S 6-2
Vergleichende Untersuchung zur Topologie von zelloptimalen, elektromobilitäts-optimierten Ladungsausgleichsvorrichtungen

Von Kai Luszczynski[1], Elmar Engels[2]

Die Entwicklung der letzten Jahre hat gezeigt, dass die Nutzung von Akkus ein riesiges, immer größer werdendes Anwendungsfeld abdeckt. Von Kleinstverbrauchern wie Solartaschenrechner, über Kleinverbraucher wie Mobiltelefone, Akkuschrauber und Laptops, bis hin zu Akkubänken in Elektrofahrzeugen oder Speicheranlagen zur besseren Nutzung regenerativer Energiequellen wie Wind und Sonne, werden Akkus benötigt, die speziell auf dieses Lastprofil abgestimmt sind. Im Laufe der Zeit wurden eine ganze Reihe verschiedener Speicher dieses Typs entwickelt, da sich zeigte, dass jeder Typ ganz unterschiedliche Eigenschaften im Hinblick auf den Temperaturbereich, die Kapazität, die Selbstentladung, die Spitzenstrombelastbarkeit, die Nennspannung, das Alterungsverhalten, usw. hat und es somit nicht den *perfekten Akku* gibt.

In mobilen und hoch dynamischen Systemen wie dem Automobil ist es aufgrund des begrenzten Volumenangebotes und möglichst geringem Gewicht außerdem wichtig, die gesamte, potentiell im Akku zur Verfügung stehende, Energie auch nutzen zu können.

Die Zellspannung aller gängigen Zelltypen befindet sich, bedingt durch die Voltaische-Spannungsreihe, im Bereich von ca. 1 Volt bis max. 4,2 Volt. Diese ist für viele Anwendungen zu gering, sodass in der Regel mehrere Einzelzellen seriell - zu einem Akku - verschaltet werden. Leider hat diese für die Anwendung außerordentlich praktische Möglichkeit der seriellen Verschaltung für die meisten Akkutypen eine kapazitätsbegrenzende oder sogar zerstörerische Folge. Insofern stellt sich die Frage, welche Vorteile zelloptimierte Lade- und Entladeverfahren haben, wenn die einzelnen Zellen nicht seriell verschaltet werden, sondern zellindividuell über eine Leistungselektronik auf einen Zwischenkreis arbeiten.

1 Problemstellung und Zielsetzung

Ein Akku dient dazu, möglichst viel elektrische Energie zu speichern und diese an das zu versorgende System abzugeben. Akkus bestehen meist aus Einzelzellen mit gleichen elektrochemischen Eigenschaften und Aufbau. In der Praxis zeigt sich jedoch, dass die Einzelzellen in ihrer Nennkapazität aufgrund möglicher Bauteilstreuung beim Herstellungsprozess, Temperaturdifferenzen im Zell- bzw. Akkuverbund, unterschiedlichen Zellenimpedanzen, unterschiedlichen Ladezuständen der verwendeten Zellen beim Fertigen des Akkus oder auch durch unterschiedliche Alterung nicht exakt gleich sind, sodass sich bei der Serienverschaltung große Probleme ergeben.

[1] Dipl.-Ing. (FH) Kai Luszczynski, Photon Laboratory GmbH, Aachen
[2] Prof. Dr.-Ing. Elmar Engels, FH Aachen, Aachen

ingenieurDAAT 2012

Für jede Sekundärzelle, egal welcher Technologie, gibt es laut Datenblatt eine Lade- und Entladeschlussspannung, die in jedem Betriebszustand unbedingt eingehalten werden muss, damit die Zelle keinen Schaden nimmt.

