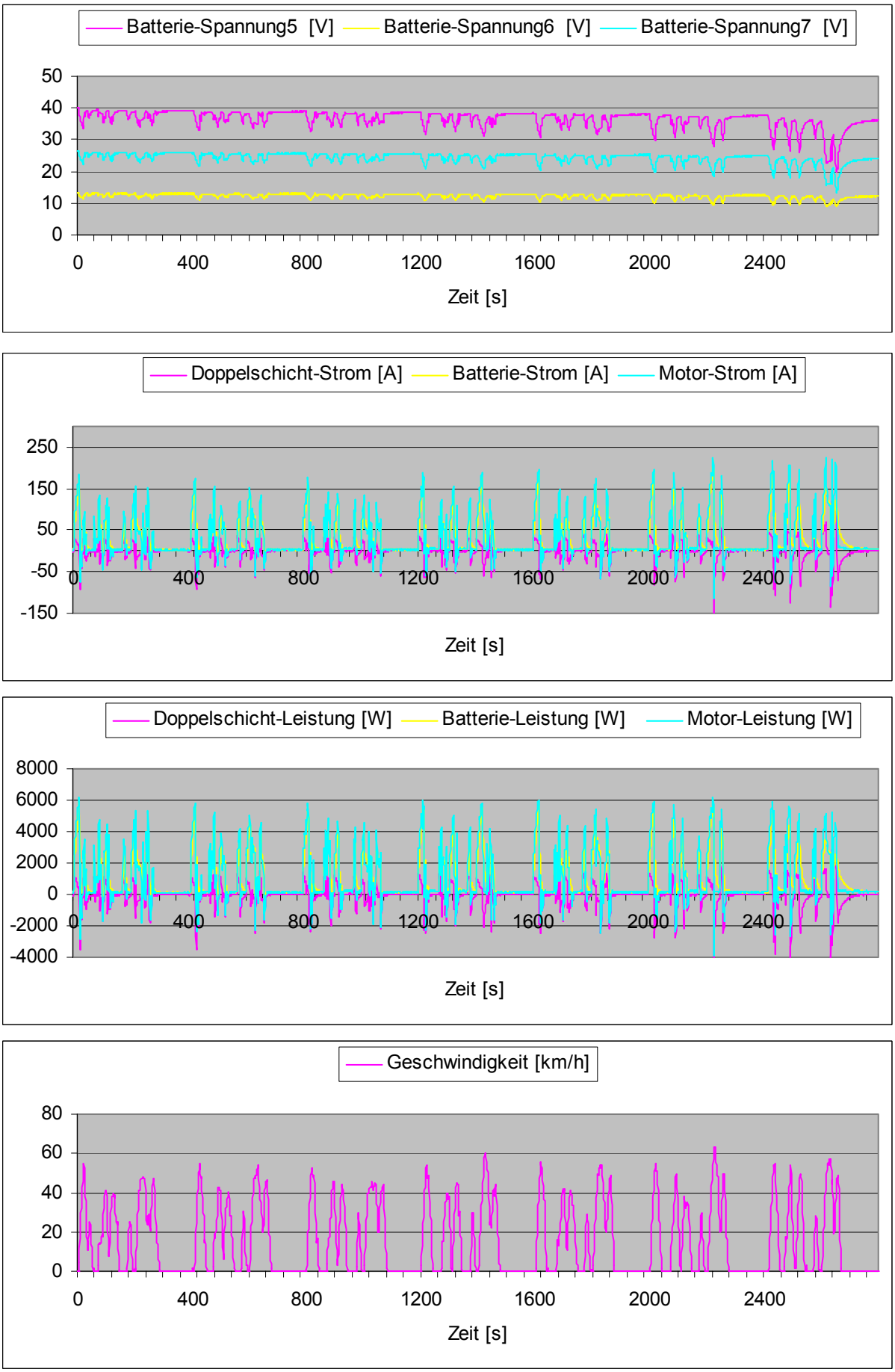


Abbildung 6.7: Spannungs-, Strom-, Leistungs-, und Geschwindigkeitsverlauf

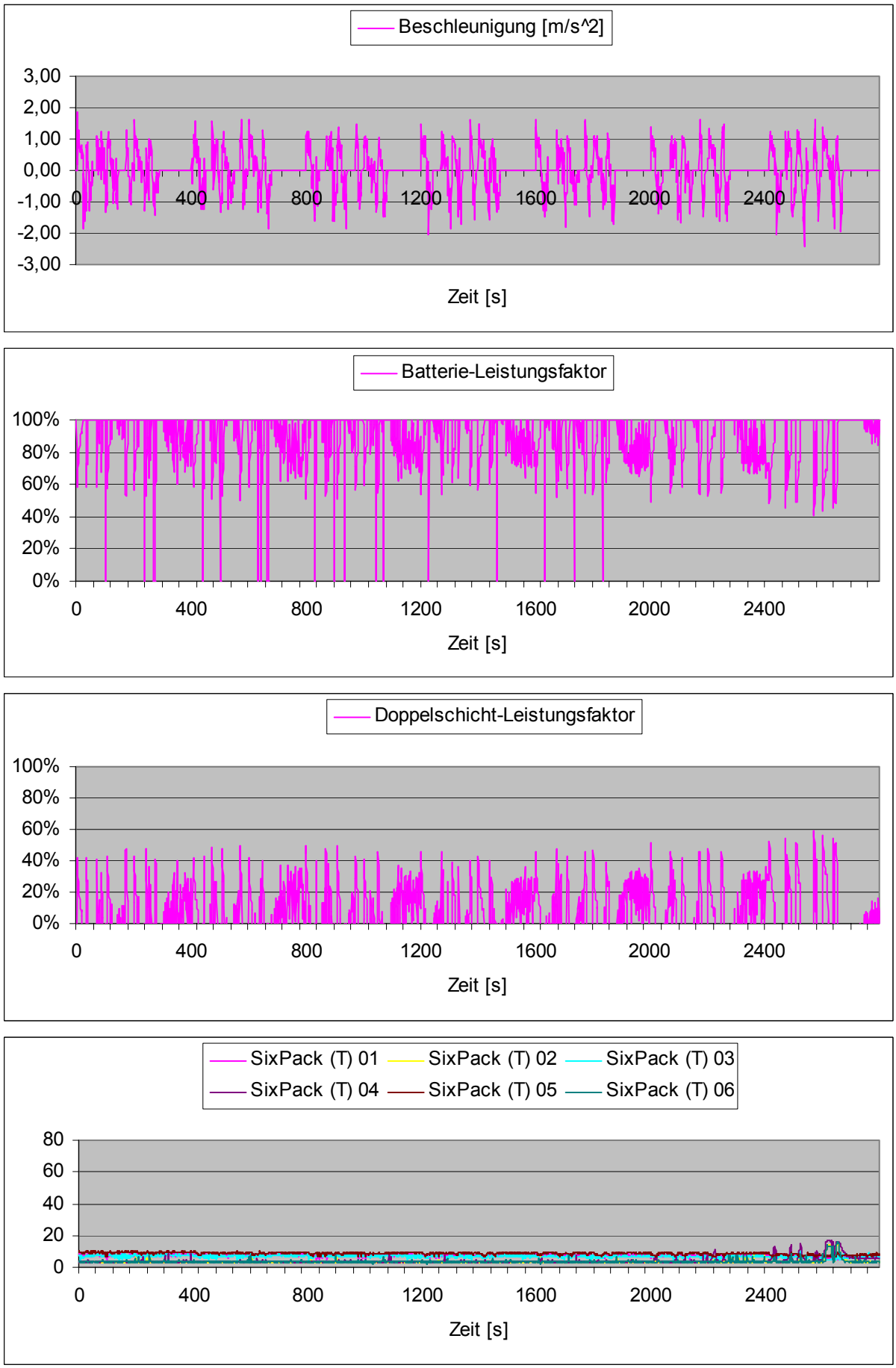


Abbildung 6.8: Beschleunigung, Leistungsfaktoren und Temperaturen der SixPacks

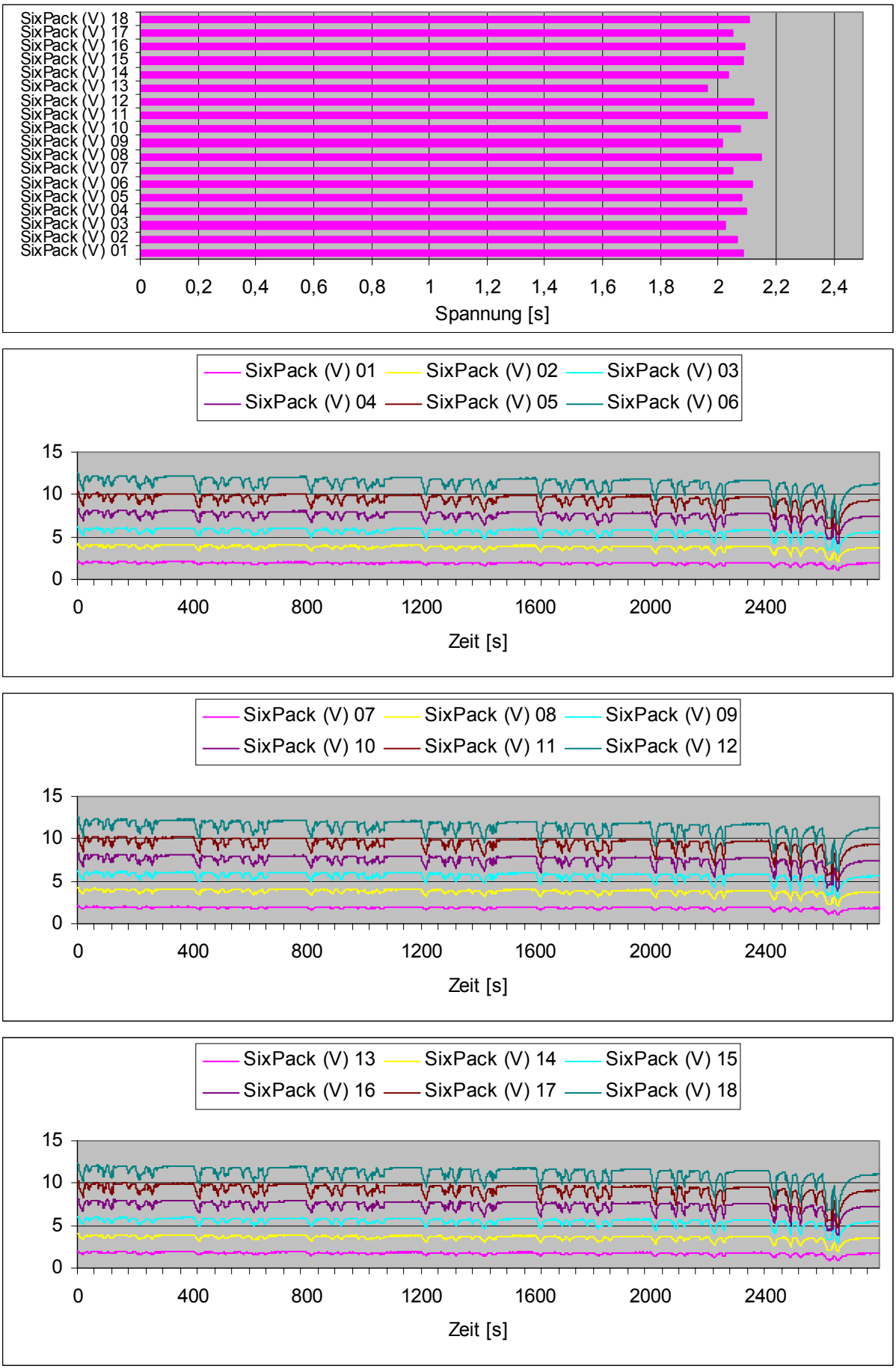


Abbildung 6.9: Symmetriediagramm und Spannungsverläufe der Doppelschichtkondensatoren

7 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Daten analysiert die durch Messungen gewonnen wurden. Die Daten einer Messung sind sequenziell in einer Textdatei gespeichert. Jede dieser Dateien enthält die zeitlichen Verläufe der erfassten Größen. Die Daten wurden mittels Microsoft Excel ausgewertet und zur übersichtlichen Darstellung in der Form von Diagrammen und Tabellen zusammengefasst. Die Messstandsdaten dienten mehr zur Orientierung für die Fahrzeugmessungen und werden nur kurz erläutert. Die Daten der Fahrzeugmessungen werden ausführlicher dargestellt.

7.1 Ergebnisse Messstand

Mit dem Messtand wurden sechs Messreihen durchgeführt. Vier Messreihen mit einem Spannungszwischenkreis von 14 Volt und zwei mit einem Spannungszwischenkreis von 28 Volt. Bei den ersten vier Messreihen wurden leistungsarme Akkumulatoren verwendet und bei den letzten Messreihen wurden Akkumulatoren mittlerer Leistungsdichte verwendet. Die Messungen mit dem Messstand hatten als primäres Ziel festzustellen, ob sich überhaupt eine Reichweitenverbesserung durch das Parallelschalten von Doppelschichtkondensatoren ergibt. Da der ECE 15 Strombelastungsverlauf periodisch angewendet wird, ist ein Vergleich der Anzahl der durchlaufenen Zyklen bereits eine quantitative Aussage über die Wirkung der Doppelschichtkondensatoren in einem Antrieb. Es werden nur ganze ECE 15 Zyklen gezählt. Das verschlechtert zwar etwas die Präzision der Ergebnisse, macht sie aber dafür deutlich übersichtlicher. Weiterhin wird auf qualitative Veränderungen in dem Spannungsverlauf, dem Stromverlauf und dem Temperaturverlauf hingewiesen. Besonders wird auf die Ladungsverteilung in den in Reihe geschalteten Doppelschichtkondensatoren geachtet.

7.1.1 14 Volt Zwischenkreisspannung

Bei der ersten Messreihe des Messstands wurde Batterie „2“ vermessen. Der ältere und leistungsschwache Blei-Säure Akkumulator allein hat lediglich zwei bis drei ECE-15 Zyklen durchlaufen können, bis die Zwischenkreisspannung den 6 Volt erreicht hatte. Batterie „2“ zusammen mit dem Doppelschichtkondensatorenmodul (zweite Messreihe) hat es fünf bis sechs Zyklen bis zum Erreichen der Abbruchbedingung ausgehalten. Die Anzahl der Zyklen hat sich demnach durch das Zuschalten der Doppelschichtkondensatoren verdoppelt. Die Messung ohne Doppelschichtkondensatoren wurde fünf Mal und die Messung mit EPCOS 2700F/2,5V Doppelschichtkondensatoren wurde sechs Mal mit dem jeweils gleichen Ergebnis wiederholt. Bildet man das Integral der ECE-15 Strombelastung über einen Zyklus und teilt man es durch 3600 Sekunden, dann ergibt sich, dass für einen ECE-15 Zyklus ungefähr 1,6 Ah zu veranschlagen sind. Obwohl Batterie „2“ eine Nennkapazität von 90 Ah hat, erreicht sie ohne Doppelschichtkondensatoren grade mal 3,2 bis 4,8 Ah und mit Doppelschichtkondensatoren ungefähr 8 bis 9,6 Ah an Kapazität. Das Diagramm in Abbildung 8.1 stellt die Ergebnisse grafisch dar.

Der Vergleich zwischen der dritten und vierten Messreihe fällt ähnlich aus. Batterie „3“ ist der gleiche Typ wie Batterie „2“ kann aber allein schon vier bis fünf Zyklen durchlaufen (8 Ah). Mit den EPCOS 2700F/2,5V Doppelschichtkondensatoren verdoppelt sich die Reichweite auf acht bis neun Zyklen. Der Antriebsspeicher hat dementsprechend insgesamt eine mittlere Kapazität von 13,6 Ah. Die Ergebnisse der dritten und vierten Messreihe sind in Abbildung 7.2 dargestellt. Aus dem Vergleich der Anzahl der Zyklen mit und ohne Doppelschichtkondensatoren, kann man bereits schließen, dass bei leistungsschwachen Akkumulatoren die „Peak Power Assistance“-Methode eine Vervielfachung der Reichweite bzw. der Gesamtkapazität des Speichers liefert.

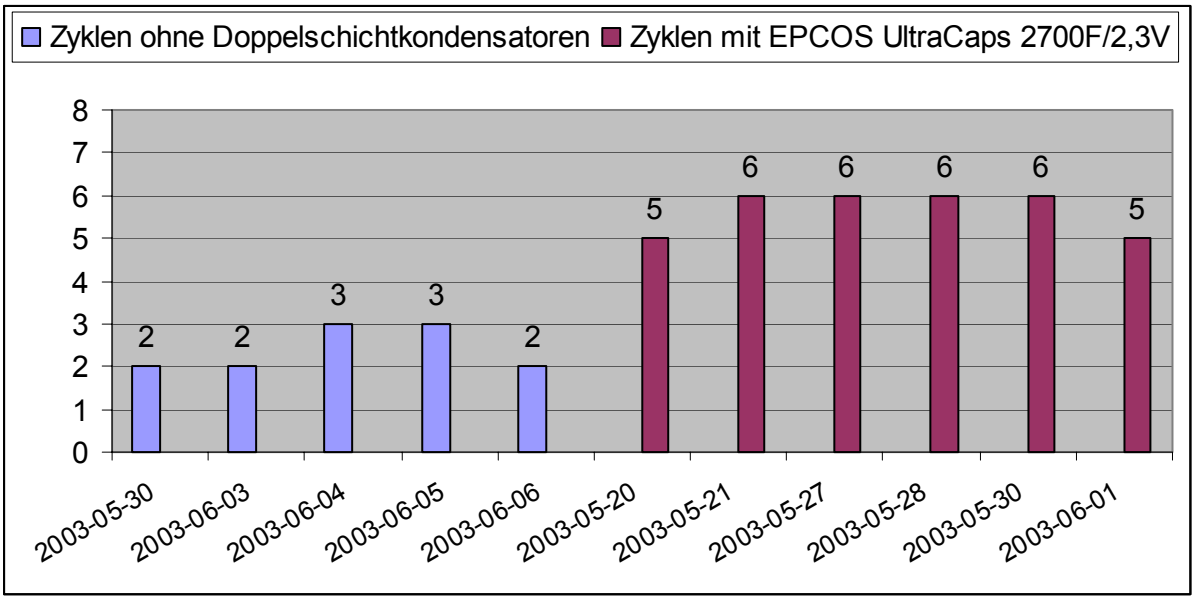


Abbildung 7.1: Anzahl der Zyklen mit „Batterie 2“

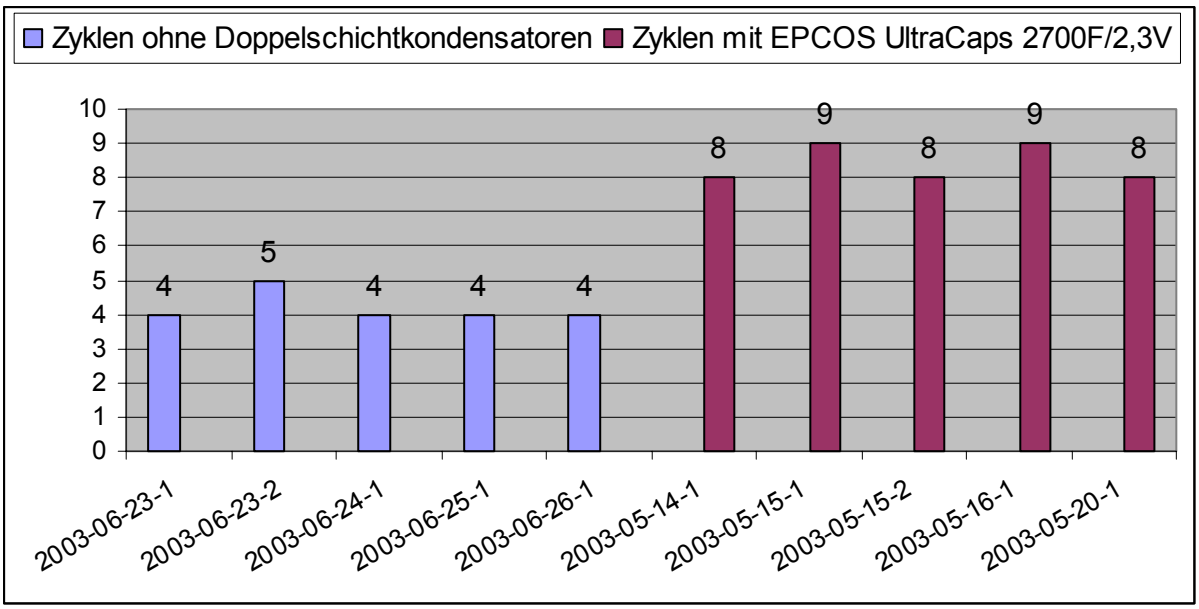


Abbildung 7.2: Anzahl der Zyklen mit „Batterie 3“

Im Idealfall ist die Zwischenkreisspannung eines elektrischen Antriebs konstant. In der Realität hängt die Zwischenkreisspannung von der Batterieladung und von dem aktuellen Laststrom ab. Bei den Messreihen ohne Doppelschichtkondensatoren sind die Einbrüche der Zwischenkreisspannung bei den hohen und plötzlichen Lastströmen des ECE 15 nicht zu übersehen. Mit Doppelschichtkondensatoren sind zwar auch noch Einbrüche der Zwischenkreisspannung zu beobachten, aber nicht in dem gleichen Maß. Die Einbrüche der Zwischenkreisspannung sind auf den inneren Widerstand der Akkumulatoren zurückzuführen. Ist dieser nicht für hohe Leistungen dimensioniert, wird der Spannungsabfall über ihn bei höheren Strömen größer. Der Spannungseinbruch an den Batterieklemmen ermöglicht, der in den Doppelschichtkondensatoren gespeicherten Ladung, wegen ihres höheren Potentials zu diesem Zeitpunkt, mit in den Zwischenkreis zu fließen und somit ein Teil des Laststroms zu übernehmen. Dadurch kann man bei den Messungen mit Doppelschichtkondensatoren einen geglätteten Stromverlauf beobachten, der an eine Tiefpassfilterung des Spannungsverlaufs ohne Doppelschichtkondensatoren erinnert. In der Abbildung 7.3

sind exemplarisch die Spannungsverläufe von einem ECE 15 Zyklus dargestellt. Einmal mit und einmal ohne Doppelschichtkondensatoren.

