

# MODELLKONZEPT EINES DUALEN ENERGIESPEICHERSYSTEMS FÜR ELEKTROMOBILE ANWENDUNGEN

Michael Wittig, Sven Slawinski, Rene Jost, Lutz Zacharias, Mirko Bodach  
Westfälische Hochschule Zwickau, Dr.-Friedrichsring 2A, 08056 Zwickau

An Hand dieses Papers soll die Entwicklung eines Modellkonzeptes aufgezeigt werden, welches sich durch die Kombination zweier unterschiedlicher elektrischer Energiespeicher auszeichnet. Durch die Kombination der beiden Energiespeicher werden die Vorteile der einzelnen Systeme mit einander kombiniert um somit die Gebrauchsdauer und das Leistungsvermögen des Gesamtsystems zu erhöhen. Das Modellkonzept sieht eine freiprogrammierbare Steuerung mittels VHDL-AMS und somit einen Stand-alone Betrieb vor. Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit den Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 1767X09 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt beim Autor.

## 1. Einleitung

### 1.1 Ausgangssituation

Vorangetrieben durch umweltpolitische Forderungen, Verknappung der natürlichen Ressourcen und Akzeptanz der Bevölkerung hinsichtlich der Elektromobilität, nimmt der elektrische Fahrtrieb zukünftig einen immer größer werdenden Stellenwert ein. Automobilhersteller sind deshalb angehalten Fahrzeuge mit alternativen Antriebskonzepten zu entwickeln und der Bevölkerung anzubieten. Die angestrebte Lösung der meisten Hersteller stellt hierbei das Elektroauto (pure electric vehicle [PEV]) dar.

Grundsätzlich ist es möglich jedes Fahrzeug mit Verbrennungsmotor in ein Elektrofahrzeug umzuwandeln, da die Technik hinreichend bekannt ist. Jedoch existieren derzeit diverse technologische Hindernisse, die eine Marktdurchdringung mit Elektrofahrzeugen erschweren.

Zum einen besitzen heutige Energiespeicher zwar eine relativ hohe Energiedichte, im Vergleich zu einem herkömmlichen Dieselfahrzeug ist die Reichweite mit aktueller Li-Ion-Batterietechnik stark begrenzt. Um die Reichweite eines Elektrofahrzeuges zu erhöhen, wird die Energie bei jedem Bremsvorgang dem Energiespeicher wieder zugeführt. Bei der sogenannten Rekuperation fungiert der Fahrtrieb als Generator und speist die Batterie. Da es sich jedoch bei dieser Batterietechnik um einen elektrochemischen Energiespeicher handelt, reagiert das System recht träge, wenn man von einer zuvor erfolgten Entladung des Energiespeichers ausgeht. Dem entsprechend ist der Rekuperationswirkungsgrad niedrig anzusetzen.

Zum anderen unterliegen Li-Ion Akkumulatoren durch erhöhte Lade- und Entladezyklen einer verstärkten Alterung. Energiespeicher basierend auf der heutigen Li-Ion Technologie sind hinsichtlich der Lade- und Entladeströme stark eingeschränkt. Beispielsweise gibt der Hersteller KOKAM für den 16 Ah Li-Ion Akkumulator einen maximalen Ladestrom von lediglich 16 A und für den Entladestrom 80 A an [1]. Deutlich zu hohe oder andauernd hohe Strombelastungen wirken sich jedoch negativ auf die Zellchemie aus, was eine verminderten Gebrauchsdauer und somit erhöhte Betriebskosten des Elektrofahrzeuges zu Folge hat. Grundlegend können, je nach Leistungsvermögen des Fahrtriebes, sehr

hohe Rekuperationsströme realisiert werden, die jedoch aus den dargelegten Gründen mit herkömmlicher Li-Ion Batterietechnik nicht vollständig genutzt werden können.

### 1.2 Ziel

Das Ziel dieses Modellkonzeptes sieht vor, dass durch die Kombination zweier unterschiedlicher Energiespeicher ein Gesamtsystem entwickelt wird, welches die positiven Eigenschaften beider Speichersysteme in sich vereint.