In *erster Näherung* steigt in einer Zelle beim Ladevorgang die Spannung proportional zur geladenen Ladungsmenge, wie bei einem Kondensator. Dieser Zusammenhang hat beim Laden zur Folge, dass die Spannung in der kapazitätsschwächeren Zelle schneller steigt. Durch jede Zelle fließt der gleiche Strom über die gleiche Zeit und somit erhalten alle die gleiche Ladungsmenge. In realen Akkumulatoren ohne weitere Schutzeinrichtungen kommt es bei jedem Ladevorgang vor, dass einzelne Zellen trotz exakter Überwachung der Gesamtspannung über ihre Ladeschlussspannung geladen werden und je nach Zelltyp einen mehr oder weniger großen irreversiblen Schaden nehmen. Dieser Effekt ist umso ausgeprägter, je mehr Zellen im Serienverbund verschaltet sind, da die einzelne Zellspannung verhältnismäßig immer weniger Einfluss auf die Gesamtspannung hat.

Betrachtet man nach Gleichung [P = U x I] die Zelle mit der höchsten Spannung, wird ersichtlich, dass diese auch die größte Ladeleistung aufnimmt, obwohl die Zelle als erste keine Ladung mehr speichern kann.

Beim Entladevorgang sind die beschriebenen Effekte analog. Die Spannung der kapazitätsschwächsten Zelle sinkt am schnellsten.

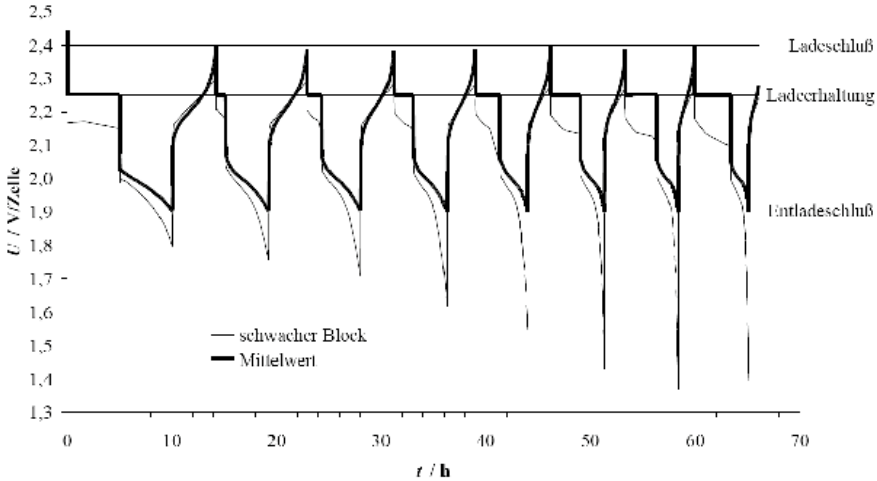

Bild 1: Zyklenbetrieb einer achtzelligen Bleibatterie mit einer kapazitätsschwachen Zelle [1]

Wie aus Bild 1 zu ersehen ist, wird die schwächste Zelle bei jedem Speicherzyklus immer mehr geschwächt, da sie von Zyklus zu Zyklus stärker außerhalb ihres Spannungsspezifikationsbereiches betrieben wird. Es kommt also zum sogenannten Zellspannungsdrift. Im Extremfall kann eine Zelle beim Entladen sogar invers geladen, also verpolt werden, ohne das die Gesamtspannung unter die Entladeschlussspannung fällt.

Nicht jede Zelltechnologie ist gleich fehlertolerant; einige Lithiumzellen beispielsweise können bei Überspannungen von nur 100mV schon vollständig ausfallen oder sogar in Brand geraten, wogegen Bleizellen einen Großteil der Verlustleistung in Wärme umsetzen können.