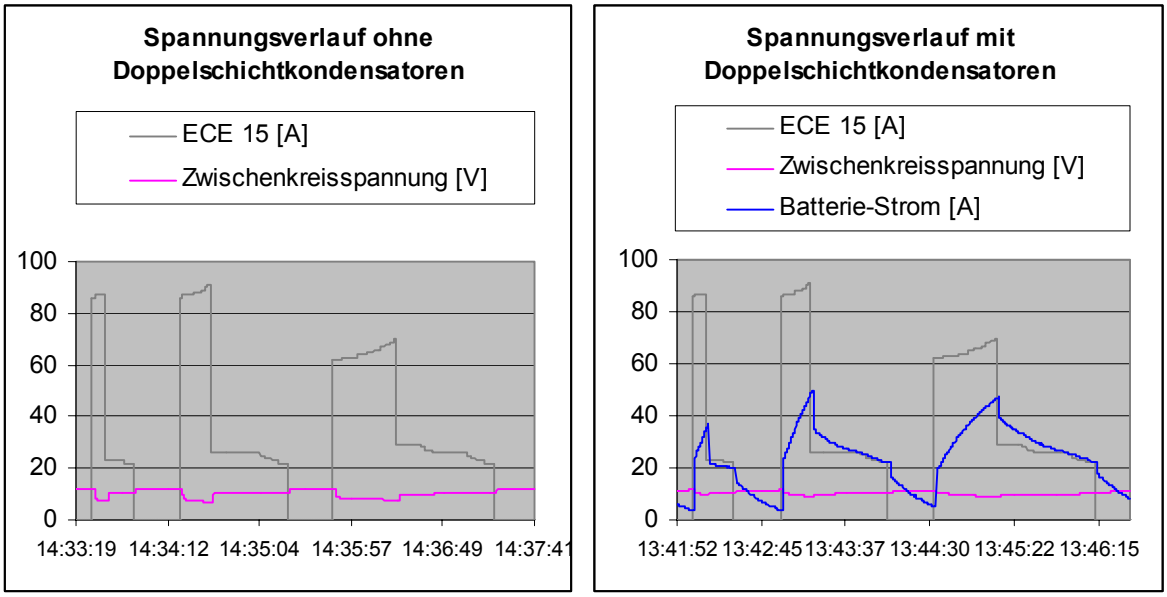


Abbildung 7.3: Batterien 3: Spannungsverläufe –Vergleich

Der Stromverlauf für die Messungen ohne Doppelschichtkondensatoren folgt immer dem vorgegebenen Laststrom. Die Stromsenke regelt ihren Widerstand so, dass aus dem Energiespeicher der gewünschte Strom entnommen werden kann, so wie auch ein Stromsteller funktionieren würde. Bei den Messungen mit Doppelschichtkondensatoren bildet sich am Zwischenkreis ein Knoten mit drei Zweigen. Der Batterie-Strom muss demnach nicht immer dem Laststrom folgen, sondern die Summe des Batterie- und des Doppelschicht-Stroms muss gemäß der 2. Kirchhoffschen Regel den Laststrom ergeben. Wie schon im letzten Kapitel erklärt, übernehmen die Doppelschichtkondensatoren bei einer hohen Last, die einen Zwischenkreisspannungs-Einbruch erzeugt, einen Teil des Laststroms. Ist der Laststrom niedrig genug, dass ihn die Batterie ohne Spannungseinbruch abgeben kann, haben die Doppelschichtkondensatoren keinen Einfluss. Abschnittsweise kann beobachtet werden (Abbildung 7.3 rechts), dass der Batterie-Strom größer als der Laststrom wird. Dazu kommt es, wenn ein Lastabwurf passiert, die Zwischenkreisspannung sich erholt und die Doppelschichtkondensatoren sich wieder aufladen. Bis die Doppelschichtkondensatoren die Batteriespannung erreicht haben, speist die Batterie den Antrieb und die Doppelschichtkondensatoren.

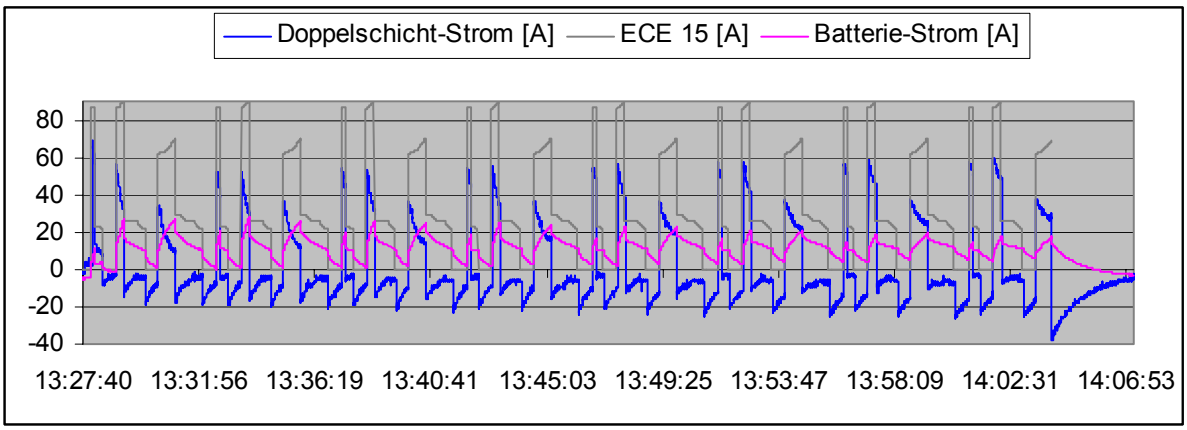


Abbildung 7.4: Batterie „3“: Stromverläufe

7.1.2 28 Volt Zwischenkreisspannung

Nach den Messreihen mit den älteren 90 Ah Batterien wurden weitere Messreihen mit 50 Ah VARTA „Solar“ Batterien durchgeführt. Die Batterien mit der Bezeichnung „5&6“ werden als „Solar“ bezeichnet, da der Batteriehersteller diese Akkumulatoren auf eine möglichst hohe Energiedichte optimiert hat. Die Messungen mit den VARTA Batterien hätten natürlich ebenfalls mit einem 14-Volt-Zwischenkreis durchgeführt werden können, es war aber zu diesem Zeitpunkt wichtiger mit der weiterentwickelten „SixPack“ und „Data Acquisition“-Elektronik Erfahrungen zu sammeln. Abgesehen von der neuen Elektronik hat sich nichts Weiteres an dem Messverfahren verändert.

Der Vergleich zwischen der Anzahl der durchlaufenen ECE 15 Zyklen fällt bei den 28-Volt-Messreihen sehr viel anders aus als bei den vorherigen Messungen. Bei der Messreihe mit den VARTA-Batterien wurden 12 bis 13 Zyklen pro Messung durchlaufen. Bei den Messungen in Kombination mit den Doppelschichtkondensatoren wurde durchschnittlich nur ein ECE 15 Zyklus mehr gemessen. Das Ergebnis ist in Abbildung 8.5 als Balkendiagramm dargestellt. Obwohl bei den älteren 90 Ah Batterien durch die Doppelschichtkondensatoren die gespeicherte Energiemenge sich um 100% verbessert hat, ergab sich für die 28-Volt-Messreihen lediglich eine Verbesserung von 8%.

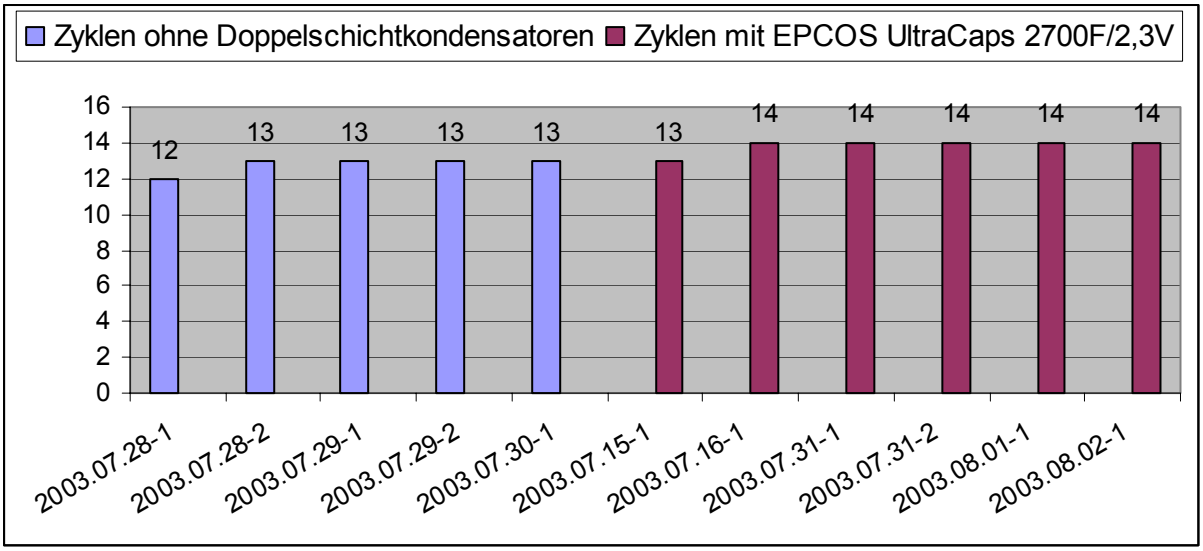


Abbildung 7.5: 28-Volt: Anzahl der Zyklen

Betrachtet man den Verlauf der Zwischenkreisspannung ohne Doppelschichtkondensatoren in dem rechten Diagramm in Abbildung 7.6 und vergleicht es mit dem Verlauf der Zwischenkreisspannung ohne Doppelschichtkondensatoren der vorherigen Messung in dem rechten Diagramm in Abbildung 7.3, wird man feststellen, dass die Einbrüche der Zwischenkreisspannung geringer ausfallen. Eigentlich währe es zu erwarten, da die Akkumulatoren bei der 28-Volt-Messreihe in Reihe geschaltet sind, dass sich der innere Widerstand verdoppelt und die Spannungseinbrüche intensiver ausfallen. Dass würde aber nur der Fall sein, wenn für alle Messungen die gleichen Akkumulatoren verwendet werden. Dass die Zwischenkreisspannung bei dieser Messreihe viel stabiler ist, bedeutet nur, dass die VARTA „Solar“ Batterien eine höhere Leistungsdichte als die 90-Ah-Batterien haben. Der ECE 15 Zyklus lastet die Batterien nicht bis zu ihrer Leistungsgrenze aus, daher ist der Spannungsabfall auch bei Strömen bis zu 60 A so gering, das die Doppelschichtkondensatoren kaum zum Einsatz kommen. Vergleicht man die linken Diagramme in den Abbildungen 7.3 und 7.6, stellt man fest, dass die Doppelschichtkondensatoren bei dieser Messreihe verhältnismäßig weniger Laststrom übernehmen als bei den 14-Volt Messungen.

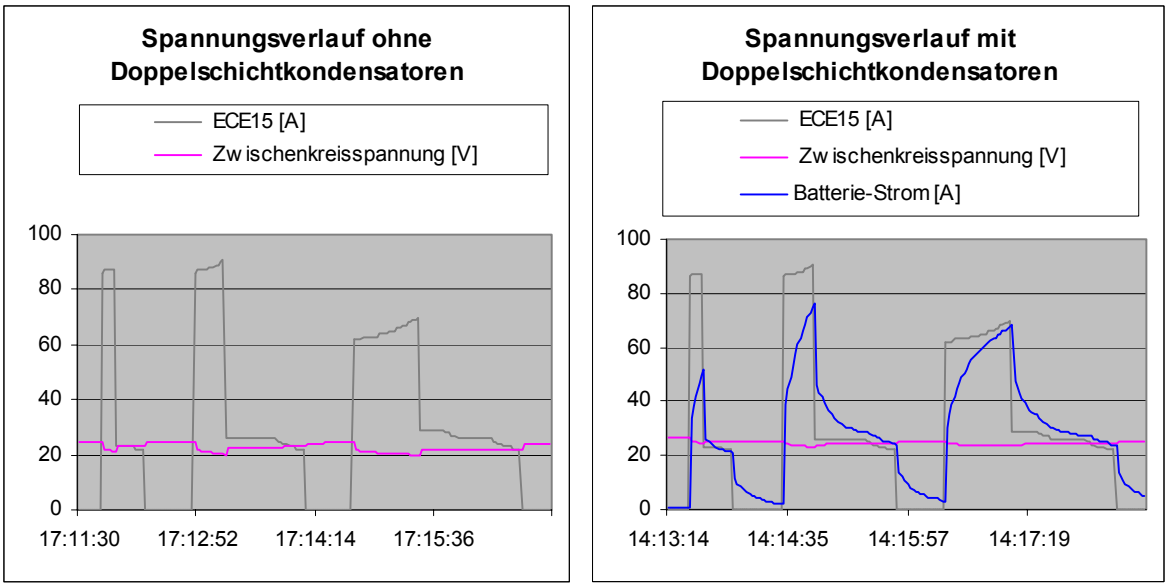


Abbildung 7.6: Batterien 5&6: Spannungsverlauf-Vergleich

Die Zwischenkreisspannung bleibt nicht für die gesamte Zeit der Messung konstant. Sie sinkt langsam gemäß einer üblichen Batterie Entladungskurve. Durch das Abschwächen der Batterie werden über die Dauer einer Messung auch die Spannungseinbrüche intensiver. Der Stromverlauf gestaltet sich dementsprechend so, dass der Anteil des Laststroms, der von den Doppelschichtkondensatoren übernommen wird, im Mittel während einer Messung und mit fortschreitender der Entladung der Batterie wächst. Wie in Abbildung7.7 zu erkennen ist, werden erst nach der Hälfte der durchlaufenen Zyklen auch Lastströme unter 60 A von den Doppelschichtkondensatoren übernommen. In der Abbildung 7.8 sind der erste und der zwölfte Zyklus der gleichen Messung in einer anderen Skalierung dargestellt. Dies soll verdeutlichen, wie sehr der Leistungsanteil der Doppelschichtkondensatoren von der Leistung der Batterien abhängt.

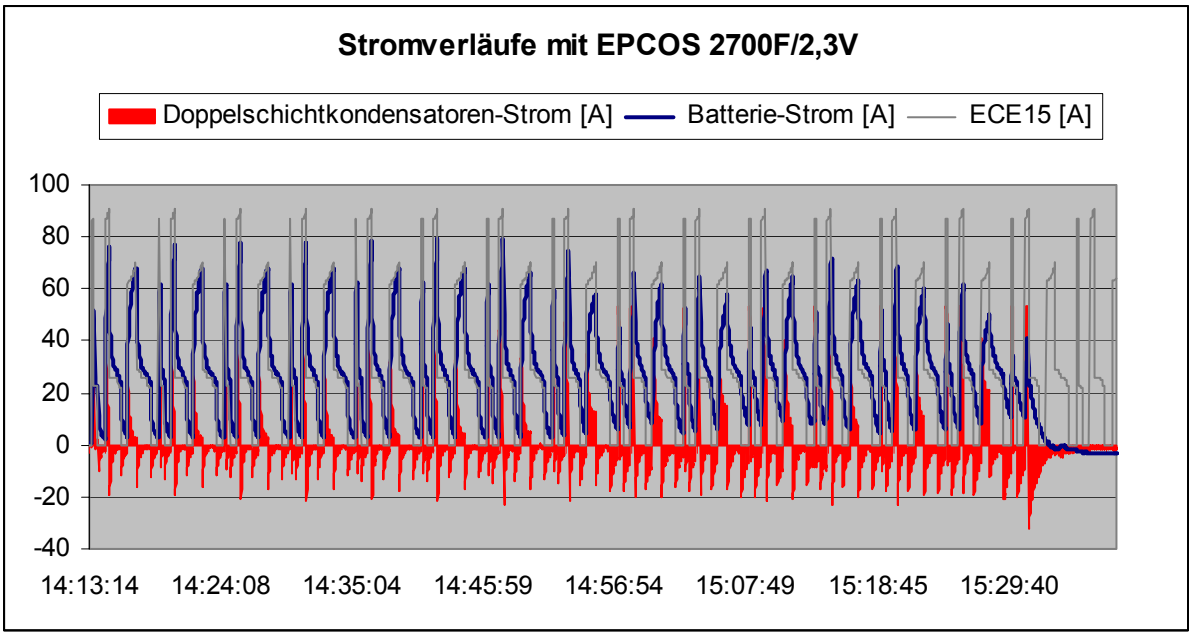


Abbildung 7.7: 28-Volt: Stromverläufe

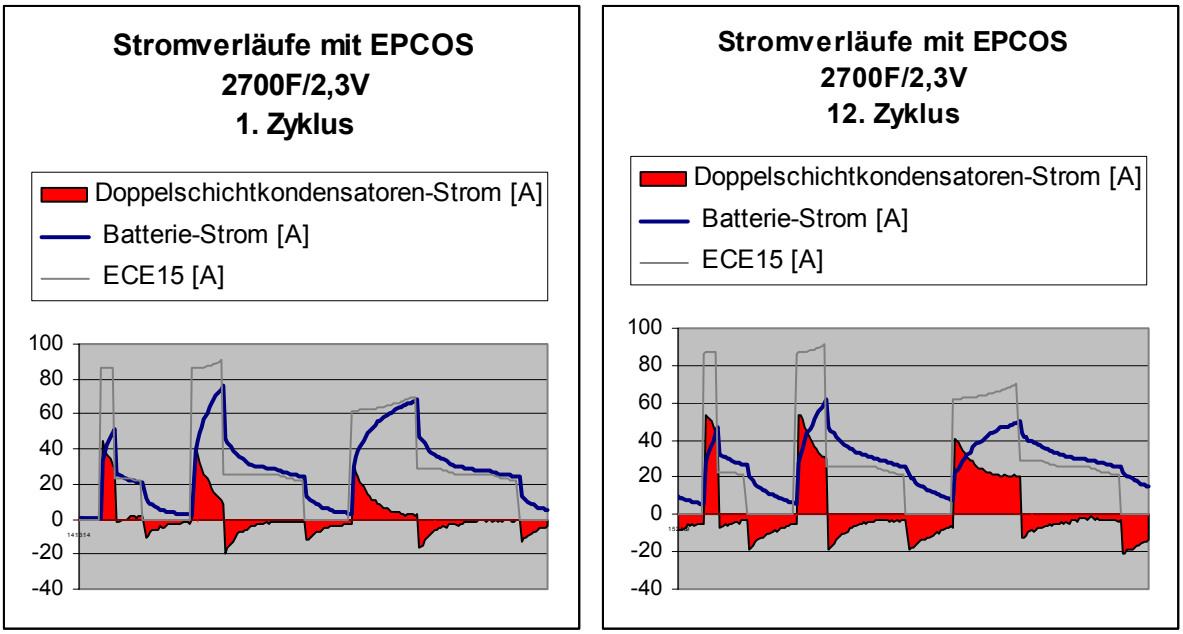


Abbildung 7.8: 28-Volt: Stromverlauf-Zoom

7.1.3 Messstand Zusammenfassung

Die Doppelschichtkondensatoren können im Vergleich zu Batterien nur wenig Energie speichern und werden bei der „Peak Power Assistance"-Methode nur eingesetzt, damit der Laststromverlauf geglättet wird. Ist die Batterie zu leistungsstark, können die Doppelschichtkondensatoren diese Aufgabe nicht übernehmen und somit nicht den Stromverlauf der Batterie beeinflussen. Die Doppelschichtkondensatoren scheinen erst eine signifikante Reichweitenverbesserung zu bewirken, wenn die eingesetzten Akkumulatoren an und über ihre Leistungsgrenze hinaus betrieben werden. Die Anzahl der durchlaufenen ECE 15 Zyklen aller Messungen ist in der Tabelle 8.1 als Übersicht zusammengefasst. Bei der leistungsschwächsten Batterie „2" ergab sich eine durchschnittliche Reichweitenverlängerung von 136%. Bei den leistungsstärkeren VARTA Batterien hingegen ergab sich nur eine Reichweitenverlängerung von 8%. Desto intensiver die Spannungseinbrüche am Zwischenkreis bei hohen Lastströmen ausfallen, desto mehr können die Doppelschichtkondensatoren den Batteriestromverlauf glätten. Ein gleichmäßiger Verlauf des Batterie-Stroms bewirkt eine höhere Energieentnahme.