	DSK	Li-Ion
<b>Vorteile</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• hohe Leistungsdichte</li><li>• hohe Zyklenfestigkeit</li><li>• wartungsfrei</li><li>• hochstromfähig für Be- und Entladung</li><li>• tiefentladefähig</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• hohe Energiedichte</li><li>• geringe Selbstentladung</li><li>• vielseitiges Angebot</li></ul>
<b>Nachteile</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• geringe Energiedichte</li><li>• höhere Selbstentladung</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• geringe Zyklenstabilität</li><li>• BMS notwendig</li><li>• Sicherheit</li></ul>

Tabelle 1: Grundlegender Vergleich DSK und Li-Ion Akku

Durch den Aufbau von VHDL-AMS Modellen in einer Simulationsumgebung werden die Ansteueralgorithmen und somit die festgelegten Randparameter für ein gezieltes Energiemanagement des dualen Energiespeichersystems realisiert. Als Hauptenergiespeicher wird ein Modul bestehend aus Li-Ion Akkumulatoren eingesetzt, was in Verbindung mit einem Kurzzeitenergiespeicher (Doppelschichtkondensatormodul, DSK) das gesamte Energiespeichersystem bildet. Doppelschichtkondensatoren besitzen gegenüber Li-Ion Akkumulatoren eine deutlich erhöhte Zyklenstabilität. Laut Herstellerangaben können, je nach Lastzyklus, bis zu 500.000 Lade- und Entladezyklen erreicht werden [2], wobei diese Aussage an Hand eigener Untersuchungen teilweise kritisch zu betrachten sind [6], [7], [8]. Im Vergleich dazu erreicht der hier verwendete Li-Ion Akku lediglich 800 Lade- und Entladezyklen [1]. Li-Ion Akku hingegen besitzen eine weitaus höhere Energiedichte im Vergleich zur Doppelschichtkondensatoren.

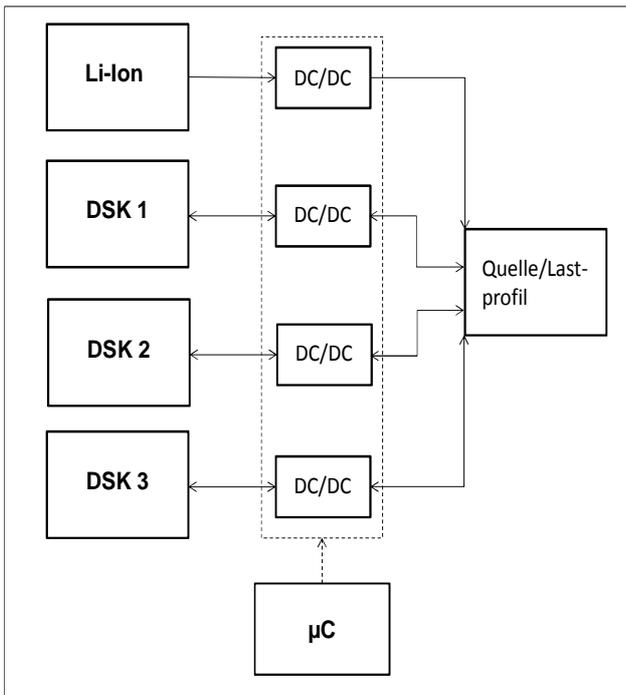


Bild 1: Grundmodell dualer Speicher

Ziel sind die Eigenschaften wie hohe Leistungsdichte und Zyklenstabilität der Doppelschichtkondensatoren sowie hohe Energiedichte der Li-Ion Akkus zu kombinieren um damit das Leistungsvermögen und die Gebrauchsdauer der Einzelsysteme zu steigern. Beide Energiespeichersysteme werden parallel betrieben und mittels leistungselektronischen Stellgliedern sowie entsprechender Ansteuerung an einem gemeinsamen Bus betrieben. Weiterhin werden die daraus resultierenden Erkenntnisse unmittelbar in die Weiterentwicklung des aktuellen WHZ Racing Team Rennwagen FP511e einfließen.