Durch Selektion möglichst gleicher Zellen bezüglich ihrer Zellimpedanzen, Zellenkapazitäten und dem Ladezustand bei der Herstellung, können die Auswirkungen minimiert werden. Eine solche Selektion ist jedoch außerordentlich zeitaufwändig und daher teuer. Und selbst wenn im Vorfeld alle nötigen und möglichen Maßnahmen ergriffen würden, bliebe als Hauptursache für das unterschiedliche Verhalten der Zellen die ungleichmäßige thermische Beanspruchung im Betrieb. Die von Zelle zu Zelle unterschiedlichen Temperaturen rufen größere oder kleinere Veränderungen der Impedanz der chemischen Reaktionen hervor. Diese ungleichmäßige Veränderung verstärkt wiederum den Effekt, sodass die wärmeren Zellen sich immer mehr erhitzen.

Betreibt man einen Akku an einem Ladegerät mit Einzelzellüberwachung, stellt sich ein ganz anderes Verhalten ein. Die kapazitätsschwächste Zelle erreicht beim Laden als erste die Ladeschlussspannung, woraufhin das Ladegerät den Ladevorgang für den gesamten Akku abschaltet, obwohl die anderen Zellen noch nicht voll sind. Somit bestimmt die schwächste Zelle die Leistungsfähigkeit des gesamten Akkus.

2 Lösungsansatz

In der Diplomarbeit „Vergleich von Zell-Ladungsausgleichseinrichtungen und Aufbau einer elektromobilitäts-optimierten Topologie“ habe wurden verschiedene „Ladungspumpen“ miteinander verglichen [2].

Die Methode des aktiven Ladungsausgleichs (siehe Bild 2) setzt die höhere Zellspannung bzw. die damit verbundene Energiedifferenz nicht in Wärme um, sondern transferiert sie auf Zellen mit niedrigerem Spannungspegel, um diese gezielt zu stützen. Somit geht, abgesehen vom Wirkungsgrad der „Ladungspumpe“, keine Energie verloren.

Der benötigte Zellladungsausgleichsstrom hängt neben der Zelldiskrepanz auch vom Lade- bzw. Entladestrom ab. Da im Elektromobil zum Teil sehr hohe Ströme auftreten, muss die Ladungsausgleichseinrichtung in der Lage sein, die entsprechend hohen Ausgleichsströme zu tragen, um eine Zellunterspannung unter Last zu vermeiden.

Tagungsband AMEC 2012

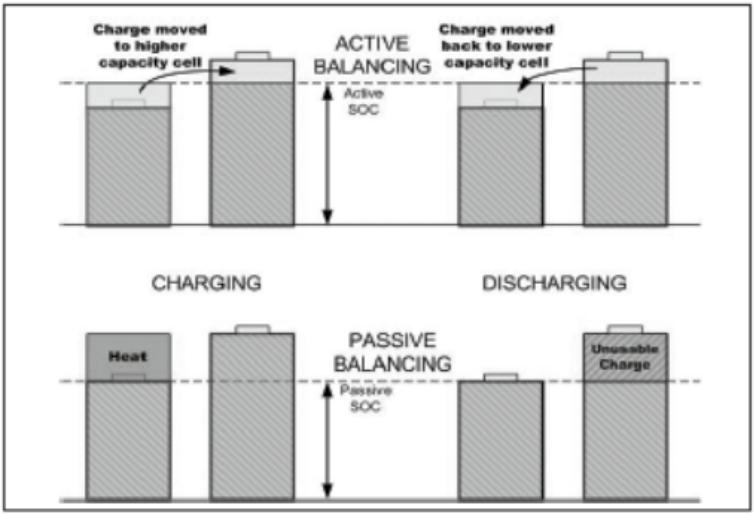

Bild 2: Passiver und aktiver Ladungsausgleich in der Gegenüberstellung [3]

Aufgrund dieser teils komplexen Anforderungen und der Tatsache, dass im Bereich der Leistungselektronik in den letzten Jahren durch Entwicklung neuer und stetiger Verbesserung vorhandener Bauteile enorme Fortschritte gemacht wurden, stellt sich die Frage, ob der grundsätzliche Ansatz des Ladungsausgleiches der Richtige ist. Mit dieser Motivation bin ich einen Schritt zurück gegangen und habe mir überlegt, ob die Zellserienverschaltung der richtige Ansatz ist. Dabei wurden die folgenden 4 Topologien zur Systemeinbindung betrachtet.