Zyklen	**„Batterie 2"**		**„Batterie 3"**		**„Batterie 5,6"**	
Messung:	ohne UC	Mit UC	ohne UC	mit UC	ohne UC	mit UC
1	2	5	4	8	12	13
2	2	6	5	9	13	14
3	3	6	4	8	13	14
4	3	6	4	9	13	14
5	2	6	4	8	13	14
6		5				14
Mittelwert:	**2,4**	**5,67**	**4,20**	**8,40**	**12,80**	**13,83**
Verbesserung:	136%		100%		8%	

Tabelle 7.1: Anzahl der Zyklen Übersicht

Temperaturunterschiede an Doppelschichtkondensatoren waren kaum messbar. Während einer Messung haben sich die Doppelschichtkondensatoren bei natürlicher Konvektion unter normalen Bedin-

gungen höchstens um 1°C erwärmt. Die verwendeten Doppelschichtkondensatoren sind für Dauerströme in der Größenordnung von 500A ausgelegt. Eine starke Erwärmung oder gar Überhitzung wäre bei den Strömen des ECE 15 Zyklus nicht zu erwarten.

Die „*SixPack*“ und „*Scanner*“-Module sind mit Symmetrierungswiderständen versehen. Diese Widerstände sind so dimensioniert, dass sie den doppelten des maximalen Selbstentladungsstroms fließen lassen. Obwohl von Herstellern bei Applikationen höherer Leistung aktive Symmetrierungsvorrichtungen empfohlen werden, war die passive Symmetrierung mit den Widerständen für die Messungen vollkommen ausreichend. Die Doppelschichtkondensatoren haben sich weitgehend symmetrisch geladen und entladen. Unsymmetrien traten erst im 50 mV Bereich auf. Ein „driften“ der Doppelschichtkondensator-Einzelspannungen oder eine andere Erhöhung einer unsymmetrischen Ladungsverteilung wurde auch über mehrere Messungen hinweg nicht beobachtet.

Durch die Emulation des Antriebs im Labor konnten Richtlinien für die Messungen im Fahrzeug formuliert werden. Die Akkumulatoren des Fahrzeugs sind so zu dimensionieren, dass ein je nach Last ein nur durchschnittlicher Nennstrom zu bewältigen ist, damit bei hohem Leistungsbedarf die Doppelschichtkondensatoren zum Einsatz kommen. Das Temperaturverhalten der Doppelschichtkondensatoren ist zwar bei höheren Strömen zu überwachen, es wird aber mit keinem signifikanten Temperaturanstieg gerechnet. Die passive Symmetrierung genügt, um die Doppelschichtkondensatoren vor Überspannungen und negativen Spannungen zu schützen. Durch diese gewonnenen Erfahrungen konnten die Messungen im Fahrzeug wesentlich effektiver geplant werden.

7.2 Ergebnisse MiniEl

Die Messungen mit dem Messtand haben gezeigt, dass die Reichweite eines Elektrofahrzeugs durch den Einsatz von Doppelschichtkondensatoren verbessert werden kann und dass die maximale Leistung der verwendeten Akkumulatoren ein sehr wichtiger Faktor dabei ist. Mit den folgenden Messungen sollte diese Ergebnisse vertieft und verifiziert werden. Mit den MiniEl-Messungen soll weiterhin untersucht werden, welchen Einfluss das generatorische Bremsen hat und wie sehr die Reichweitenverbesserung von der Doppelschichtkondensator Kapazität abhängt. Aus den Messdaten, die im Fahrzeug aufgenommen wurden, werden weitere Eigenschaften und Mittelwerte berechnet, die eine genauere Auskunft über die Integration von Doppelschichtkondensatoren liefern. Jede der folgenden Messungen wurden mindestens vier Mal unter den gleichen Bedingungen wiederholt, sodass zufällige Einflüsse durch unbekannte Faktoren ausgeschlossen werden können.

Die Daten jeder Messreihe werden in Form einer Tabelle zusammengefasst. In der ersten Zeile dieser Tabelle ist die Anzahl der durchlaufenen Zyklen angegeben. Wie auch bei dem Messtand werden nur ganzzahlige Zyklen bedingt durch die Abbruchbedingung angegeben. In der zweiten und dritten Zeile der Tabellen werden die Reichweite in Kilometern und die Dauer der Messung in Sekunden angegeben. Die Reichweite wird zwar separat gemessen, ist aber das Produkt der Anzahl der durchlaufenen Zyklen und der Zyklus Strecke. Die Dauer der Messung ist das Produkt der Anzahl der durchlaufenen Zyklen und 400 Sekunden. Das bedeutet das sich die Werte der ersten drei Tabellenzeilen zueinander proportional sind.

Durch die Produkte der Zwischenkreisspannungs-Messwerte und der Strom-Messwerte können die Verläufe der Leistung für die Batterie, den Antrieb (Motor) und die Doppelschichtkondensatoren errechnet werden. Findet eine Messung ohne Doppelschichtkondensatoren statt, dann ergibt sich nur ein gemeinsamer Leistungsverlauf für Batterie und Motor. Bildet man die Summe der positiven Leistungswerte über die Messdauer, erhält man aus dem Leistungsverlauf der Batterie die Energiemenge, die sie während der Messung abgegeben hat, aus dem Leistungsverlauf des Antriebs, die Traktionsenergie und aus dem Leistungsverlauf der Doppelschichtkondensatoren, die Energiemenge die während der Messung aus ihnen herausgeflossen ist. Als Traktionsenergie wird die Energie bezeichnet die der Antrieb versucht hat, in ki-

netische Energie umzuwandeln. Wird die Summe über die negativen Leistungswerte gebildet, ergibt sich aus dem Batterie-Leistungsverlauf, die Energiemenge, die in die Batterie zurückgespeist worden ist. Aus dem Leistungsverlauf des Antriebs ergibt sich die Rückspeisungs-Energie und aus dem Leistungsverlauf der Doppelschichtkondensatoren, die Energiemenge die während der Messung in sie hineingeflossen ist. Diese Energiemengen sind auch in den Übersichts-Tabellen enthalten und werden in Wattstunden (Wh) angegeben. Die Reichweite des Fahrzeugs hängt von der Traktionsenergie ab. Bei Messungen mit generatorischem Bremsen, wird das Verhältnis der Rückspeisungsenergie zu der Traktionsenergie gebildet. Dieser Quotient drückt den prozentualen Anteil der Traktionsenergie aus, die durch das generatorische Bremsen wiederverwendet werden konnte.

Um die Funktionsfähigkeit der Drehzahlerfassung zu verifizieren, wird der mittlere Weg pro Zyklus errechnet. Dieser ergibt sich über das Integral der Geschwindigkeit über eine Zyklusdauer. Wegen der geringen Auflösung der Drehzahlerfassung, Vibrationen und leichten Messfahrt Abweichungen wie z.B. ein Überholmanöver sind Abweichungen von ein paar Metern vertretbar. Um Maße für die Vergleichbarkeit der Messfahrten zu haben, werden die mittlere Geschwindigkeit, die maximale Beschleunigung und der mittlere Energiebedarf pro Kilometer in der Tabelle angegeben. Da das Fahrverhalten für die Messfahrten vorgegeben ist, sollte für alle vergleichbare Messungen sich dieselbe mittlere Fahrzeuggeschwindigkeit ergeben. Die Beschleunigung des Fahrzeugs wird durch die Motorleistung begrenzt. Der Geschwindigkeitsverlauf und der Beschleunigungsverlauf sollten für alle Zyklen sehr ähnlich sein können aber nur im Rahmen dieser Arbeit grafisch ausgewertet werden. Der Wert der maximalen Beschleunigung sollte für alle Messungen ähnlich sein. Ein abweichender Wert würde auf einen Messfehler hindeuten. Der mittlere Energiebedarf pro Kilometer charakterisiert den Verbrauch an elektrischer Energie während einer Messung. Um Unterschiede in den Messergebnissen auf die Doppelschichtkondensatoren zurückführen zu können, ist es absolut notwendig das der Fahrer durch eine gleichbleibende Fahrweise den Energieverbrauch des Fahrzeugs möglichst in engen Grenzen hält. Weicht einer der in diesem Kapitel genannten Werte mehr als 10% von unterschiedlichen Messreihen ab, so können diese nicht mehr zuverlässig verglichen werden.

Aus den berechneten Leistungsverläufen werden die Mittelwerte für die positiven und die negativen Werte separat berechnet. Es wäre kaum sinnvoll die Mittelwerte ohne die Unterscheidung des Vorzeichens zu ermitteln, da per Definition die Leistung als vorzeichenlos zu betrachten ist und das negative Vorzeichen nur von einem negativen Strom stammen kann, der eine auf eine zu differenzieren Funktionalität hinweist. Negative Leistungswerte z.B. treten bei der Batterie und dem Antrieb nur während des generatorischen Bremsens auf. Außer den Leistungsmittelwerten sind auch die Spitzenwerte in der Tabelle enthalten. Dadurch ist der Einfluss der Doppelschichtkondensatoren auf die Maximalwerte besser nachzuvollziehen.

Das Verhältnis der mittleren positiven Doppelschichtkondensatorleistung zu der mittleren positiven Batterie-Leistung ergibt den Doppelschicht-Leistungsfaktor. Der Leistungsfaktor gibt den prozentualen Anteil der Leistung an, die durch die Doppelschichtkondensatoren zwischengespeichert worden ist. Anhand des Leistungsfaktors ist festzustellen, wie intensiv diese von dem Antrieb in Anspruch genommen wurden. Das Verhältnis der negativen Doppelschicht-Leistung (Leistung die hineingeflossen ist) zu der positiven Doppelschicht-Leistung (Leistung die rausgeflossen ist) ergibt den Wirkungsgrad der Doppelschichtkondensatoren. Da die Doppelschichtkondensatoren sich durch die Wartezeit am Ende einer Messung wieder aufgeladen, beeinflusst die Ladung beim Begin der Messung vorhanden ist den Wert des Wirkungsgrads kaum.

Für alle Werte der Messungen einer Messreihe werden der Mittelwert und die Standardabweichung in jeweils einer Tabellen-Spalte kalkuliert. Die Mittelwerte dienen zum übersichtlicheren Vergleich mit anderen Messreihen und die Standardabweichungen zum Identifizieren von groben Unterschieden in den Messergebnissen der gleichen Messreihe.

7.2.1 VARTA Batterien (50Ah) ohne Rückspeisung

Messung:	I	II	III	IV	µu	std.Abw.	Einheit:
Anzahl der Zycklen:	4	5	4	3	4	0,816	-
Reichweite:	6,712	8,428	6,743	5,075	6,740	1,369	km
Dauer der Messung:	1600	2000	1600	1200	1600	327	s
Traktions-/Batterie-Energie:	407,41	455,01	391,80	331,01	396,309	51,163	Wh
mittlerer Weg pro Zycklus:	1,678	1,686	1,686	1,692	1,685	0,006	km
mittlere Geschwindigkeit:	15,09	15,19	16,34	15,24	15,465	0,589	km/h
maximale Beschleunigung	1,508	-	1,467	1,630	1,535	0,085	m/s^2
mittlerer Energiebedrarf pro Kilometer:	60,70	53,99	58,10	65,22	59,504	4,709	Wh/km
mittlere Batterie-Leistung im Quell-Betrieb:	917	819	946	1.067	937	102	W
maximale Batterie-Leistung im Quell-Betrieb:	5.746	5.590	5.545	5.551	5.608	94	W
Messbegin:	17:28:26	17:55:48	17:36:27	17:58:09			
Datum:	03.17.2003	03.17.2003	10.10.2003	11.10.2003			

Tabelle 7.2: Messungen ohne Rückspeisung nur Batterien

Die ersten Messreihen mit dem MiniEl wurden nur mit Batterien und ohne generatorisches Bremsen durchgeführt. In der Tabelle 7.2 sind die Daten und die Mittelwerte dieser Messung enthalten. Die Zyklen wurden im Mittel vier Mal durchlaufen, mit einer Abweichung von einem Zyklus. Das MiniEl erreicht mit dieser Antriebs-Topologie einer Reichweite von durchschnittlich 6,74 km. Die Abweichung von einem Zyklus ist auf die unterschiedliche Fahrweise während der Messung zurückzuführen. Bei der II. Messung wurden fünf Zyklen erreicht, bei einem um 10% geringeren Energiebedarf pro Kilometer. Der Fahrer ist in diesem Fall zu „sparsam“ gefahren. Bei der IV. Messung wurden nur drei Zyklen erreicht bei einem 10% höheren Energiebedarf pro Kilometer. Der Fahrer ist im Vergleich zum Durchschnitt zu „verschwenderisch“ gefahren. Der Wert der maximalen Beschleunigung der II. Messung und die durchschnittliche Geschwindigkeits-Angabe der III. Messung sind wegen einem Messfehler ungültig. Ansonsten haben sich die Messwerte, die zu der Vergleichbarkeit der Messungen herangezogen werden, können in einem sinnvollen Rahmen gehalten. Da keine Doppelschichtkondensatoren in dieser Topologie vorhanden sind und auch nicht generatorisch gebremst wird, fehlen aus der Tabelle alle damit relevanten Mittelwerte. Die Batterie- und die Antriebsleistungen und -energien sind identisch. Die Batterie hat durchschnittlich 396 Wh abgeben können, ihre effektive Kapazität war somit 11 Ah. Die mittlere Leistung ist unter 1 kW geblieben und die Maximalleistung war unter 6 kW. Die geringe Reichweite ist anhand des Spannungsverlaufs der Batterien zu erklären. Während der Beschleunigungsphase, bei den ein höherer Drehmoment und dementsprechend auch ein höherer Strom benötigt wird, bricht die Zwischenkreisspannung mehr als 10 Volt ein. Das ist ein Zeichen, das diese Batterien für das Fahrzeug unterdimensioniert sind. Genau bei diesem Fall sollte sich der Einfluss der Doppelschichtkondensatoren deutlich zeigen können.

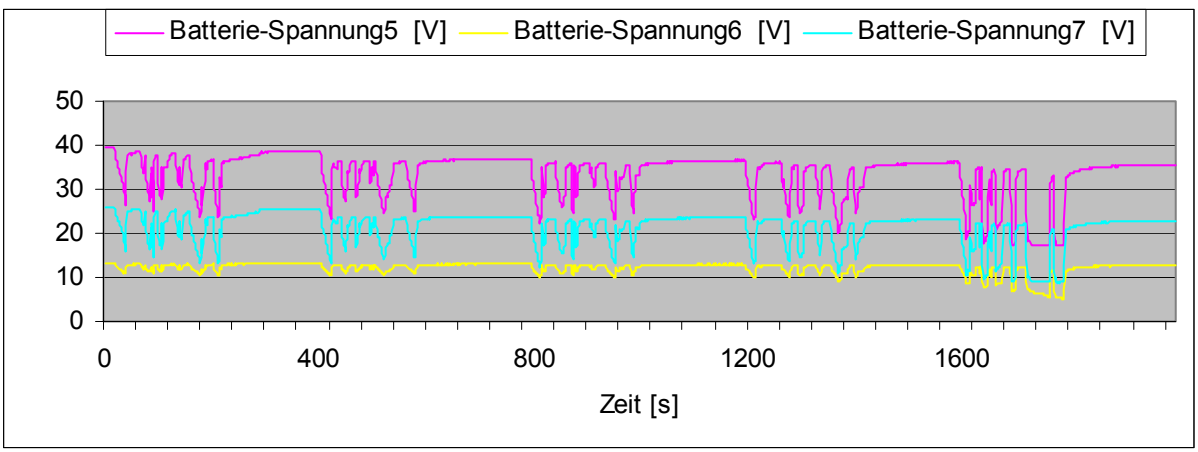


Abbildung 7.9: Spannungsverlauf: Batterien 5,6,7 nur Batterien ohne Rückspeisung

7.2.2 VARTA Batterien 5,6,7 (50 A) mit EPCOS 2700F ohne Rückspeisung

Messung:	I	II	III	IV	µu	std.Abw.	Einheit:
Anzahl der Zycklen:	6	5	6	6	6	0,500	n
Reichweite:	10,241	8,441	10,177	9,479	9,585	0,837	km
Dauer der Messung:	2.400	2.000	2.400	2.500	2.325	222	s
Traktions-Energie:	709	603	671	665	662	44	Wh
Batterie-Energie:	741	635	703	680	690	44	Wh
mittlerer Weg pro Zycklus:	1,707	1,688	1,696	1,580	1,668	0,059	km
mittlere Geschwindigkeit:	15,19	16,43	15,67	13,86	15,288	1,081	km/h
maximale Beschleunigung:	1,630	1,467	1,630	1,467	1,548	0,094	m/s^2
mittlerer Energiebedrarf pro Kilometer:	69,24	71,39	65,88	70,20	69,178	2,366	Wh/km
mittlere Maschinen-Leistung im Motor-Betrieb:	1.064	1.173	1.032	973	1.060	84	W
mittlere Batterie-Leistung im Quell-Betrieb:	1.111	1.236	1.082	995	1.106	100	W
mittlere positive Doppelschicht-Leistung:	271	295	320	298	296	20	W
mittlere negative Doppelschicht-Leistung:	-318	-353	-369	-319	-340	25	W
maximale Maschinen-Leistung im Motor-Betrieb:	5.715	6.056	5.809	6.065	5.911	177	W
maximale Batterie-Leistung im Quell-Betrieb:	4.104	4.558	4.445	4.539	4.411	211	W
maximale positive Doppelschicht-Leistung:	2.670	2.655	2.494	2.592	2.603	80	W
maximale negative Doppelschicht-Leistung:	-2.507	-2.265	-2.408	-2.233	-2.353	128	W
mittlerer Doppelschicht-Leistungsfaktor:	25,49%	27,23%	31,80%	31,11%	28,91%	3,04%	%
mittlerer Doppelschicht-Wirkungsgrad:	85,13%	83,68%	86,79%	93,34%	87,24%	4,26%	%
Messbegin:	18:28:41	17:49:32	17:05:10	16:46:43			
Datum:	13.10.2003	14.10.2003	15.10.2003	16.10.2003			

Tabelle 7.3: Messungen ohne Rückspeisung mit EPCOS 2700F

Als zu der Antriebs-Topologie der vorherigen Messreihe die EPCOS 2700F/2,3V Doppelschichtkondensatoren hinzugefügt wurden, ergaben sich durch weitere Messungen die Werte, die in der Tabelle 7.3 enthalten sind. Mit den Doppelschichtkondensatoren konnte das Fahrzeug zwei Zyklen länger fahren. Es hat seine durchschnittliche Reichweite von 6,74 auf 9,585 km erhöht, was einer prozentualen Reichweitenverlängerung von 42% entspricht. Die Reichweitenverlängerung wird durch die zusätzliche Energie ermöglicht, die dem Antrieb zur Verfügung steht. Im Gegensatz zu der Messreihe ohne Doppelschichtkondensatoren, wo durchschnittlich nur 396 Wh aus den Batterien entnommen wurden, können die gleichen Batterien in Kombination mit den Doppelschichtkondensatoren 690 Wh abgeben. Die Batterien können insgesamt mehr Energie abgeben, da der Stromverlauf der Fahrten mit Doppelschichtkondensatoren um mehr als 50 A kleinere Spitzenströme hat als der Stromverlauf ohne Doppelschichtkondensatoren. Zum Vergleich siehe Abbildungen 7.10 und 7.11. Dadurch, dass die Batterien für die Belastung durch die Messfahrt zu leistungsschwach sind, können die Doppelschichtkondensatoren, die Zwischenkreisspannungseinbrüche abfangen und die Spitzenwerte des Batterie-Stroms reduzieren.