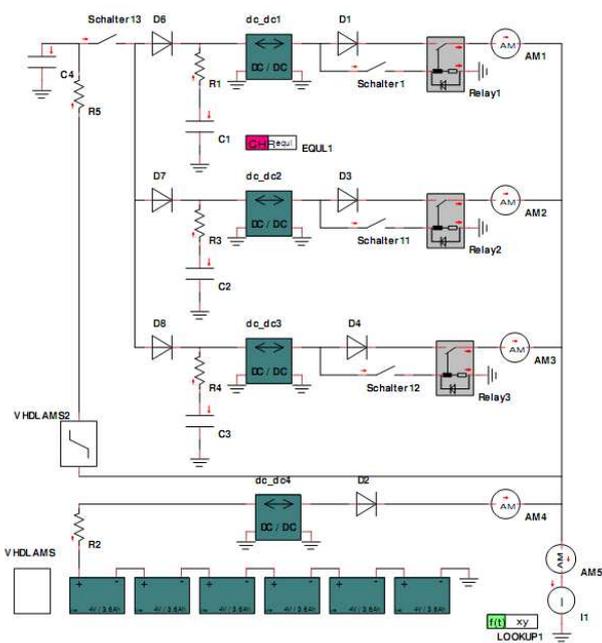


Bild 2: Simulationsaufbau in PORTUNUS

## 2. Umsetzung

### 2.1 Simulationsergebnisse

Die Simulation des zu entwickelnden dualen Speichersystems wurde mittels des Simulationstools PORTUNUS der Firma Adapted Solutions durchgeführt. Der Simulationsaufbau ist im Bild 2 dargestellt. Das Simulationsmodell besteht im Wesentlichen aus den Kurzzeitspeichermodule C1 - C3 sowie den dazugehörigen Spannungswandlern dc\_dc1 - dc\_dc3. Weiterhin ermöglichen die Relais 1 - 3 die gezielte Zu- bzw. Abschaltung der einzelnen Kurzzeitenergiespeicher auf die Last.