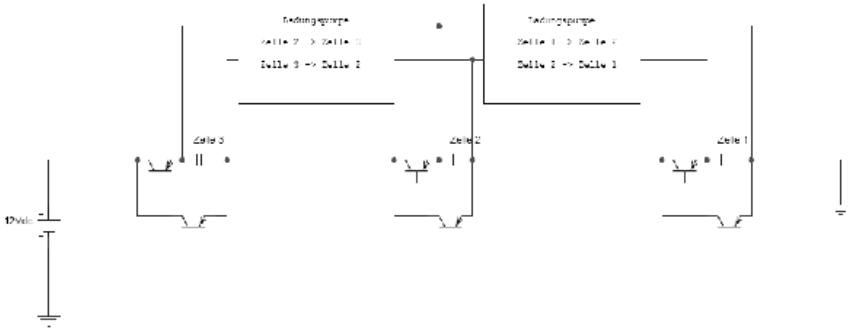

Bild 3: Systemeinbindungstopologie der Zell-Serienschaltung mit Ladungspumpe zu Z_{+1}/Z_{-1} [2]

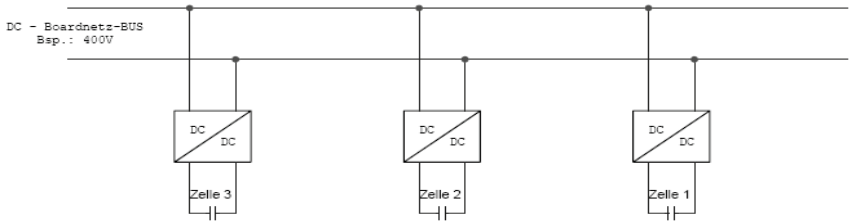

Bild 4: Systemeinbindungstopologie mit einem DC/DC-Wandler pro Zelle [2]

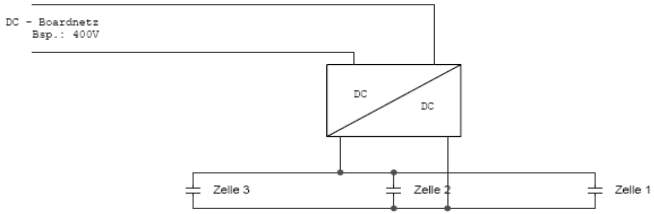

Bild 5:Systemeinbindungstopologie mit einem DC/DC-Wandler pro Block [2]

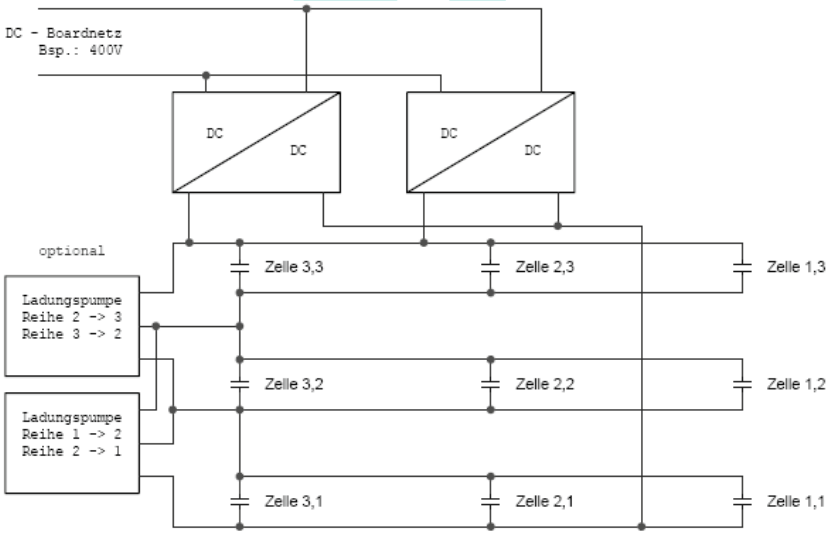

Bild 6: Systemeinbindungstopologie mit Zell-Serien-Parallel-Hybrid-Schaltung [2]