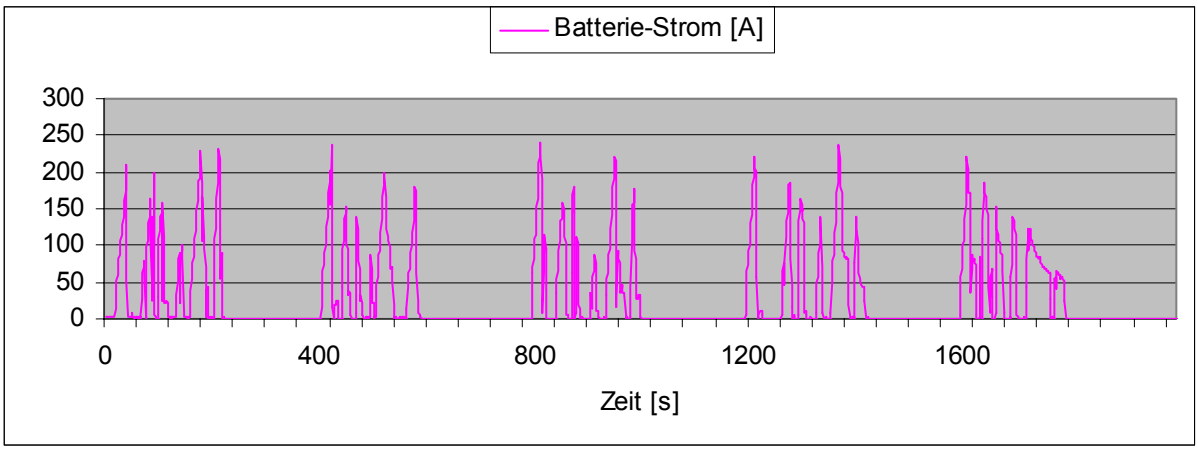


Abbildung 7.10: Batterie 5,6,7 ohne Doppelschichtkondensatoren Stromverlauf

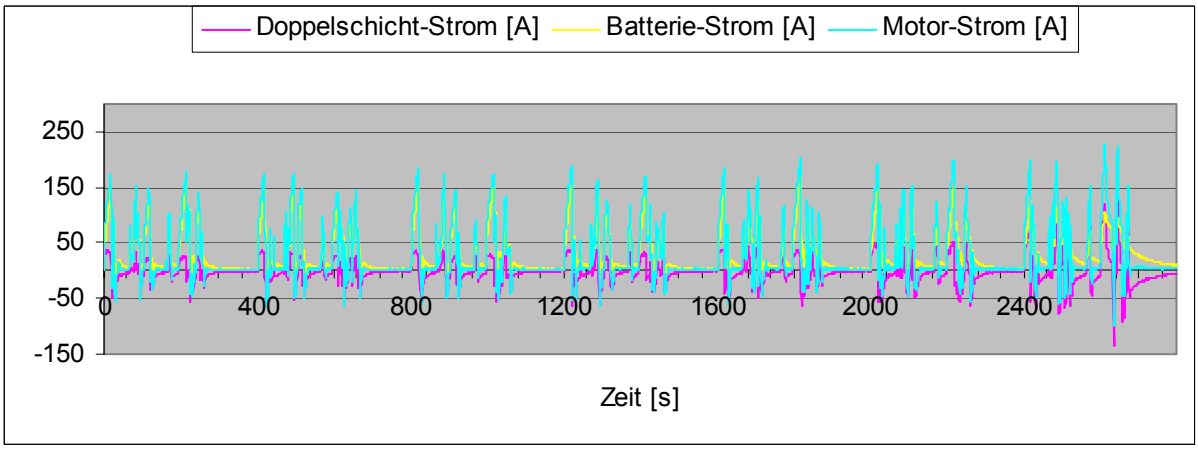


Abbildung 7.11: Batterie 5,6,7, mit EPCOS 2700F/2,3V Stromverlauf

Die mittlere Geschwindigkeit, der mittlere Weg pro Zyklus und die maximale Beschleunigung sind durchaus sehr ähnlich zu den Mittelwerten der Messung nur mit den Batterien. Der Energieverbrauch pro Kilometer ist um 10 Wh/km bei der Messung mit Doppelschichtkondensatoren gestiegen. Das bedeutet, dass die Reichweitenverbesserung die durch die Doppelschichtkondensatoren eingetreten ist, noch größer sein kann als aus dem Vergleich dieser Messungen hervorgeht. Eine mögliche Erklärung für den höheren Energieverbrauch pro Zyklus ist zum einem, eine veränderte Fahrweise des Fahrers, da sich die Dynamik des Fahrzeugs geändert hat und zum anderen höhere Verluste durch den Wirkungsgrad der Doppelschichtkondensatoren.

Dass sich durch die Doppelschichtkondensatoren die Dynamik des Fahrzeugs geändert hat, kann man an den maximalen Leistungswerten erkennen. Wenn nur mit der Batterie gefahren wird, stehen dem Fahrer 5,5 kW zur Verfügung. Die maximalen Leistungswerte mit Doppelschichtkondensatoren sind im Schnitt um 0,5 kW größer. Die Doppelschichtkondensatoren entlasten bei hohem Leistungsbedarf die Batterie, sodass die maximale Batterieleistung mit Doppelschichtkondensatoren deutlich niedriger ist. Die durchschnittliche Antriebsleistung ist bei beiden Messreihen auf gleichem Niveau geblieben. Der durchschnittliche Leistungsfaktor-Wert sagt aus, dass die Doppelschichtkondensatoren fast 30% der Batterie-Energie zwischengespeichert haben.

Es ist zu beobachten, dass die Traktionsenergie bei jeder Messung ungefähr 30 Wh geringer ausfällt als die Batterieenergie. Es stellt sich natürlich die Frage, was mit dieser Energie geschehen ist. Die einzige Möglichkeit den Energieverlust zu erklären sind die Doppelschichtkondensatoren. Der Wirkungsgrad der Doppelschichtkondensatoren beträgt zwar im Mittel 87% und es ist nur der Energieanteil zu berücksichtigen, der auch tatsächlich durch die Doppelschichtkondensatoren zwischengespeichert wird. Dementsprechend muss der Wirkungsgrad der Doppelschichtkondensatoren mit deren Leistungsfaktor multipliziert werden und den anteiligen Energieverlust zu berechnen, der durch den Wirkungsgrad der Doppelschichtkondensatoren resultiert. Weitere Verluste können auf den Stromschienen entstehen durch die die Doppelschichtkondensatoren angeschlossen sind und insgesamt die Batterien-Traktion-Energiedifferenz ergeben. Insgesamt erhöhen die Doppelschichtkondensatoren die Energieentnahme aus den Batterien wandeln aber auch ein Teil davon in Wärme um.

7.2.3 VARTA Batterien (50 Ah) mit Rückspeisung

Messung:	I	II	III	IV	V	µu	std.Abw	Einheit:
Anzahl der Zycklen:	4	4	4	5	6	4,60	0,894	-
Reichweite:	6,991	6,757	6,605	8,416	10,126	7,779	1,496	km
Dauer der Messung:	1600	1600	1600	2000	2400	1840	358	s
Traktions-/Batterie-Energie:	452	485	492	547	671	529	86	Wh
Rüchspeisungs-Energie:	25	37	34	37	50	37	9	Wh
normierte Rüchspeisungs-Energie:	5,44%	7,62%	6,90%	6,77%	7,51%	6,85%	0,87%	%
mittlerer Weg pro Zycklus:	1,748	1,689	1,651	1,683	1,688	1,692	0,035	km
mittlere Geschwindigkeit:	15,20	15,39	15,47	15,16	15,19	15,282	0,140	km/h
maximale Beschleunigung	1,711	2,608	2,486	1,671	2,567	2,209	0,475	m/s^2
mittlerer Energiebedrarf pro Kilometer:	64,65	71,71	74,45	65,05	66,30	68,430	4,394	Wh/km
mittlere Batterie-Leistung im Quell-Betrieb:	1.017	1.090	1.106	985	1007	1.041	54	W
mittlere Batterie-Leistung im Senk-Betrieb:	-55	-83	-76	-67	-76	-71	11	W
maximale Batterie-Leistung im Quell-Betrieb:	6.395	6.724	6.531	6.479	6.651	6.556	132	W
maximale Batterie-Leistung im Senk-Betrieb:	-2.605	-4.013	-3.173	-2.617	-2.636	-3.009	610	W
Messbegin:	15:45:31	13:24:17	09:24:23	21:26:13	17:38:39			
Datum:	10.11.2003	20.11.2003	21.11.2003	21.11.2003	19.12.2003			

Tabelle 7.4: Messungen mit Rückspeisung nur Batterien

Wenn ein elektrisches Fahrzeug beschleunigt, dann wird die in der Batterie chemisch gespeicherte Energie in elektrische umgewandelt. Der Stromsteller passt die Parameter der elektrischen Energie dem Motor an und der Motor wandelt die elektrische Energie in kinetische Energie um. Auch wenn sich das Fahrzeug im Idealfall ohne Verluste fortbewegen könnte, würde seine kinetische Energie wegen den Wirkungsgraden der Komponenten, nur ein Anteil der durch die Batterie aufgebrachte Energie sein. Bremst ein elektrisches Fahrzeug generatorisch, ist die in die Batterie zurückgespeiste Bremsenergie ein noch kleinerer Anteil der ursprünglich verwendeten Batterieenergie, der durch das Quadrat der Wirkungsgrade der Komponenten bestimmt wird. Sogar bei sorgfältig ausgewählten Motoren, Stellern und Batterien ist eine Energierückspeisung größer als 30% nicht realisierbar. [14]

Das MiniEl erreicht Mithilfe des 4QD-300 Stromstellers eine Energierückspeisung zwischen 5,5% und 7,5%. Im Vergleich zu den Fahrten mit dem Curtis-Steller wird durchschnittlich ein halber Zyklus länger gefahren, was einer Reichweitenverbesserung von 0,8 km entspricht. Der mittlere Energieverbrauch und die maximale Batterieleistung ähnelt dem des Curtis-Stellers mit Doppelschichtkondensatoren, was darauf hinweist das der 4QD-Steller insgesamt eine höhere Leistung den Batterien entnehmen kann. Es wäre möglich das der 4QD-Steller gegenüber dem Curtis-Steller über einen geringeren Durchlasswiderstand oder über eine größere maximale Pulsbreite verfügt. Ansonsten entsprechen alle Werte der Messungen den des Curtis-Stellers. In Abbildung 7.12 ist der Leistungsverlauf einer Messung abgebildet. Das generatorische Bremsen kann man an den negativen Leistungswerten erkennen.

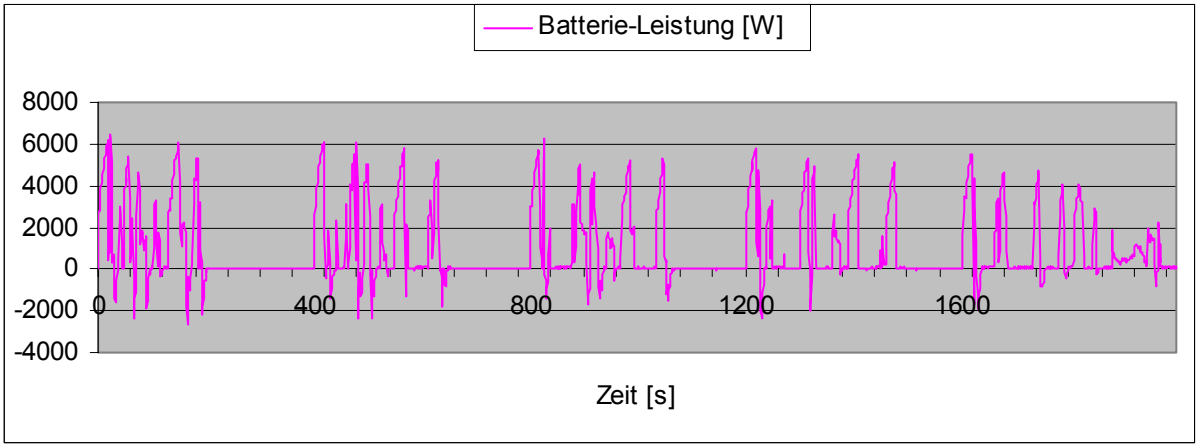


Abbildung 7.12: MiniEl nur Batterien mit Rückspeisung: Leistungsverlauf

7.2.4 VARTA Batterien (50 Ah) mit EPCOS 2700F mit Rückspeisung

Messung:	I	II	III	IV	µu	std.Abw.	Einheit:
Anzahl der Zyklen:	7	7	7	7	7,0	0,0	n
Reichweite:	11,905	11,855	11,886	11,869	11,879	0,022	km
Dauer der Messung:	2.800	2.800	2.800	2.800	2.800	0	s
Traktions-Energie:	774	784	820	809	797	21	Wh
Batterie-Energie:	748	770	801	798	779	25	Wh
Rückspeisungs-Energie:	63	65	75	67	68	5	Wh
normierte Rückspeisungs-Energie:	8,16%	8,34%	9,19%	8,30%	8,49%	0,47%	%
mittlerer Weg pro Zyklus:	1,701	1,694	1,698	1,696	1,697	0,003	km
mittlere Geschwindigkeit:	15,31	15,24	15,29	15,26	15,276	0,029	km/h
maximale Beschleunigung:	2,201	2,038	2,201	1,630	2,017	0,269	m/s^2
mittlerer Energiebedrarf pro Kilometer:	65,05	66,10	69,00	68,16	67,078	1,821	Wh/km
mittlere Maschinen-Leistung im Motor-Betrieb:	996	1.007	1.055	1.040	1.024	27	W
mittlere Maschinen-Leistung im Generator-Betrieb:	-81	-84	-97	-86	-87	7	W
mittlere Batterie-Leistung im Quell-Betrieb:	962	990	1.030	1.026	1.002	32	W
mittlere Batterie-Leistung im Senk-Betrieb:	-1	-1	-1	-1	-1	0	W
mittlere positive Doppelschicht-Leistung:	231	214	223	214	221	8	W
mittlere negative Doppelschicht-Leistung:	-279	-281	-294	-285	-285	7	W
maximale Maschinen-Leistung im Motor-Betrieb:	6.220	6.271	6.077	6.066	6.158	103	W
maximale Batterie-Leistung im Quell-Betrieb:	5.573	5.486	5.199	5.157	5.354	207	W
maximale positive Doppelschicht-Leistung:	3.230	2.782	2.538	2.710	2.815	295	W
maximale Maschinen-Leistung im Generator-Betrieb:	-2.980	-3.069	-2.750	-3.104	-2.976	159	W
maximale Batterie-Leistung im Senk-Betrieb:	-213	-236	-368	-215	-258	74	W
maximale negative Doppelschicht-Leistung:	-4.181	-3.343	-3.833	-4.272	-3.907	421	W
mittlerer Doppelschicht-Leistungsfaktor:	23,24%	21,26%	21,16%	20,59%	21,56%	1,16%	%
mittlerer Doppelschicht-Wirkungsgrad:	83,05%	76,37%	75,87%	75,07%	77,59%	3,68%	%
Messbegin:	14:48:31	20:38:34	15:11:00	15:21:08			hh:mm:ss
Datum:	29.11.2003	01.12.2003	02.12.2003	03.12.2003			dd.MM.yyyy

Tabelle 7.5: Messungen mit Rückspeisung und EPCOS 2700F

Die Antriebs-Kombination des 4QD-Stellers mit den Doppelschichtkondensatoren kann sieben Zyklen fahren, was einer Reichweite von 11,9 km entspricht. Im Vergleich zu der vorherigen Messung nur mit den Batterien ist es eine Reichweitenverbesserung von 2,4 Zyklen bzw. 52%. Die Reichweiten verlängernde Wirkung der Doppelschichtkondensatoren fällt für den 4QD-Steller um 10% stärker aus als bei dem Curtis-Steller. Die Rückspeisungsenergie hat sich durch die Verwendung der Doppelschichtkondensatoren verdoppelt. Dem Antrieb steht die Summe der Batterie- und der Rückspeisungs-Energie, abzüglich der Verluste durch den Wirkungsgrad der Doppelschichtkondensatoren, zur Verfügung. Die Batterie-Energie dieser Messung ist auf dem gleichen Niveau der Messreihe mit dem Curtis-Steller und rechtfertigt nur eine Reichweitenverbessung von zwei Zyklen. Die restliche Reichweitenverbesserung ist auf das generatorische Bremsen zurückzuführen. Die Doppelschichtkondensatoren fördern bei Antrieben mit Rückspeisungsmöglichkeit nicht nur eine höhere Energieentnahme aus der Batterie, sondern auch eine höhere Ausbeute des generatorischen Bremsens.

Betrachtet man die Leistungswerte zwischen den Messungen mit und ohne Doppelschichtkondensatoren, stellt sich heraus, dass die Batterie kaum an dem regenerativen Bremsprozess beteiligt ist. Obwohl die Batterie allein Bremsleistung über 2kW zurückspeichern musste, werden mit Doppelschichtkondensatoren lediglich Leistungen bis zu 0,3 kW in die Batterie zurückgespeist. Die hohen Bremsleistungen fliessen in die Doppelschichtkondensatoren. Da die Messstrecke so ausgewählt wurde, dass bei ihrem großen Teil einer Beschleunigungsphase unmittelbar eine Bremsphase folgt, sind die Doppelschichtkondensatoren zum Zeitpunkt des Bremsens teilweise entladen. Aus diesem Grund kann in die Doppelschichtkondensatoren mehr Energie zurückfließen. Wenn zwischen der Beschleunigungs- und Bremsphase eine längere Konstantfahrt wäre, würden sich die Doppelschichtkondensatoren in dieser Zeit aufladen und weniger Bremsenergie aufnehmen können.