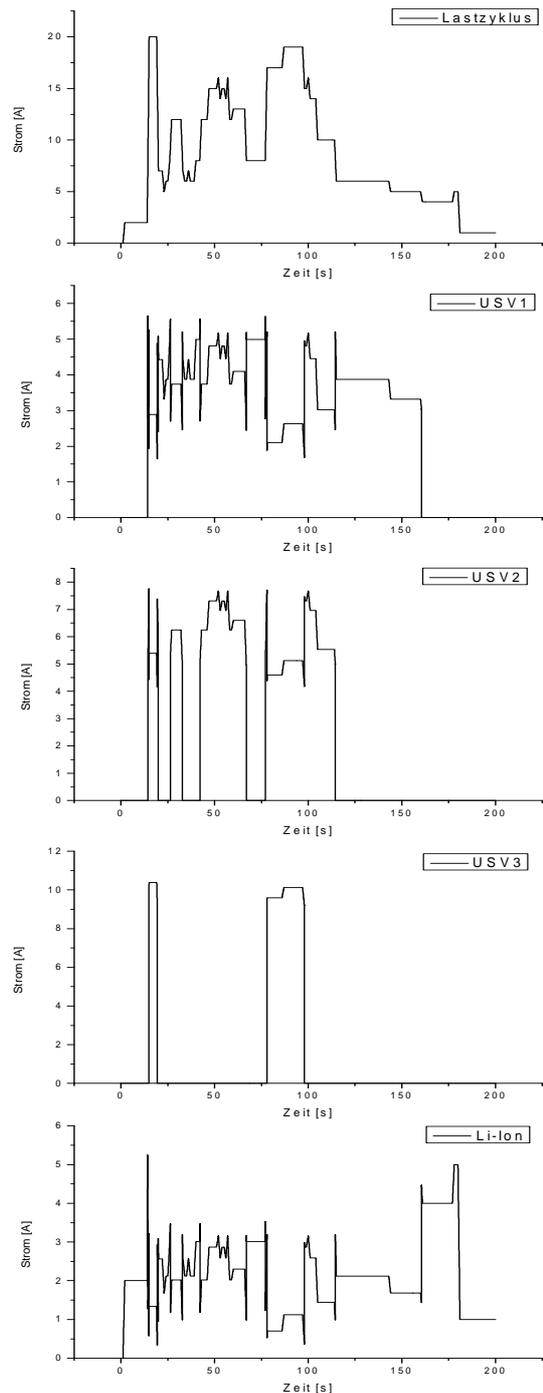


Bild 3: PORTUNUS-Simulationsergebnis

Parallel dazu befindet sich der Langzeitenergiespeicher bestehend aus sechs sich in Reihe befindlichen Li-Ion Akkus, die ihrerseits wiederum über einen Buck Boost Converter an die Last geschaltet werden. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die Speicherauslegung für die DSK-Module sowie für den Li-Ion Speicher ausreichend sind, um einen frei definierten Lastzyklus absolvieren zu können. Zu erkennen ist weiterhin, dass sich die Belastung hinsichtlich des Stromes (Diagramm Li-Ion, Bild 3) auf den Li-Ion Speicher minimiert und selbst bei einer Stromamplitude von 20 A nicht über 5 A steigt. Das gezielte Energiemanagement mittels VHDL-AMS macht in der Simulation deutlich, dass ein Kurzzeitenergiespeicher in der Lage ist, hohe Stromamplituden teilweise oder sogar gänzlich zu übernehmen.

### 3. Entwicklung und Konstruktion des Labordemonstrators

Bei der Entwicklung des Labordemonstrators lag das Augenmerk auf Funktionstüchtigkeit und Sicherheit, wodurch die gemeinsame Bus-Spannung des dualen Speichersystems auf 24 VDC beschränkt wurde. Als Kurzzeitenergiespeicher wurden vorerst drei baugleiche unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) verwendet, die bereits über eine Ladeelektronik sowie einen Hochsetzsteller für eine konstante Ausgangsspannung verfügen. Weiterhin verfügen die USV's bereits über diverse Schutzvorrichtungen vor Überlastung [4]. Da jede USV lediglich über eine Konstspannungsregelung am Ausgang verfügt und somit der Ausgangsstrom nicht direkt begrenzt werden konnte, wurde die Ausgangsspannung in einem gewissen Bereich regelbar ausgelegt. Eine kleine Veränderung der Ausgangsspannung jeder USV machte es möglich jeder USV den gewünschten Strom aufzuprägen. Um jedoch Rückspeisungen in den Ausgang der USV zu verhindern, wurde zusätzlich noch eine Diode vorgesehen. Weiterhin wurde am Ausgang jeder USV ein Relais für die Zu- und Abschaltung sowie ein LEM – Wandler für die Aufzeichnung des Ausgangsstromes jeder USV integriert.

Als Langzeitenergiespeicher wurde ein Modul bestehend aus sechs in Reihe verschalteten Li-Ion Akkus des Herstellers Kokam mit einer Kapazität von jeweils 3,6 Ah verwendet. Um die Modulspannung auf einen konstanten Wert von 24 VDC zu halten, wurde nachfolgend ebenfalls ein DC/DC Konverter implementiert der als Buck Boost Converter fungiert. Um die Stromamplitude des Li-Ion Moduls auf ein Minimum zu reduzieren bzw. die Grundlast lediglich von dem Li-Ion Modul abdecken zu lassen, wurde die Ausgangsspannung des Buck Boost Converter leicht unter der der USV Module gewählt.

Die Zu- bzw. Abschaltung der USV Module sowie die Strommessung erfolgt über einen Mikrocontroller, der ausgehend von den programmierten Randparametern, jeder USV das Ansteuersignal zuweist. Die Strommessung und somit die Amplitude für die

Zuschaltsschwelle jeder USV erfolgt auf dem gemeinsamen Bus und wird mittels LEM – Wandler direkt an den Mikrocontroller übertragen.

### 4. Ergebnisse

Nach dem Aufbau und der Verschaltung aller leistungselektronischen Bauelemente und Stellglieder sowie der Programmierung des Ansteueralgorithmus mit den Mess- und Schaltschwellenparametern, erfolgten der Testdurchläufe. Der Lastzyklus wurde zuvor auf ein programmierbares Quelle/Lastsystem übertragen und mit dem dualen Speichersystem verbunden.