7.2.5 VARTA Batterien (50 Ah) mit Montena 2600F mit Rückspeisung

Messung:	I	II	III	IV	µu	std.Abw.	Einheit:
Anzahl der Zyklen:	8	8	9	8	8,3	0,500	n
Reichweite:	13,552	13,536	15,217	13,532	13,959	0,839	km
Dauer der Messung:	3.200	3.200	3.600	3.200	3.300	200	s
Traktions-Energie:	920	946	1.008	912	947	44	Wh
Batterie-Energie:	1.035	908	963	859	941	75	Wh
Rückspeisungs-Energie:	73	70	68	68	70	2	Wh
normierte Rückspeisungs-Energie:	7,93%	7,45%	6,71%	7,46%	7,38%	0,50%	%
mittlerer Weg pro Zyklus:	1,694	1,692	1,691	1,692	1,692	0,001	km
mittlere Geschwindigkeit:	15,22	15,23	15,22	15,22	15,223	0,005	km/h
maximale Beschleunigung:	2,119	1,834	1,630	1,834	1,854	0,201	m/s^2
mittlerer Energiebedrarf pro Kilometer:	67,87	69,91	66,27	67,41	67,863	1,522	Wh/km
mittlere Maschinen-Leistung im Motor-Betrieb:	1.035	1.065	1.134	1.026	1.065	49	W
mittlere Maschinen-Leistung im Generator-Betrieb:	-82	-79	-76	-77	-78	3	W
mittlere Batterie-Leistung im Quell-Betrieb:	984	1.022	1.083	967	1.014	51	W
mittlere Batterie-Leistung im Senk-Betrieb:	0	0	0	0	0	0	W
mittlere positive Doppelschicht-Leistung:	315	324	334	303	319	13	W
mittlere negative Doppelschicht-Leistung:	-346	-361	-358	-320	-346	19	W
maximale Maschinen-Leistung im Motor-Betrieb:	6.266	6.155	6.316	6.301	6.259	73	W
maximale Batterie-Leistung im Quell-Betrieb:	5.118	5.221	5.372	5.320	5.258	112	W
maximale positive Doppelschicht-Leistung:	3.622	3.196	3.594	3.347	3.440	204	W
maximale Maschinen-Leistung im Generator-Betrieb:	-3.248	-2.911	-2.838	-3.049	-3.011	180	W
maximale Batterie-Leistung im Senk-Betrieb:	0	0	0	0	0	0	W
maximale negative Doppelschicht-Leistung:	-5.759	-4.998	-5.359	-5.522	-5.409	320	W
mittlerer Doppelschicht-Leistungsfaktor:	30,42%	30,44%	29,42%	29,50%	29,94%	0,56%	%
mittlerer Doppelschicht-Wirkungsgrad:	90,89%	89,88%	93,11%	94,66%	92,14%	2,16%	%
Messbegin:	12:55:28	09:55:44	20:57:36	14:34:25			hh:mm:ss
Datum:	04.12.2003	05.12.2003	05.12.2003	07.12.2003			dd.MM.yyyy

Tabelle 7.6: Messungen mit Rückspeisung und Montena 2600F/2,5V

Die vorherige Messung wurde mit den EPCOS 2700F/2,3V Doppelschichtkondensatoren durchgeführt und diese Messung wurden mit den Montena 2600F/2,5 Doppelschichtkondensatoren durchgeführt. Sonst besteht zwischen den Antriebs-Topologien kein weiterer Unterschied. Obwohl für die Montena Doppelschichtkondensatoren eine nominell geringere Kapazität als die von EPCOS angegeben ist, haben die Montena Doppelschichtkondensatoren einen Einfluss auf die Messergebnisse, die man von einer höheren Kapazität erwarten würde. Das MiniEl erreicht im Durchschnitt 8,25 Zyklen bzw. 14 km. Das ist gegenüber dem Antrieb ohne Doppelschichtkondensatoren eine Reichweitenverbesserung von 80%. Das sind 30% mehr als die EPCOS 2700F/2,3V Doppelschichtkondensatoren. Alle Mittelwerte fallen im wesentlichen mit der vorherigen Messung gleich aus. Außer den Leistungen der Doppelschichtkondensatoren. Die mittlere positive und negative Leistung der Doppelschichtkondensatoren ist über 300W. Dies führt bei den gleichbleibenden übrigen Leistungen zu einer signifikanten Verbesserung des Leistungsfaktors und des Wirkungsgrads. Die Wirkungsgrade aller Messungen mit den Montena 2600F/2,5 Doppelschichtkondensatoren liegen über 90 %.

Obwohl die EPCOS und Montena Doppelschichtkondensatoren vergleichbarer Kapazität sind, liefern sie sehr unterschiedliche Messergebnisse. Die unterschiedlichen Ergebnisse können auf zwei Faktoren zurückgeführt werden. Zwischen der Herstellungszeit der EPCOS und Montena Doppelschichtkondensatoren liegen 3 Jahre. In dieser Zeit wurde die Doppelschichtkondensator Technologie und Produktion weiterentwickelt. Dadurch profitieren natürlich die jüngeren Montena Kondensatoren. Die Montena Doppelschichtkondensatoren besitzen einen niedrigeren Ersatzserienwiderstand, der zu niedrigeren Verlusten führt. Abhängig von der Zeit und der Anzahl der durchlaufenen Auf- und Entladungen nimmt die Doppelschichtkondensatorkapazität bis zu 20% ab und der Ersatzserienwiderstand wächst. [1-3] Da die EPCOS 2700F/2,3V schon länger am Institut in Gebrauch sind, haben sich wahrscheinlich ihre Parameter über die Zeit entsprechend verschlechtert.

7.2.6 VARTA Batterien (50 Ah) mit Montena 1500F mit Rückspeisung

Messung:	I	II	III	IV	µu	std.Abw.	Einheit:
Anzahl der Zyklen:	7	7	8	8	7,5	0,577	n
Reichweite:	11,885	11,833	13,494	13,601	12,703	0,976	km
Dauer der Messung:	2.800	2.800	3.200	3.200	3.000	231	s
Traktions-Energie:	792	831	929	928	870	69	Wh
Batterie-Energie:	773	806	897	899	844	64	Wh
Rückspeisungs-Energie:	50	56	72	65	61	10	Wh
normierte Rückspeisungs-Energie:	6,28%	6,70%	7,78%	7,05%	6,95%	0,63%	%
mittlerer Weg pro Zyklus:	1,698	1,690	1,687	1,700	1,694	0,006	km
mittlere Geschwindigkeit:	15,28	15,21	15,18	15,30	15,245	0,056	km/h
maximale Beschleunigung:	2,160	1,834	1,915	3,219	2,282	0,640	m/s^2
mittlerer Energiebedrarf pro Kilometer:	66,65	70,24	68,88	68,21	68,494	1,494	Wh/km
mittlere Maschinen-Leistung im Motor-Betrieb:	1.018	1.069	932	934	988	67	W
mittlere Maschinen-Leistung im Generator-Betrieb:	-64	-72	-74	-66	-69	4	W
mittlere Batterie-Leistung im Quell-Betrieb:	994	1.036	897	906	958	68	W
mittlere Batterie-Leistung im Senk-Betrieb:	0	-1	-3	-1	-1	1	W
mittlere positive Doppelschicht-Leistung:	193	194	157	167	178	19	W
mittlere negative Doppelschicht-Leistung:	-233	-232	-192	-205	-215	21	W
maximale Maschinen-Leistung im Motor-Betrieb:	6.130	6.199	6.549	6.177	6.264	192	W
maximale Batterie-Leistung im Quell-Betrieb:	5.588	5.883	6.204	5.892	5.892	251	W
maximale positive Doppelschicht-Leistung:	2.756	2.871	2.727	2.812	2.791	64	W
maximale Maschinen-Leistung im Generator-Betrieb:	-3.118	-3.912	-3.051	-3.096	-3.294	413	W
maximale Batterie-Leistung im Senk-Betrieb:	-100	-216	-467	-290	-268	154	W
maximale negative Doppelschicht-Leistung:	-4.176	-6.073	-5.127	-4.265	-4.910	886	W
mittlerer Doppelschicht-Leistungsfaktor:	19,00%	18,14%	16,81%	17,85%	17,95%	0,90%	%
mittlerer Doppelschicht-Wirkungsgrad:	83,17%	83,46%	81,78%	81,48%	82,47%	0,99%	%
Messbegin:	10:43:25	16:29:04	21:18:54	09:30:23			
Datum:	08.12.2003	09.12.2003	10.12.2003	11.12.2003			

Tabelle 7.7: Messungen mit Rückspeisung und Montena 1500F/2,5V

Bei dieser Messung wurden Montena Doppelschichtkondensatoren 1500F/2,5 Volt verwendet. Die Kapazität der Doppelschichtkondensatoren ist um 40% geringer als bei der vorherigen Messung die Reichweitenverbesserung ist aber nur um 10 % gefallen. Die Mittelwerte sind insgesamt vergleichbar zu der Messung mit den EPCOS 2700F/2,3V Doppelschichtkondensatoren. Die Anzahl der Zyklen beträgt 7,5 Zyklen bzw. 12,7 km.

Vergleicht man den prozentualen Anteil der zurückgespeisten Energie der letzten drei Messungen, bemerkt man, dass bei den EPCOS 2700F/2,3V Doppelschichtkondensatoren der höchste Wert vorkommt. Ein Blick auf die Absolutwerte der Energiemengen löst dieses Rätsel. Die Montena Doppelschichtkondensatoren vermögen eine größere Energiemenge aus der Batterie zu entnehmen bei gleich bleibender Rückspeisungsenergie. Dadurch kann man irrtümlich vermuten, dass die EPCOS 2700F/2,3V mehr Energie zurückspeisen als die Montena Doppelschichtkondensatoren.

7.2.7 VARTA Batterien (50 Ah) mit Montena 450F mit Rückspeisung

Messung:	I	II	III	IV	µu	std.Abw.	Einheit:
Anzahl der Zyklen:	7	7	6	7	7	0,500	n
Reichweite:	11,848	11,839	10,979	12,062	11,682	0,480	km
Dauer der Messung:	2.800	2.850	2.400	2.800	2.713	210	s
Traktions-Energie:	803	799	717	799	780	42	Wh
Batterie-Energie:	792	796	713	798	775	41	Wh
Rückspeisungs-Energie:	60	60	59	59	59	0	Wh
normierte Rückspeisungs-Energie:	7,41%	7,47%	8,26%	7,39%	7,63%	0,42%	%
mittlerer Weg pro Zyklus:	1,693	1,691	1,830	1,723	1,734	0,065	km
mittlere Geschwindigkeit:	15,19	14,93	16,45	15,51	15,521	0,665	km/h
maximale Beschleunigung:	1,630	1,915	*	*	1,773	0,202	m/s^2
mittlerer Energiebedrarf pro Kilometer:	67,80	67,53	65,31	66,22	66,714	1,161	Wh/km
mittlere Maschinen-Leistung im Motor-Betrieb:	1.033	1.010	1.076	1.027	1.036	28	W
mittlere Maschinen-Leistung im Generator-Betrieb:	-77	-75	-89	-76	-79	6	W
mittlere Batterie-Leistung im Quell-Betrieb:	1.019	1.005	1.069	1.025	1.030	27	W
mittlere Batterie-Leistung im Senk-Betrieb:	-34	-30	-40	-33	-34	4	W
mittlere positive Doppelschicht-Leistung:	89	105	98	90	96	7	W
mittlere negative Doppelschicht-Leistung:	-117	-146	-140	-132	-134	12	W
maximale Maschinen-Leistung im Motor-Betrieb:	6.441	6.259	6.431	6.409	6.385	85	W
maximale Batterie-Leistung im Quell-Betrieb:	6.638	6.452	6.610	6.622	6.580	86	W
maximale positive Doppelschicht-Leistung:	1.946	1.901	2.044	2.093	1.996	88	W
maximale Maschinen-Leistung im Generator-Betrieb:	-3.262	-3.320	-2.999	-2.945	-3.131	187	W
maximale Batterie-Leistung im Senk-Betrieb:	-1.413	-1.420	-1.283	-1.372	-1.372	63	W
maximale negative Doppelschicht-Leistung:	-4.645	-4.771	-3.749	-3.667	-4.208	581	W
mittlerer Doppelschicht-Leistungsfaktor:	8,61%	10,37%	9,13%	8,80%	9,23%	0,79%	%
mittlerer Doppelschicht-Wirkungsgrad:	75,72%	71,72%	70,06%	68,44%	71,49%	3,13%	%
Messbegin:	20:31:34	16:02:35	14:24:35	10:13:04			
Datum:	11.12.2003	12.12.2003	16.12.2003	18.12.2003			

Tabelle 7.8: Messungen mit Rückspeisung und Montena 450F/2,5V

Die Montena Doppelschichtkondensatoren mit 450 Farad sind die kleinsten, die für diese Messungen zur Verfügung stehen. Bei dieser Messreihe werden durchschnittlich 7 Zyklen durchlaufen. Gegenüber der Antriebs-Topologie ohne Doppelschichtkondensatoren wird eine Reichweitenverbesserung von 50% erreicht die auf eine 46,5-%-Verbesserung der Energieentnahme aus den Batterien und eine 59,4-%-Vergrößerung der Rückspeisungsenergie beruht. Im Vergleich zu den Messungen mit Doppelschichtkondensatoren höherer Kapazität fällt die Reichweitenverbesserung geringer aus. Insgesamt liegen die Werte dieser Messreihe zwischen den Werten der Messreihe ohne Doppelschichtkondensatoren und der Messreihe mit den 1500-Farad-Doppelschichtkondensatoren.
Die kleinere Kapazität der Doppelschichtkondensatoren wirkt sich auf den regenerativen Bremsvorgang aus. Die Batterie ist mit einer durchschnittlichen Leistung von über 30W an der Rückspeisung beteiligt. Bei den Messungen mit Doppelschichtkondensatoren höherer Kapazität ist dieser Wert fast Null. Die Menge der zurückgespeisten Energie unterscheidet sich trotzdem nicht bedeutend von den Messungen mit Kondensatoren höherer Kapazität. Die Beteiligung an der Rückspeisung wirkt sich stärker auf die Batterie-Energie als auf die Rückspeisungs-Energie aus.

7.2.8 VARTA Batterien (50 Ah) mit Montena 4100F mit Rückspeisung

Messung:	I	Einheit:
Anzahl der Zyklen:	9	n
Reichweite:	15,4	km
Dauer der Messung:	3.600	s
Traktions-Energie:	1.026	Wh
Batterie-Energie:	1.007	Wh
Rückspeisungs-Energie:	55	Wh
normierte Rückspeisungs-Energie:	5,40%	%
mittlerer Weg pro Zyklus:	1,711	km
mittlere Geschwindigkeit:	15,55	km/h
maximale Beschleunigung:	2,445	m/s^2
mittlerer Energiebedrarf pro Kilometer:	66,65	Wh/km
mittlere Maschinen-Leistung im Motor-Betrieb:	1.026	W
mittlere Maschinen-Leistung im Generator-Betrieb:	-55	W
mittlere Batterie-Leistung im Quell-Betrieb:	1.007	W
mittlere Batterie-Leistung im Senk-Betrieb:	0	W
mittlere positive Doppelschicht-Leistung:	339	W
mittlere negative Doppelschicht-Leistung:	-375	W
maximale Maschinen-Leistung im Motor-Betrieb:	5.822	W
maximale Batterie-Leistung im Quell-Betrieb:	4.406	W
maximale positive Doppelschicht-Leistung:	3.373	W
maximale Maschinen-Leistung im Generator-Betrieb:	-2.540	W
maximale Batterie-Leistung im Senk-Betrieb:	27	W
maximale negative Doppelschicht-Leistung:	-5.204	W
mittlerer Doppelschicht-Leistungsfaktor:	33,01%	%
mittlerer Doppelschicht-Wirkungsgrad:	90,29%	%
Messbegin:	17:27:45	hh:mm:ss
Datum:	17.02.2004	dd.MM.yyyy

Tabelle 7.9 Messungen mit Rückspeisung und Montena 2600+1500F/2,5V

Um den Einfluss der Kapazitäten zu untersuchen, stehen drei Doppelschichtkondensatorgrößen zur Verfügung: 450, 1500 und 2600 Farad. Um einen weiteren Vergleichswert zu gewinnen, wurde eine Messung mit sechs Doppelschichtkondensator-Modulen durchgeführt. Es wurden drei 1500-Farad-Module parallel mit drei 2600-Farad-Modulen zusammengeschaltet. Die sich daraus ergebende äquivalente Kapazität eines Doppelschichtkondensators ist die Summe der Teilkapazitäten, also 4100 Farad. Abgesehen von der Kapazität halbiert sich durch die Parallelschaltung der Ersatzserienwiderstand.

Bei dieser Messreihe werden 9 Zyklen durchlaufen. Gegenüber der Messreihe ohne Doppelschichtkondensatoren hat sich die Reichweite verdoppelt. Die hohe Kapazität der Doppelschichtkondensatoren verbessert nicht die Rückspeisungs-Energie dafür aber die Energieentnahme aus der Batterie. Die Doppelschichtkondensatoren beteiligen sich bei dem positiven Energiefluss im Antrieb zu 33% und die Rückspeisungsenergie nehmen sie vollständig ohne Hilfe der Batterien auf. Der Wirkungsgrad der Doppelschichtkondensatoren ist auf 90% angestiegen. Der Einfluss der Doppelschichtkondensatoren insgesamt ist erwartungsgemäß höher als bei allen anderen Messreihen.

Da der Zeitraum für diese Arbeit knapp bemessen ist, wurde die Messung nur einmal durchgeführt. Da sich bei den vorherigen Messungen bei gleichen Messreihen fast identische Werte ergeben haben, ist es zu erwarten, dass bei weiteren Wiederholungen der Messung sich sehr ähnliche Werte ergeben. Anstelle dieser Wiederholungen wurden Messungen mit leistungsstärkeren Batterien durchgeführt, die in den folgenden Kapiteln erläutert werden.

7.2.9 OPTIMA Batterien (60 Ah) mit Montena und Rückspeisung

Messung:	I	II	µu	Std.Abw.	Einheit:
Anzahl der Zycklen:	11	11	11,00	0,000	-
Reichweite:	18,634	*	18,634	*	km
Dauer der Messung:	4400	4400	4400	0	s
Traktions-/Batterie-Energie:	1177	1078	1127	70	Wh
Rüchspeisungs-Energie:	119	114	117	3	Wh
normierte Rüchspeisungs-Energie:	10,11%	10,60%	10,36%	0,35%	%
mittlerer Weg pro Zycklus:	1,694	*	1,694	*	km
mittlere Geschwindigkeit:	15,25	*	15,254	*	km/h
maximale Beschleunigung	1,834	*	1,834	*	m/s^2
mittlerer Energiebedrarf pro Kilometer:	63,14	*	63,142	*	Wh/km
mittlere Batterie-Leistung im Quell-Betrieb:	1.041	893	967	104	W
mittlere Batterie-Leistung im Senk-Betrieb:	-100	-88	-94	8	W
maximale Batterie-Leistung im Quell-Betrieb:	6.535	6.435	6.485	71	W
maximale Batterie-Leistung im Senk-Betrieb:	-3.415	-3.231	-3.323	130	W
Messbegin:	13:29:39	16:21:00			hh:mm:ss
Datum:	18.01.2004	06.02.2004			dd.MM.yyyy

Tabelle 7.10 Messungen mit OPTIMA Batterien und Rückspeisung

Die Messreihen mit den VARTA Batterien und den unterschiedlichen Kapazitäten der Doppelschichtkondensatoren haben eindrucksvoll den Einfluss auf das elektrische Traktionssystem demonstriert. Um wie bei den Messreihen des Messstands die Abhängigkeit der maximalen Leistungsabgabe der verwendeten Batterien zu untersuchen wurden drei Messreihen mit OPTIMA Batterien wiederholt. Die Batterien von OPTIMA sind speziell für Traktionsapplikationen optimiert und besitzen daher einen höhere Leistungsdichte bei einer 10 Ah höheren Kapazität. Um eine Vergleichsbasis zu schaffen, wurden die OPTIMA Batterien als erstes ohne Doppelschichtkondensatoren vermessen. Die Messung wurde zwei Mal wiederholt. Bei einer der Messungen war die Drehzahlerfassung defekt, so das die Messwerte, die von der Drehzahl abhängen, ungültig sind.

Bei dieser Messreihe schaffen die OPTIMA Batterien allein schon 11 Zyklen zu durchlaufen. Die Reichweite beträgt 18,634 km. Im Vergleich zu den VARTA Batterien erreichen sie eine um 140% größere Reichweite. Der Spannungsverlauf der OPTIMA Batterien (Abbildung 7.25) zeigt, dass die Spannungseinbrüche im Vergleich zu den VARTA Batterien (Abbildung 7.17) sehr viel kleiner sind. Dadurch ist zu erwarten, dass die Doppelschichtkondensatoren zu keinen signifikaten Reichweitenverbesserung beitragen werden. Die Spannungsspitzen am Anfang der Messung werden durch die Bremsströme verursacht.