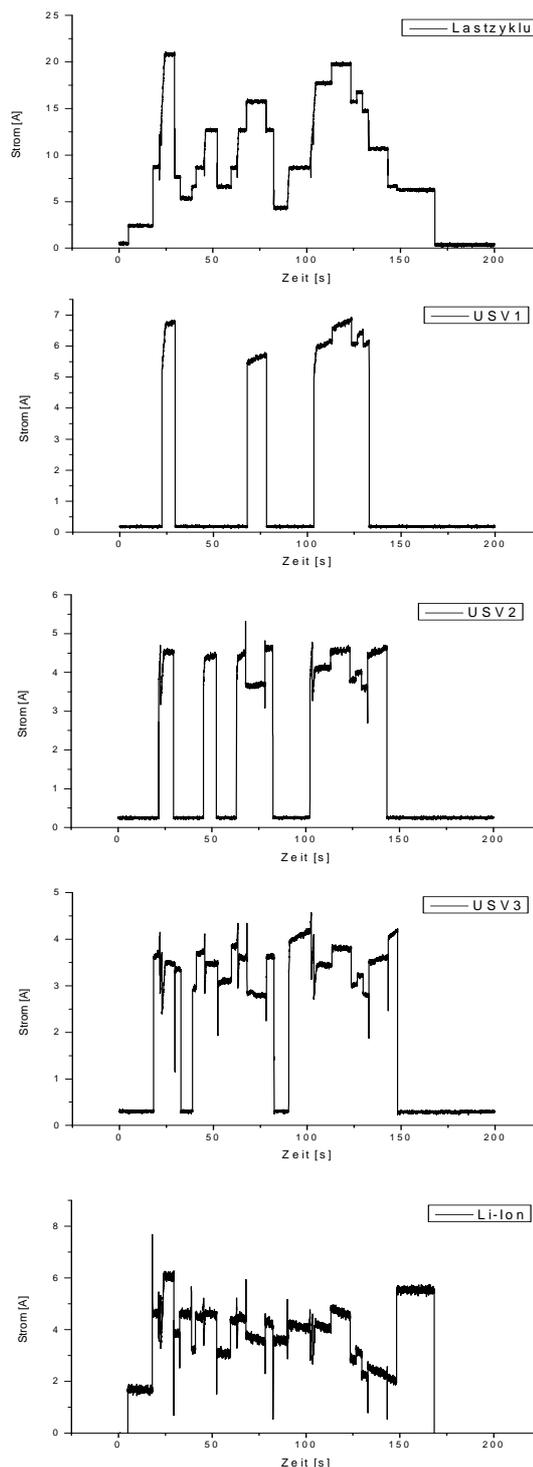


Bild 4: Gemessene Stromverteilung

In Bild 4 ist zu erkennen, dass der Strom aus dem Li-Ion Speichermodul sich lediglich auf 6,5 A beläuft. Das Energiemanagement ermöglicht nun mehr, wie auch schon zuvor in der Simulation bestätigt, auftretende Lastsprünge auf die Kurzzeitergiespeicher umzuleiten und somit den Hauptspeicher vor Überlastung zu schützen. Die Folge daraus kann eine deutliche Erhöhung der Lebensdauer des Li-Ion Akkus sein. Die Erkenntnisse aus der Entwicklung dieses dualen Energiespeichersystems flossen bei der Weiterentwicklung des aktuellen WHZ Racing Team Rennwagen FP511e ein. Als Grundlage der Simulation wurde ein real existenter Rundenzyklus des WHZ Racing Teams mit dem Aktuellen FP511e [5] Rennwagen herangezogen um den Energieverbrauch zu ermitteln. Ziel ist es, durch ein entsprechendes Energiemanagement, die bei einem Bremsvorgang entstehende Rekuperationsenergie nutzbar in einem Doppelschichtkondensatormodul zu speichern und beim Beschleunigen dem Antriebsstrang zu zuführen. Durch die zusätzlich gespeicherte Energie kann der Hauptenergiespeicher verkleinert werden, um somit eine Gewichtersparnis zu erzielen.