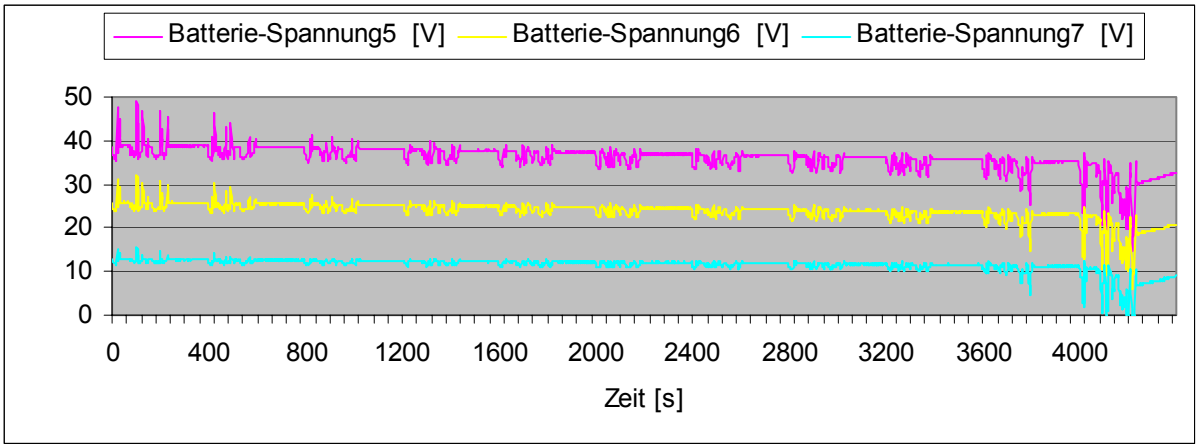


Abbildung 7.13: Spannungsverlauf OPTIMA Batterien (60 A) mit Montena 4100F und Rückspeisung

7.2.10 OPTIMA Batterien (60 Ah) mit Montena mit Montena 450F mit Rückspeisung

Messung:	I	Einheit:
Anzahl der Zyklen:	11	n
Reichweite:	18,624	km
Dauer der Messung:	4.400	s
Traktions-Energie:	1.263	Wh
Batterie-Energie:	1.326	Wh
Rückspeisungs-Energie:	91	Wh
normierte Rückspeisungs-Energie:	7,17%	%
mittlerer Weg pro Zyklus:	1,693	km
mittlere Geschwindigkeit:	15,24	km/h
maximale Beschleunigung:	1,834	m/s^2
mittlerer Energiebedrarf pro Kilometer:	67,81	Wh/km
mittlere Maschinen-Leistung im Motor-Betrieb:	1.033	W
mittlere Maschinen-Leistung im Generator-Betrieb:	-74	W
mittlere Batterie-Leistung im Quell-Betrieb:	1.085	W
mittlere Batterie-Leistung im Senk-Betrieb:	-50	W
mittlere positive Doppelschicht-Leistung:	27	W
mittlere negative Doppelschicht-Leistung:	-103	W
maximale Maschinen-Leistung im Motor-Betrieb:	6.232	W
maximale Batterie-Leistung im Quell-Betrieb:	6.511	W
maximale positive Doppelschicht-Leistung:	1.893	W
maximale Maschinen-Leistung im Generator-Betrieb:	-2.414	W
maximale Batterie-Leistung im Senk-Betrieb:	-1.560	W
maximale negative Doppelschicht-Leistung:	-2.126	W
mittlerer Doppelschicht-Leistungsfaktor:	2,64%	%
mittlerer Doppelschicht-Wirkungsgrad:	26,44%	%
Messbegin:	14:25:00	hh:mm:ss
Datum:	09.02.2004	dd.MM.yyyy

Tabelle 7.11: Messung mit OPTIMA Batterien, Rückspeisung und Montena 450F/2,5V

Die OPTIMA Batterien unterstützt durch die 450F/2,5V Montena Doppelschichtkondensatoren erreichten die gleiche Reichweite wie bei der Messung ohne Doppelschichtkondensatoren. Die Integration der Doppelschichtkondensatoren scheint auf ersten Blick in dieser Konstellation keinen Vorteil zu bringen. Der Leistungsfaktor der Doppelschichtkondensatoren beträgt lediglich 2,64 %. Die kleineren Doppelschichtkondensatoren verbessern die Energieentnahme aus den VARTA Batterien um 46,5% gegenüber der Antriebs-Topologie ohne Doppelschichtkondensatoren. Die gleichen Doppelschichtkondensatoren verbessern die Energieentnahme aus den OPTIMA Batterien um 17,6%. Da bei der vorherigen Messung ohne Doppelschichtkondensatoren der mittlere Energiebedarf pro Kilometer bei 63,14 Wh lag und bei der aktuellen Messung der Wert bei 67.81 Wh liegt, reicht die höhere Energieentnahme nicht aus um einen weiteren Zyklus zu fahren. Die Doppelschichtkondensatoren haben trotz der höheren maximalen Leistung der Batterien einen positiven Einfluss auf die Energieentnahme der Batterien, der aber wegen der unterschiedlichen Fahrweisen und der Abbruchbedingung (Festlegung auf ganze Zyklen) nicht in eine Reichweitenverbesserung umgesetzt werden konnte. Die Rückspeisungs-Energie fällt bei den OPTIMA Batterien mit Doppelschichtkondensatoren erstaunlicher Weise geringer aus als bei der Messung ohne Doppelschichtkondensatoren. Dieses Ergebnis ist auf die unterschiedliche Fahrweise zurückzuführen und kann nur durch weitere Messungen geklärt werden.

7.2.11 OPTIMA Batterien (60 Ah) mit Montena mit Montena 2600F mit Rückspeisung

Messung:	I	Einheit:
Anzahl der Zyklen:	12	n
Reichweite:	20,639	km
Dauer der Messung:	4.800	s
Traktions-Energie:	1.289	Wh
Batterie-Energie:	1.284	Wh
Rückspeisungs-Energie:	97	Wh
normierte Rückspeisungs-Energie:	7,55%	%
mittlerer Weg pro Zyklus:	1,720	km
mittlere Geschwindigkeit:	15,32	km/h
maximale Beschleunigung:	2,201	m/s^2
mittlerer Energiebedrarf pro Kilometer:	62,43	Wh/km
mittlere Maschinen-Leistung im Motor-Betrieb:	966	W
mittlere Maschinen-Leistung im Generator-Betrieb:	-73	W
mittlere Batterie-Leistung im Quell-Betrieb:	963	W
mittlere Batterie-Leistung im Senk-Betrieb:	-2	W
mittlere positive Doppelschicht-Leistung:	172	W
mittlere negative Doppelschicht-Leistung:	-239	W
maximale Maschinen-Leistung im Motor-Betrieb:	6.198	W
maximale Batterie-Leistung im Quell-Betrieb:	6.206	W
maximale positive Doppelschicht-Leistung:	2.687	W
maximale Maschinen-Leistung im Generator-Betrieb:	-2.743	W
maximale Batterie-Leistung im Senk-Betrieb:	-282	W
maximale negative Doppelschicht-Leistung:	-4.067	W
mittlerer Doppelschicht-Leistungsfaktor:	17,76%	%
mittlerer Doppelschicht-Wirkungsgrad:	71,94%	%
Messbegin:	14:39:00	hh:mm:ss
Datum:	11.02.2004	dd.MM.yyyy

Tabelle 7.12 Messung mit OPTIMA Batterien, Rückspeisung und Montena 2600F/2,5V

Die letzte Messung wurde mit den OPTIMA Batterien und den 2600F/2,5V Montena Doppelschichtkondensatoren durchgeführt. Das Fahrzeug erreichte in 12 Zyklen eine Reichweite von 20,639 km. Die Reichweitenverbesserung ist demnach gerade 10% gegenüber der Messung ohne Doppelschichtkondensatoren gestiegen, was auf die 13,4 % höhere Energieentnahme aus den Batterien zurückzuführen ist. Der Doppelschicht-Leistungsfaktor beträt 17.76%, also deutlich größer als bei der Messung mit den 450-Farad-Doppelschichtkondensatoren. Wegen der höheren maximalen Leistung der OPTIMA-Batterien sind die Vorteile der Doppelschichtkondensatoren nicht so deutlich wie bei den VARTA-Batterien. Dennoch kann man eine Reichweitenverbesserung abhängig von der Doppelschichtkondensator-Kapazität erkennen.

7.3 MiniEl Zusammenfassung

Vergleicht man die Ergebnisse der Messreihen, ergeben sich einige Schlussfolgerungen. Es Vorsicht geboten, da sich nicht alle Messreihen miteinander vergleichen lassen. Mit dem Messtand wurde gezeigt, dass die Verbesserung durch die Doppelschichtkondensatoren von der maximalen Leistung der Batterien abhängt. Um dies zu verdeutlichen, werden im nächsten Kapitel (7.3.1) die relevanten Messungen miteinander verglichen. Im Kapitel 7.3.2 wird dargestellt, welchen Einfluss Doppelschichtkondensatoren auf den regenerativen Bremsvorgang haben. Im Kapitel 7.3.3 werden die Messungen mit unterschiedlichen Kapazitäten miteinander verglichen. Dieses Kapitel wird also nach den Punkten der Aufgabenstellung gegliedert.

7.3.1 Leistungsdichte unterschiedlicher Batterietypen

Unterschiedliche Batterietypen haben eine unterschiedliche Leistungsdichte. Bei annähernd gleicher Masse können sie dementsprechend eine unterschiedliche maximale Leistung abgeben. Wird die maximale Leistungsgrenze während des Betriebs erreicht, fängt die Spannung an einzubrechen. Da der Doppelschichtkondensatoren-Leistungsfaktor von der Intensität der Spannungseinbrüche abhängt, hängt er auch von der Leistungsdichte der Batterie ab. Von dem Leistungsfaktor hängt die Reichweiten verlängernde Wirkung ab. Also hängt die Reichweiten verlängernde Wirkung auch von der Leistungsdichte der Batterie ab. Desto niedriger die Leistungsdichte der Batterie ist, desto höher ist die Reichweitenverlängerung durch die Doppelschichtkondensatoren. Diese Aussage gilt selbstverständlich nur bei einem sonst unveränderten Antriebsstrang und dem gleichen Lastprofil. Um die Aussage zu untermauern, werden 6 Messreihen miteinander verglichen. Messreihen mit den VARTA Batterien werden mit den Messreihen mit den OPTIMA-Batterien verglichen. Jeweils einmal ohne, mit den 450F und den 2600F Doppelschichtkondensatoren.

Mittelwerte der Messreichen:	VARTA-4QD	VARTA-4QD+BC-450	VARTA-4QD+BC-2600	OPTIMA-4QD	OPTIMA-4QD+BC-450	OPTIMA-4QD+BC-2600	Einheit:
Anzahl der Zyklen:	4,6	6,75	8,25	11	11	12	n
Reichweite:	7,779	11,682	13,959	18,634	18,624	20,639	km
Dauer der Messung:	1.840	2.713	3.300	4.400	4.400	4.800	s
Traktions-Energie:	529	780	947	1.127	1.263	1.289	Wh
Batterie-Energie:	529	775	901	1.127	1.326	1.284	Wh
Rückspeisungs-Energie:	37	59	70	117	91	97	Wh
normierte Rückspeisungs-Energie:	6,85%	7,63%	7,38%	10,36%	7,17%	7,55%	%
mittlerer Weg pro Zyklus:	1,692	1,734	1,692	1,694	1,693	1,720	km
mittlere Geschwindigkeit:	15,28	15,52	15,22	15,25	15,24	15,32	km/h
maximale Beschleunigung:	2,209	1,773	1,854	1,834	1,834	2,201	m/s^2
mittlerer Energiebedrarf pro Kilometer:	68,43	66,71	67,86	63,14	67,81	62,43	Wh/km
mittlere Maschinen-Leistung im Motor-Betrieb:	1.007	1.036	1.065	967	1.033	966	W
mittlere Maschinen-Leistung im Generator-Betrieb:	76	79	78	94	74	73	W
mittlere Batterie-Leistung im Quell-Betrieb:	1.007	1.030	1.014	967	1.085	963	W
mittlere Batterie-Leistung im Senk-Betrieb:	76	34	0	94	50	2	W
mittlere positive Doppelschicht-Leistung:		96	319		27	172	W
mittlere negative Doppelschicht-Leistung:		134	346		103	239	W
maximale Maschinen-Leistung im Motor-Betrieb:	6.651	6.385	6.259	6.485	6.232	6.198	W
maximale Batterie-Leistung im Quell-Betrieb:	6.651	6.580	5.258	3.323	6.511	6.206	W
maximale positive Doppelschicht-Leistung:		1.996	3.440	6.485	1.893	2.687	W
maximale Maschinen-Leistung im Generator-Betrieb:	2.636	3.131	3.011	3.323	2.414	2.743	W
maximale Batterie-Leistung im Senk-Betrieb:	2.636	1.372	0		1.560	282	W
maximale negative Doppelschicht-Leistung:		4.208	5.409		2.126	4.067	W
mittlerer Doppelschicht-Leistungsfaktor:		9,23%	29,94%		2,64%	17,76%	%
mittlerer Doppelschicht-Wirkungsgrad:		71,49%	92,14%		26,44%	71,94%	%
Reichweitenverbesserung:	100,00%	150,17%	179,45%	100,00%	99,95%	110,76%	%

Tabelle 7.13: Messungs-Vergleich mit unterschiedlichen Batterien

Betrachtet man die Anzahl der Zyklen, kann man aus der Tabelle 7.13 entnehmen, dass mit den VARTA-Batterien von Messreihe zu Messreihe das Fahrzeug fast 2 Zyklen länger fahren kann. In Gegen-

satz dazu wird mit den OPTIMA-Batterien erst ein zusätzlicher Zyklus erreicht, wenn sie durch die größeren 2600F Doppelschichtkondensatoren unterstützt werden. In den Abbildungen 7.14 sind die Reichweiten der Messreihen dargestellt. Die OPTIMA-Batterien sind nicht so alt sind wie die VARTA-Batterien und haben eine höhere Kapazität. Aus diesem Grund erreichen sie längere Reichweiten als die VARTA-Batterien.

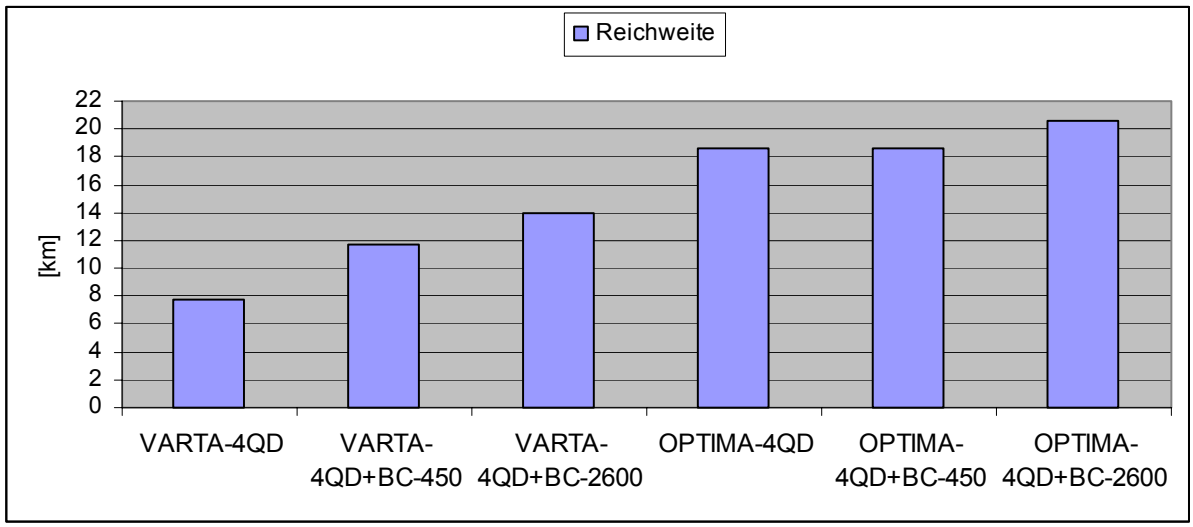


Abbildung 7.14: Reichweiten-Vergleich mit unterschiedlichen Batterien

Normiert man die Reichweiten der Messungen in Bezug auf die jeweilige Messung ohne Doppelschichtkondensatoren, ergibt sich das Diagramm in Abbildung 7.15. Die Normierung ist notwendig, da sie den Einfluss der Doppelschichtkondensatoren auf die unterschiedlichen Batterietypen verdeutlicht. Die Messungen ohne Doppelschichtkondensatoren ergibt, geteilt durch sich selbst, eine Reichweitenverbesserung von 100%. Die VARTA-Batterie unterstützt durch die 450F-Doppelschichtkondensatoren, erweitern die Reichweite um 150%. Unterstützt durch die 2600F-Doppelschichtkondensatoren erreichen sie bereits 180%. Bei den OPTIMA-Batterien treten dagegen nur bescheidene Verbesserungen auf. Die 450F-Doppelschichtkondensatoren scheinen keinen Einfluss auf die Reichweite zu haben und die 2600-Farad-Doppelschichtkondensatoren erreichen gerade eine Reichweite von 110%.

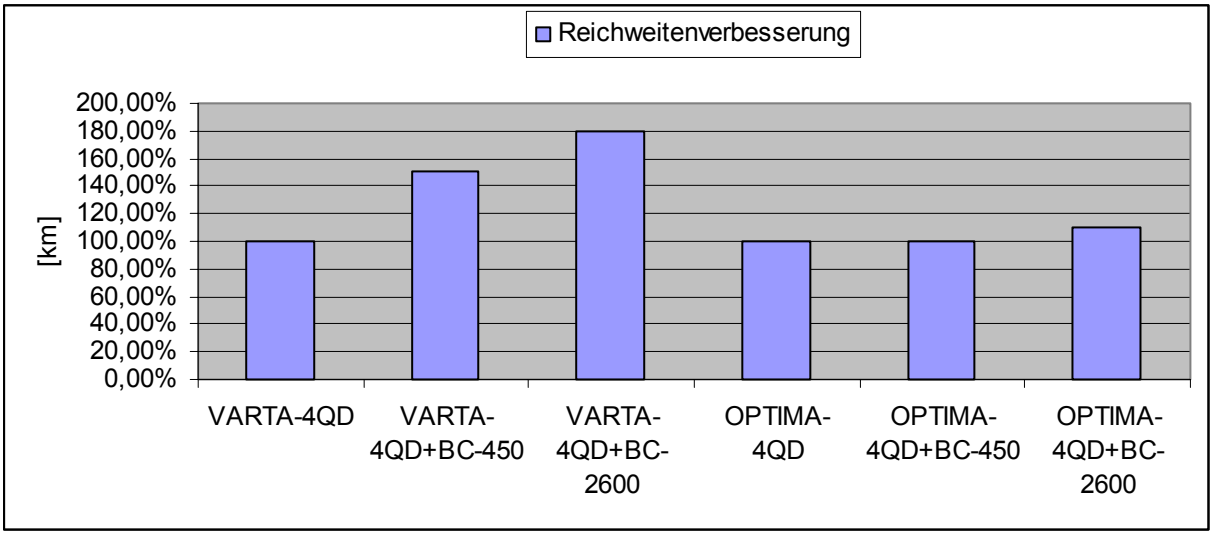


Abbildung 7.15: Reichweitenverbesserung mit unterschiedlichen Batterien

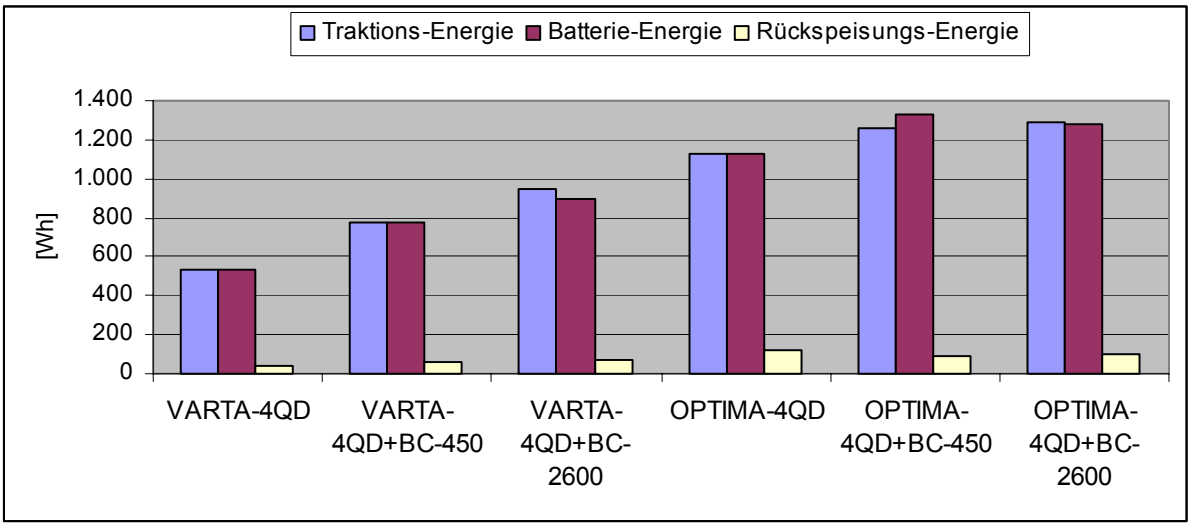


Abbildung 7.16: Energie-Vergleich mit unterschiedlichen Batterien

Betrachtet man die Energiemengen, die insgesamt während einer Messung akkumuliert wurden, ergibt sich ein leicht differenziertes Bild. Mit den VARTA-Batterien wachsen die Batterie- und die Rückspeisungsenergie fast proportional zu der Kapazität der Doppelschichtkondensatoren. Bei den OPTIMA-Batterien hat die Energieentnahme aus der Batterie nur wenig zugenommen. Diese Zunahme ereignet sich jedoch schon mit den 450F-Kondensatoren. Zwischen den 450F- und den 2600- Farad-Doppelschichtkondensatoren ist der Unterschied vernachlässigbar. Die Reichweite hängt stärker von der Fahrweise ab als die Energiemengen. Daher ist anzunehmen das die geringe Reichweitenverbesserung schon mit den 450-F-Kondensatoren möglich wäre.
Die Messreihen zeigen, dass bei den VARTA-Batterien der positive Einfluss der Doppelschichtkondensatoren stärker ausfällt als bei den OPTIMA-Batterien. Betrachtet man die Leistungsfaktoren und die Wirkungsgrade der Doppelschichtkondensatoren, erkennt man, dass sie mit den OPTIMA-Batterien niedriger sind. Die Doppelschichtkondensatoren beteiligen sich also weniger an der Leistungsbereitstellung im Antrieb als mit den VARTA-Batterien. Die einzige Erklärung ist es, dass die Batterien, die Doppelschichtkondensatoren erst in Anspruch nimmt, wenn ihre Leistungsgrenze erreicht ist.

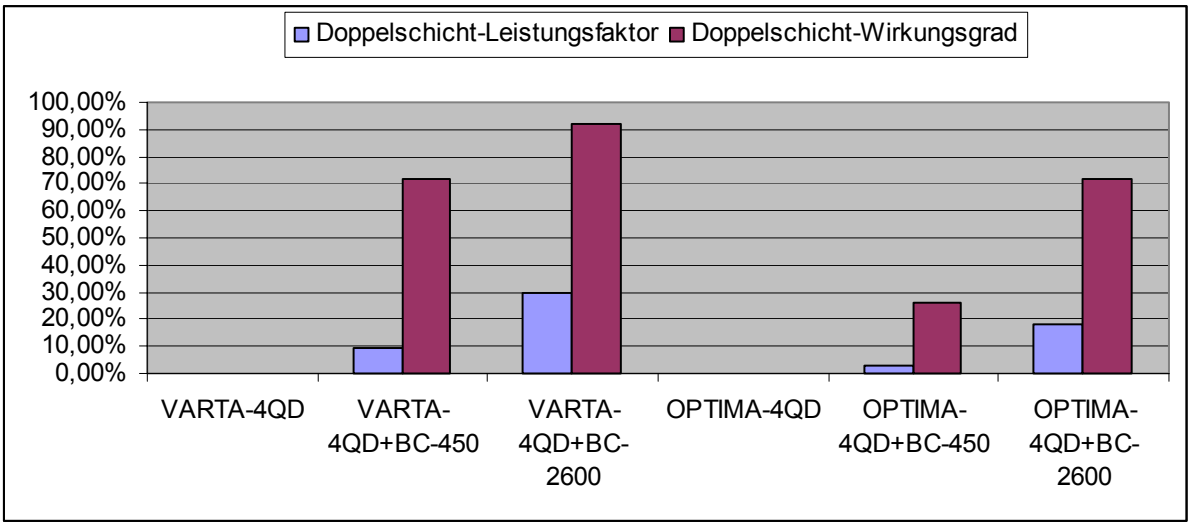


Abbildung 7.17:Leistungsfaktor und Wirkungsgrad mit unterschiedlichen Batterien

7.3.2 Rückspeisung

Antriebssysteme die keine Rückspeisungsmöglichkeit haben und durch Doppelschichtkondensatoren unterstützt werden, profitieren von der höheren Energieentnahme aus den Akkumulatoren. Antriebssysteme die generatorisch Bremsen können, erhöhen durch den Einsatz von Doppelschichtkondensatoren auch ihre Rückspeisungs-Energie.

Mittelwerte der Messreichen:	Curtis	Curtis+SC	4QD	4QD+SC	Einheit:
Anzahl der Zyklen:	4	5,75	4,6	7	n
Reichweite:	6,740	9,585	7,779	11,879	km
Dauer der Messung:	1.600	2.325	1.840	2.800	s
Traktions-Energie:	396	662	529	797	Wh
Batterie-Energie:	396	690	529	779	Wh
Rückspeisungs-Energie:			37	68	Wh
normierte Rückspeisungs-Energie:			6,85%	8,49%	%
mittlerer Weg pro Zyklus:	1,69	1,668	1,692	1,697	km
mittlere Geschwindigkeit:	15,46	15,29	15,28	15,28	km/h
maximale Beschleunigung:	1,535	1,548	2,209	2,017	m/s^2
mittlerer Energiebedrarf pro Kilometer:	59,50	69,18	68,43	67,08	Wh/km
mittlere Maschinen-Leistung im Motor-Betrieb:	917	1.060	1.007	1.024	W
mittlere Maschinen-Leistung im Generator-Betrieb:			76	87	W
mittlere Batterie-Leistung im Quell-Betrieb:	917	1.106	1.007	1.002	W
mittlere Batterie-Leistung im Senk-Betrieb:			76	1	W
mittlere positive Doppelschicht-Leistung:		296		221	W
mittlere negative Doppelschicht-Leistung:		340		285	W
maximale Maschinen-Leistung im Motor-Betrieb:	5.746	6.065	6.651	6.158	W
maximale Batterie-Leistung im Quell-Betrieb:	5.746	4.539	6.651	5.354	W
maximale positive Doppelschicht-Leistung:		2.592		2.815	W
maximale Maschinen-Leistung im Generator-Betrieb:			2.636	2.976	W
maximale Batterie-Leistung im Senk-Betrieb:			2.636	258	W
maximale negative Doppelschicht-Leistung:		2.233		3.907	W
mittlerer Doppelschicht-Leistungsfaktor:		28,91%		21,56%	%
mittlerer Doppelschicht-Wirkungsgrad:		87,24%		77,59%	%

Tabelle 7.14: Rückspeisungs-Vergleich-Übersicht

Um diese Aussage zu untermauern, werden 4 Messungen miteinander verglichen. Messungen mit dem Curtis-Steller der nicht regenerativ Bremsen kann und dem 4QD-Steller die Möglichkeit besitzt. Die Rückspeisungs-Energie ist geringer als die Energie, die für einen ganzen Zyklus notwendig wäre. Daher werden keine Reichweiten verglichen sondern direkt die gemessenen Energien. Diese sind in einem Balkendiagramm in Abbildung 7.18 dargestellt. Bei den Messungen mit dem Curtis-Steller erkennt man, dass sich die Energieentnahme aus der Batterie um 67,1 % erhöht. Bei den Messungen mit dem 4QD-Steller ohne Doppelschichtkondensatoren beträgt die Rückspeisungsenergie 37 Wh bzw. 6,85% der Traktionsenergie. Die Rückspeisungsenergie eines Elektrofahrzeugs ist typischerweise so niedrig. Höhere Rückspeisungsenergien erreicht man nur im bergigen Gelände. Bei den Messungen mit dem 4QD-Steller erhöht sich die Energieentnahme aus der Batterie um 47%. Zusätzlich erhöht sich auch die Rückspeisungsenergie um 83% (Abbildung 7.19). Die Vergrößerung der Rückspeisungs-Energie machen im Endeffekt nur 1,64 % mehr Traktionsenergie aus, beweisen aber, dass die Rückspeisungsenergie durch den Einsatz der Doppelschichtkondensatoren vergrößert wurde. Gelingt es den Anteil der Rückspeisungsenergie zu erhöhen, dann wird die Reichweiten verlängernde Wirkung der Doppelschichtkondensatoren noch deutlicher ausfallen.

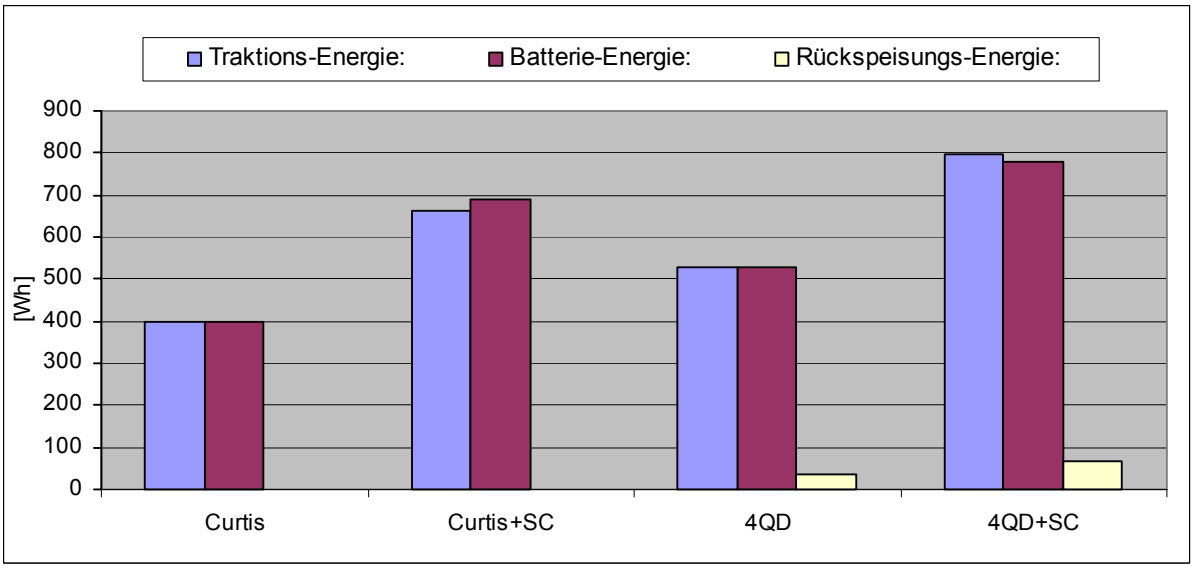


Abbildung 7.18: Rückspeisungs-Energien-Vergleich

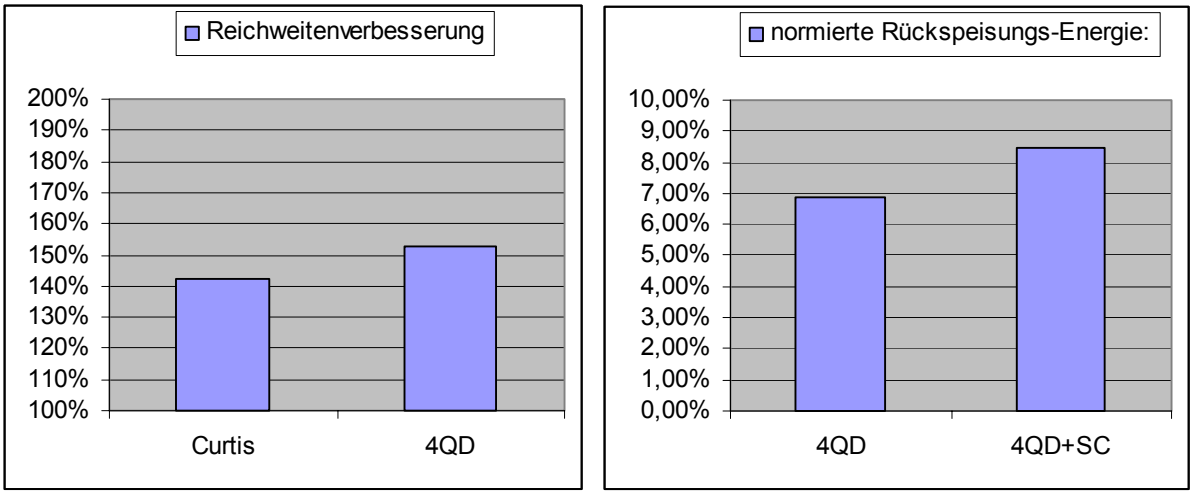


Abbildung 7.19: Reichweitenverbesserung und normierte Rückspeisungs-Energien

7.3.3 Kapazität

Um den Einfluss der Kapazität zu untersuchen, werden Messreihen mit unterschiedlichen Kapazitäten durchgeführt. Der Vergleich kann aber nur mit Kapazitäten des gleichen Herstellers durchgeführt werden, da sich sonst auch andere Parameter der Doppelschichtkondensatoren ändern. Zum Beispiel haben die EPCOS-Doppelschichtkondensatoren eine höhere Kapazitätsangabe, dafür aber einen größeren Ersatzserienwiderstand. Trotzdem werden die Messwerte der EPCOS-Doppelschichtkondensatoren als Referenz angegeben.

Es werden insgesamt vier unterschiedliche Kapazitäten der Montena-Doppelschichtkondensatoren betrachtet: 450, 1500, 2600 und 4100 Farad. Aus der Übersichtstabelle 7.15 und dem Balkendiagramm der Reichweiten 7.21 kann man entnehmen, dass die Reichweite desto größer ist je größer die Kapazität der verwendeten Doppelschichtkondensatoren ist. Die Veränderung der Reichweite zwischen der Messung ohne Doppelschichtkondensatoren und den 450F-Doppelschichtkondensatoren ist besonders hoch.

Mittelwerte der Messreichen:	4QD	4QD+BC-450	4QD+BC-1500	4QD+BC-2600	4QD+BC-4100	4QD+SC-2700	Einheit:
Anzahl der Zyklen:	4,6	7	7,5	8,25	9	7	n
Reichweite:	7,779	11,682	12,703	13,959	15,400	11,879	km
Dauer der Messung:	1.840	2.713	3.000	3.300	3.600	2.800	s
Traktions-Energie:	529	780	870	947	1.026	797	Wh
Batterie-Energie:	529	775	844	901	1.007	779	Wh
Rückspeisungs-Energie:	37	59	61	70	55	68	Wh
normierte Rückspeisungs-Energie:	6,85%	7,63%	6,95%	7,38%	5,40%	8,49%	%
mittlerer Weg pro Zyklus:	1,692	1,734	1,694	1,692	1,711	1,697	km
mittlere Geschwindigkeit:	15,28	15,521	15,24	15,22	15,55	15,28	km/h
maximale Beschleunigung:	2,209	1,773	2,282	1,854	2,445	2,017	m/s^2
mittlerer Energiebedrarf pro Kilometer:	68,43	66,714	68,49	67,86	66,65	67,08	Wh/km
mittlere Maschinen-Leistung im Motor-Betrieb:	1.007	1.036	988	1.065	1.026	1.024	W
mittlere Maschinen-Leistung im Generator-Betrieb:	76	79	69	78	55	87	W
mittlere Batterie-Leistung im Quell-Betrieb:	1.007	1.030	958	1.014	1.007	1.002	W
mittlere Batterie-Leistung im Senk-Betrieb:	76	34	1	0	0	1	W
mittlere positive Doppelschicht-Leistung:		96	178	319	339	221	W
mittlere negative Doppelschicht-Leistung:		134	215	346	375	285	W
maximale Maschinen-Leistung im Motor-Betrieb:	6.651	6.385	6.264	6.259	5.822	6.158	W
maximale Batterie-Leistung im Quell-Betrieb:	6.651	6.580	5.892	5.258	4.406	5.354	W
maximale positive Doppelschicht-Leistung:		1.996	2.791	3.440	3.373	2.815	W
maximale Maschinen-Leistung im Generator-Betrieb:	2.636	3.131	3.294	3.011	2.540	2.976	W
maximale Batterie-Leistung im Senk-Betrieb:	2.636	1.372	268	0	27	258	W
maximale negative Doppelschicht-Leistung:		4.208	4.910	5.409	5.204	3.907	W
mittlerer Doppelschicht-Leistungsfaktor:		9,23%	17,95%	29,94%	33,01%	21,56%	%
mittlerer Doppelschicht-Wirkungsgrad:		71,49%	82,47%	92,14%	90,29%	77,59%	%

Tabelle 7.15: Kapazitäten-Vergleich-Übersicht

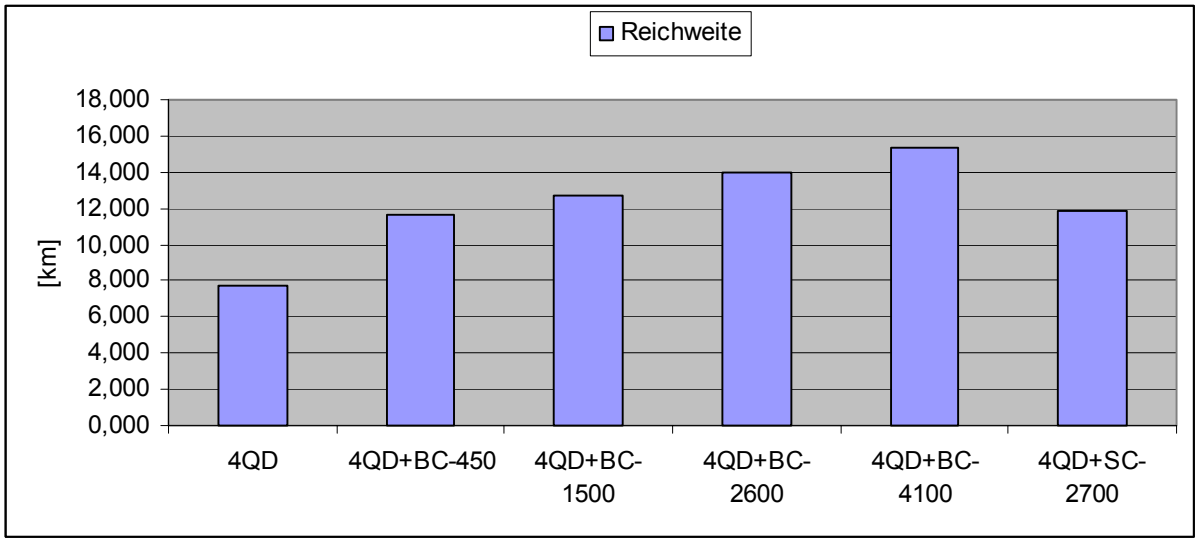


Abbildung 7.20: Reichweiten-Vergleich mit unterschiedlichen Kapazitäten

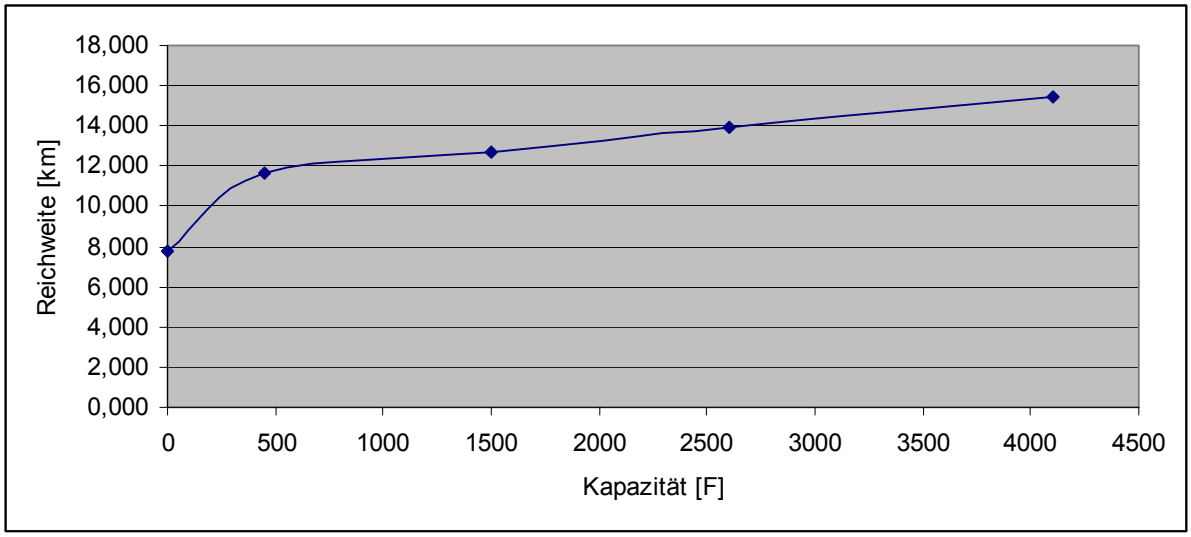


Abbildung 7.21: Reichweiten-Vergleich mit unterschiedlichen Kapazitäten

Die Differenzen zwischen den restlichen Kapazitäten sind annähernd linear. Das ist in der Abbildung 7.22 verdeutlicht. Die Reichweite über die Kapazität ist in einem Diagramm dargestellt. Die 5 Messpunkte, die sich aus den Mittelwerten der Messungen ergeben, werden durch eine interpolierte Linie verbunden. Die Reichweitenverlängerung beruht hauptsächlich auf der höheren Energieentnahme aus den Akkumulatoren wie in Abbildung 7.22 zu erkennen ist. Die Rückspeisungs-Energie ist sehr gering, um eine Abhängigkeit von der Kapazität zu untersuchen.