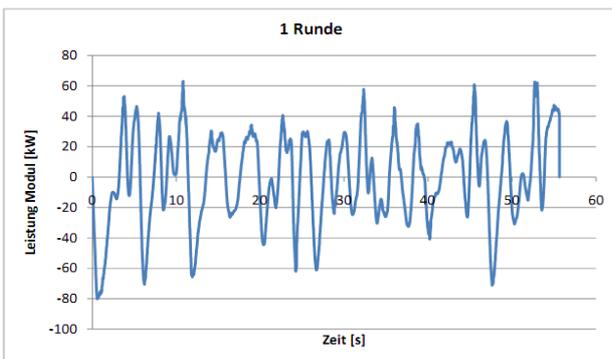


Bild 5: Rennzyklus FP511e [3]

Bei dem Zyklus im Bild 5 handelt es sich um die Aufzeichnung des Energieumsatzes des Rennwagens FP511e in einer realen Runde. Diese Daten werden herangezogen um eine Simulation des dualen Speichersystems mittels PORTUNUS durchzuführen.

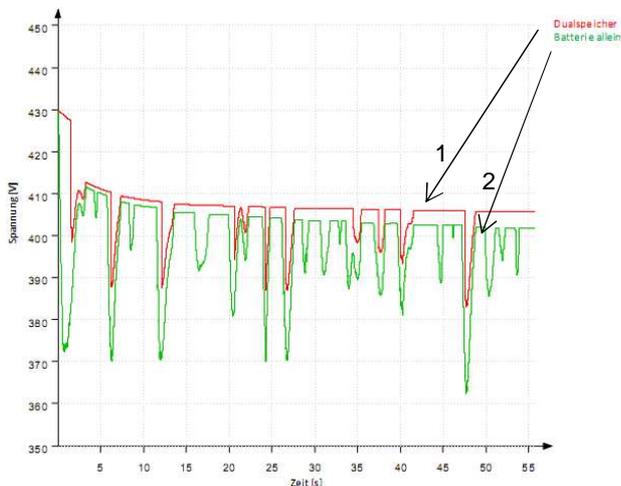


Bild 6: Simulationsergebnis FP511e [3]

Das Simulationsmodell beinhaltet ein 420 V/ 18,6 Ah Li-Ion Modul, ein Doppelschichtkondensatormodul sowie elektronische Stellglieder und deren Ansteuerung [5]. Die Rekuperation erfolgte ausschließlich über das DSK-Modul. Die Simulationsergebnisse in Bild 3 verdeutlichen, dass die Belastung der Batterie (1) ohne DSK zur Pufferung erheblich größer ist als im dualen Verband (2). Ausgehend von einem Rekuperationswirkungsgrad von 50% lässt sich bereits in der Simulation eine deutliche Minderung der Belastung für die Batterie feststellen.

## Danksagung

Dieses Projekt wurde wesentlich durch die sehr gute Zusammenarbeit mit verschiedenen Unternehmensbereichen der Firma Siemens am Standort Chemnitz sowie durch eine enge Kooperation mit dem im Chemnitzer TCC ansässigen IT-Unternehmen Adapted Solutions GmbH unterstützt.

## Literaturverzeichnis

- [1] Kokam Cell Specification SLPB75106205  
[www.cleancarb.com](http://www.cleancarb.com)
- [2] NessCap Datasheet ESHSR-0360C0-002R7A  
[www.nesscap.com](http://www.nesscap.com)
- [3] R. Jost, Untersuchung zur Dimensionierung eines dualen Speichersystems im Elektrostraßenfahrzeug, Diplomarbeit an der Professur Elektrische Energietechnik / Regenerative Energien der Westsächsischen Hochschule Zwickau, August 2011
- [4] SITOP UPS500P USV Datasheet, Siemens  
[www.siemens.de](http://www.siemens.de)
- [5] WHZ Racing Team, Spezifikation FP511e, 2011
- [6] B. Veit, M. Wittig, U. Baumbach, F. Hiller, U. Herold, M. Bodach, Lebensdaueruntersuchung an Superkondensatoren für dezentrale Stromversorgung, ETG Fachtagung, Erfurt 2009
- [7] B. Veit, M. Wittig, T. Hempel, M. Bodach, Investigations on the Power Cycle Lifetime of Supercapacitors, PCIM Europe, Nürnberg 2010
- [8] T. Hempel, B. Veit, M. Wittig, T. Göschel, M. Bodach, „Smart Energy Storage“ Haushaltergiespeicher für Niederspannungsnetze der Zukunft, ETG Fachtagung, Leipzig 2010