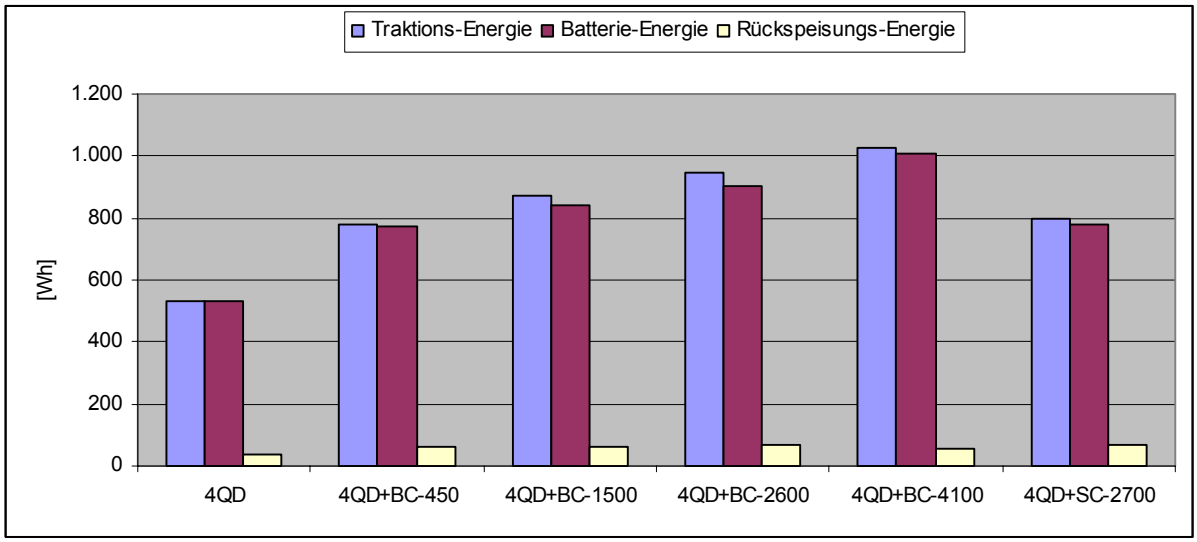


Abbildung 7.22: Energien-Vergleich mit unterschiedlichen Kapazitäten

In der Abbildung 7.23 sind die Doppelschicht-Leistungsfaktoren und Wirkungsgrade als Balkendiagramm illustriert. Es ist eine klare Abhängigkeit von der Doppelschichtkondensator-Kapazität zu erkennen. Mit einer höheren Kapazität scheint das Doppelschichtkondensator-Modul effektiver und intensiver in den Leistungsfluss des Antriebs eingreifen zu können. Die einzige Ausnahme bildet die Messung mit dem 4100-Farad-Modul. Dieser Leistungsfaktor-Wert kann aber auf eine unterschiedliche Fahrweise zurückgeführt werden, da die Messung nur einmal durchgeführt wurde.

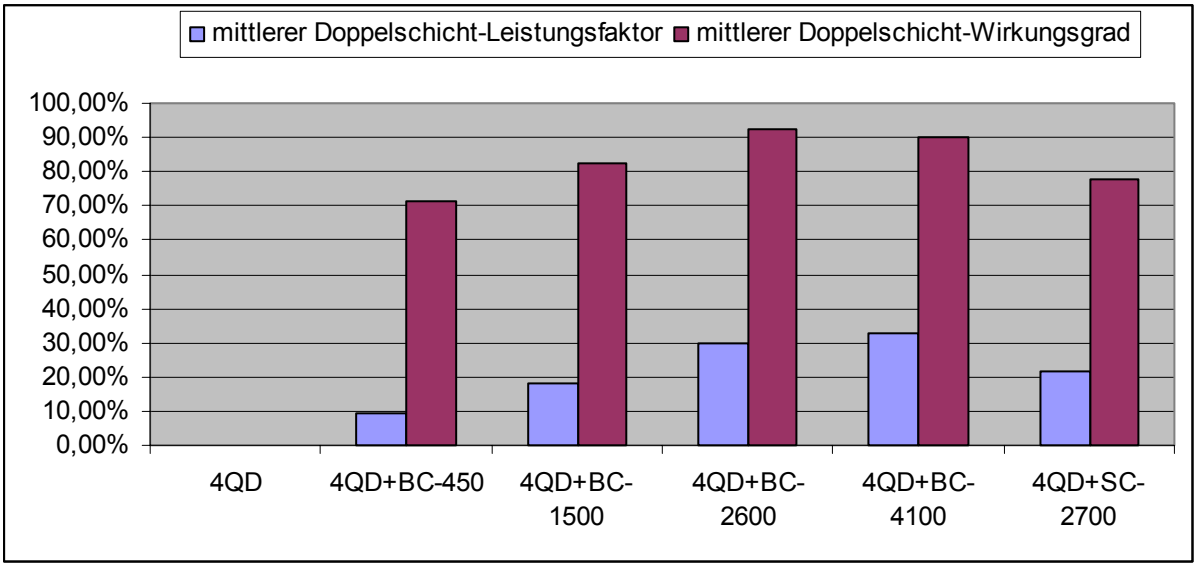


Abbildung 7.23: Leistungsfaktoren und Wirkungsgrade bei unterschiedlichen Kapazitäten

8 Schlussfolgerung

Die Ergebnisse aller Messungen erlauben folgende Schlussfolgerungen:

- Die Integration von Doppelschichtkondensatoren gemäß der „Peak Power Assistance"-Methode verlängert die Reichweite eines elektrischen Antriebs.

- Der Einfluss von Doppelschichtkondensatoren hängt von der maximalen abgegebenen Leistung der Batterien ab. Die Reichweiten verlängernde Wirkung ist um so größer, desto kleiner die maximal abgegebene Leistung der Batterie ist.

- Doppelschichtkondensatoren, die bei Fahrzeugen mit der Möglichkeit des generatorischen Bremsens eingesetzt werden, führen zu einer höheren Energierückspeisung.

- Bei gleich bleibender Belastung, Motor- und Batterie-Leistung, hängt die Reichweiten verlängernde Wirkung annähernd linear von der Kapazität der verwendeten Doppelschichtkondensatoren ab.

- Eine Veränderung der Fahrzeug-Dynamik (Beschleunigung) konnte nicht beobachtet werden.

- Während der Messungen sind keine Symmetrierungsprobleme aufgetreten. Unsymmetrien haben sich auf weniger als 0,1 Volt pro Kondensator beschränkt.

- Während der Messungen haben sich die Doppelschichtkondensatoren kaum erhitzt. Sogar im Fahrzeug bei Strömen bis zu 150 A sind keine signifikanten Temperaturveränderungen beobachtet worden.

Bei den Messungen mit den OPTIMA Batterien fließen insgesamt niedrigere Ströme. Der Motor ist auf eine Leistung von 6,4 kW begrenzt. Die Zwischenkreisspannung bei den OPTIMA Batterien durchschnittlich einen höheren Wert hat als bei den VARTA-Batterien. Es sind also nicht die gleichen Ströme notwendig, um die gleiche Leistung aufzubringen. Die maximalen Werte der Leistungen und der Beschleunigung fallen bei allen Messungen relativ ähnlich aus. Das zeigt, dass mit dem festgelegten Lastzyklus der Motor an seinen Leistungsgrenzen betrieben wird. Eine Dynamik-Verbesserung konnte daher auch nicht gemessen werden, da die Dynamik bereits von dem Motor begrenz wird.

Ein Vorteil der „Peak-Power"-Methode ist es, dass sie sehr einfach zu realisieren ist. Dadurch entsteht aber der Nachteil, dass man den Stromfluss zu und aus den Doppelschichtkondensatoren weder steuern noch regeln kann. Mit der „Peak-Power"-Methode kann nur in besonders dafür ausgelegten Systemen eine Verbesserung der Energieausbeute stattfinden. Sie ist nur sehr begrenzt anwendbar. Die Ansätze mit DC/DC-Convertern sind vielversprechender und flexibler in dieser Hinsicht. Wenn man den Energiefluss der Doppelschichtkondensatoren kontrollieren könnte, wäre höchst wahrscheinlich ein höherer Leistungsfaktor und Wirkungsgrad zu erzielen. Es existieren mehrere Antriebs-Topologien mit Doppelschichtkondensatoren die untersucht werden sollten. Leider ist es schwierig geeignete Leistungselektronik käuflich zu erwerben. Für die Traktionsapplikationen werden für die Wandler Spannungsbereiche von 20 bis 60 Volt benötigt, bei Leistungen von mehr als 3 kW. Da heute keine ähnlichen Applikationen existieren, muss der DC/DC-Wandler neu konzipiert und entworfen werden. Besondere Schwierigkeiten bei einem solchen Entwurf wird die Auswahl der geeigneten Halbleiter-Bauelemente sein und die Verlustwärmeabfuhr. Die Kosten für die geeignete Leistungselektronik sind nicht zu unterschätzen und liegen zur Zeit im

Bereich von einem Euro pro Watt. Letztendlich ist die Leistungselektronik so zu konzipieren, dass sie energetisch weniger Verluste verursacht als sie Vorteile bringt. [6]

Abgesehen von elektrischen Antrieben, benötigen auch viele andere Anwendungen eine elektrische Energieversorgung. Zu einer Zeit zu der Mobilität immer mehr an Signifikanz gewinnt, existiert ein erhöhter Bedarf an batteriebetriebenen Geräten. Das wachsende ökologische Bewusstsein fördert die Entwicklung regenerativer Energiesysteme die ebenfalls eine Möglichkeit der elektrischen Speicherung benötigen. Die Doppelschichtkondensator-Technologie kann bei vielen dieser Anwendungen die Batterien unterstützen oder ersetzten. Starterbatterien von Verbrennungsmotoren bzw. Energiespeicher, die nur selten und kurzzeitig zum Einsatz kommen, können durch die Doppelschichtkondensatoren ersetzt werden. USV-Geräte, Brennstoffzellensysteme, Windkraftanlagen, Bordnetze, ÖPNV-Versorgungsnetzte und weitere Anwendungen mit starken Lastschwankungen können von der Doppelschichtkondensator-Technologie profitieren.

Die verwendete Messelektronik wurde im Rahmen dieser Arbeit konzipiert, entworfen und gefertigt. Während der Messungen haben sich paar Mängel herausgestellt, die bei einer vertiefenden Arbeit zu beseitigen wären. Der CAN-Bus ist zwar eine praktische Lösung hat aber die Nachteile, da die Schnittstellen-Karten für den PC teuer sind und da er keine garantierte Bandbreite oder Übertragungszeit spezifiziert. Für die Messelektronik der Zukunft würde sich eine Netzwerkarchitektur besser eignen, die eine isochrone Datenübertragung unterstützt und üblicherweise bei PCs schon vorhanden ist so, z.B. USB oder Firewire. Die Steckverbinder der Messelektronik sollten den spezifizierten Normen entsprechen. Die bei dieser Arbeit verwendeten Pfostenstecker (Harting) haben sich als zu anfällig für Wackelkontakte und Beschädigungen bei der Verwendung im Fahrzeug herausgestellt. Die Auflösung und der Messbereich der Ströme sollte erhöht werden um eventuelle unvorgesehene Stromverläufe messen zu können und um eine höhere Genauigkeit bei den Leistungsverläufen zu erreichen. Ansonsten ist das Konzept der Messelektronik durchgängig nutzbar für alle in dieser Arbeit vorgeschlagenen Ansätze.

Während dieser Arbeit wurden viele Informationen gesammelt und ausgewertet. Die Blockdiagramme, die Schaltpläne, die Leiterplatten-Layouts, rohe und ausgewertete Messdaten, Datenblätter, Spezifikationen, Papers und Bilder sind elektronisch gespeichert und für alle Interessenten auf CD-ROM verfügbar.

9 Literaturverzeichnis

9.1 Monografien

[1] A.Schneuwly, R.Gallay „BOOSTCAP Double-Layer Capacitors for Peak-Power Automotive Applications", Montena Components, Switzerland

[2] A.Schneuwly, R.Gallay „Properties and applications of supercapacitors. From the state-of-the-art to future trents.", Montena Components, Switzerland

[3] A.Schneuwly, R.Gallay „High Performance Double-layer Capacitor for Power Electronic Applications", Montena Components, Switzerland

[4] Maxwell Technologies „Cell Balancing in Low Duty Cycle Applications", Application Note

[5] J.Folchert, D.Naunin, D.Tseronis „ Ultra Capacitor Storages for Automotive Applications", EVS19, TU-Berlin, September 2001,

[6] D. Tseronis „Dynamik-Verbesserung von Traktionssystemen. Entwurf eines Spannungswandlers für den Einsatz von Doppelschichtkondensatoren in Elektrofahrzeugen", Studienarbeit, TU-Berlin, Juni 2003

[7] T.Dietrich, „Optimized starting – economical driving", EPCOS AG, München 2000

[8] „AVR STK 500 User Guide", User Guide, ATMEL, Dezember 2001

[9] CAN Specification Version 2.0", Standard, Robert Bosch GmbH, September 1991

[10] Reuss „Extended Frame Format" Application Note, Philips Semiconductors, Mai 1993

[11] Hank, Jöhnk, „Determination of Bit Timing Parameters for the CAN Controller SJA 1000", Application Note, Philips Semiconductors, Juli 1997

[12] Hank, Jöhnk, „SJA-1000 – Stand-alone CAN Controller", Application Note, 1997

9.2 Bibliografien

[13] D.Naunin, „Skript zur Vorlesung Elektrofahrzeuge – Batterien, Brennstoffzellen und Antriebsysteme", TU-Berlin, Oktober 2001

[14] H.Giersch, H.Hartus, N.Vogelsang, „Elektrische Maschinen, Prüfen, Normung, Leistungselektronik, 5. Auflage, B.G.Teubner Verlag, Wiesbaden 2003, ISBN: 3-519-46821-2

[15] R.Kories, H.Schmidt-Walter, „Taschenbuch der Elektrotechnik, Grundlagen und Elektronik", 3.Auflage, Harri Deutsch Verlag, Frankfurt am Main 1998, ISBN: 3-8171-1563-6

[16] Volpe „AVR-Mikrocontroller-Praxis", 2.Auflage, Elektor Verlag, 2001,ISBN: 3-89576-063-3

[17] Trampert, „AVR-RISC Mikrocontroller", Franzis´ Verlag, 2000, ISBN: 3-7723-5474-2

[18] EPCOS, „Ferrite und Zubehör“ Datenbuch/Produktkatalog, EPCOS, Bestell-Nr: EPC:61002

[19] Lancaster, „Das aktiv Filter Kochbuch“, Buch, Itp- Iwt Verlag, 1994, ISBN: 3-883-22007-8

[20] Tietze, Schenk, Gamm „Halbleiter Schaltungstechnik“, 12. Auflage, Buch, Springer Verlag, 2002 Heidelberg, ISBN: 3-540-42849-6

[21] Wendt, „Taschenbuch der Regelungstechnik“, 3. Auflage, Buch, Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt am Main 2000, ISBN 3-8171-1629-2

[22] Kazimierczuk, Dariusz, „Resonant Power Converters”, Buch, Wiley Interscience, 1995, ISBN: 0-471-04706-6

[23] Michel, „Leistungselektronik, Eine Einführung”, 2.Auflage, Springer Verlag, 1996, ISBN: 3-540-60158-9

[24] Schlienz, „Schaltnetzteile und Ihre Peripherie“, 1.Auflage, Buch, Vieweg Verlag, Juni 2001, ISBN: 3-528-03935-3

9.3 Datenblätter

[25] 4QD, „4QD series controllers Instruction Manual 4Qd-300-36 and 4QD-300-48“, Cambridgeshire, 2003, 300.pdf

[26] Atmel, „8-Bit AVR Microcontroller with 8Kbytes In-System Programmable Flash AT90S8535”, Rev. 1041H–11/01, AT90S8535.pdf

[27] Atmel, „8-Bit AVR Microcontroller with 16Kbytes In-System Programmable Flash Atmega163”, Rev. 11420–09/01, ATmega163.pdf

[28] Maxwell Technologies, „BOOSTCAP Ultracapacitor BCAP0008”, Rossens, Doc. # 1002198 | Rev. 2, BCAP0450.pdf

[29] Maxwell Technologies, „BOOSTCAP Ultracapacitor BCAP0010”, Rossens, Doc. # 1002199 | Rev. 2, BCAP1800.pdf

[30] Maxwell Technologies, „BOOSTCAP Ultracapacitor BCAP0013”, Rossens, Doc. # 1002195 | Rev. 2, BCAP2600.pdf

[31] CURTIS, „MOSFET ELECTRONIC MOTORSPEED CONTROLLER S MODELS 1204/1205”, NORTHAMPTON, 50036 REV A 7/97, 1204.pdf

[32] VAC Vacuumschmelze, „200 A - Stromsensor-Modul”, T60404-N4644-X051, 26.09.1996, 4-N4644-X051.pdf

[33] International Rectifier „IR2184(4)(S) HALF-BRIDGE DRIVER”, Data Sheet No. PD60174-D, El Segundo 2001, ir2184.pdf

[34] National Semiconductor, „LM1577/LM2577 Series SIMPLE SWITCHER® Step-Up Voltage Regulator“, DS011468, 1999, LM1577.pdf

[35] HN Elektronic Components GmbH „SIM 5 DC Power Package 3 Watt Small-Input-Ranging Compact-Serie“, Langensebold

[36] National Semiconductor, „LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors“,DS005516 , 2000, LM35.pdf

[37] Linear Technology, „Single Chip 12-Bit Data Acquisition System“, LT/CPI 1201 1.5K REV D, Milpitas 1991, LTC1290.pdf

[38] MAXIM, “*+5V-Powered, Multichannel RS-232 Drivers/Receivers*“ ,*19-4323; Rev 10; 8/01*, Sunnyvale 2001**,** MAX220-MAX249.pdf

[39] MAXIM, “Calibrated, Quad, 12-Bit Voltage-Output DACs with Serial Interface”, 19-0230; Rev 2a; 1/97, Sunnyvale 1997, MAX536-MAX537.pdf

[40] MAXIM, “MAX 674 +10V Precision Voltage Reference”, MAX674.pdf

[41] Philips Semiconductors, „PCA82C250 CAN controller interface”, 9397 750 06609, EINDHOVEN 2000, PCA82C250_5.pdf

[42] Philips Semiconductors, „SJA1000 Stand-alone CAN controller”, 9397 750 06634, EINDHOVEN 2000, SJA1000_3.pdf

[43] Toshiba, „IGBT/Power MOSFET Gate Drive Photo-IC Couplers TLP250(INV)/TLP250F(INV)“, 990219(H), Tokio, 3662c.pdf

[44] EPCOS, „UltraCap 2700F/2,3V“, UCAP2700.pdf

10 Anlagen