Vergleicht man diese vier Topologien hinsichtlich der Kriterien Fahrbetrieb immer möglich, Reichweite bleibt erhalten, Universalität zu verschieden Akkusystemen, Baugröße miteinander, weist die Variante „**Ein DC-DC-Wandler pro Zelle**“ die größte Schnittmenge auf. Diese Topologie erfüllt vor allem den ersten und zweiten Punkt hervorragend. Hat eine Zelle beispielsweise den schlimmsten anzunehmenden Schaden (abgesehen vom Brandfall) - sie weist einen internen Kurzschluss auf - schaltet der betreffende Wandler ab und das gesamte Restsystem ist weiter 100% betriebsbereit. Somit bleibt auch die gesamte mögliche Restreichweite in jeden Fall verfügbar.
Ein weiterer großer Vorteil dieser Variante ist die Möglichkeit, Zellen unterschiedlicher Kapazität oder sogar unterschiedlicher Technologie miteinander zu kombinieren.
Angenommen, ein PKW wird vom Hersteller mit drei verschiedenen Reichweiten angeboten, da der Speicher die teuerste Komponente im Fahrzeug ist. Der Kunde entscheidet sich beim Kauf für die kleinste Version, da er nur Kurzstrecken fährt. Nach fünf Jahren besteht der Wunsch nach mehr Reichweite, weil beispielsweise der neue Arbeitgeber weiter entfernt liegt. Mit der Zell-Serienverschaltung könnte hier nur ein ganzzahliges Vielfaches der vorhandenen Zellenanzahl aufgerüstet werden. Erfahrungsgemäß wird es zu diesem Zeitpunkt eine neuere Zelltechnologie mit einer höheren Leistungs- und Energiedichte geben. Bei der Zell-Serienverschaltung müsste aber auf die veraltete Technologie mit wahrscheinlich schlechterem Preis/Leistungsverhältnis zurückgegriffen werden. Auch im Fall des vorzeitigen Ausfalls einer Zelle könnte nur die gleiche Zelltechnologie (gleiche Nennspannung, Nennkapazität etc.) verwendet werden.
Verwendet man hingegen einen DC/DC-Wandler pro Zelle, kann die eigentliche Zelle als „Blackbox“ betrachtet werden. Einziges Kriterium beim Austausch/Erweitern der Zellen ist die gleiche Ausgangsspannung des Wandlers (beispielsweise 400V). Es können einzelne Zellen, egal welcher Größe (alleinige Grenze ist die Größe des Akkufachs), Nennkapazität, Nennspannung, Zelltechnologie, Lade- Entladekennlinie, etc. verwendet werden.
Aus dieser Motivation heraus fällt die Entscheidung für einen praktischen Versuchsaufbau dieser Systemeinbindungstopologie.

3 Aufbau des DC-DC-Wandlers

In diesem Kapitel wird der Hardwareaufbau eines DC/DC-Wandlers beschrieben, der eingangsseitig an eine Zelle und ausgangsseitig an einen simulierten Antriebsstrang angeschlossen ist. Dabei begrenzt sich der Prototyp auf die wesentliche Funktion: dem Hochsetzen der Spannung mit möglichst hohem Wirkungsgrad. Nicht mit aufgenommen wird die Möglichkeit des bidirektionalen Betriebs, obwohl sie für das Laden der Zelle bzw. den Rekuperationsbetrieb erforderlich ist. Bei der Auswahl der Wandlertopologie wird diese Option aber berücksichtigt.

Wandlerparameter:

– max. Eingangsspannung	$U_{e,max}$	=	5V
– min. Eingangsspannung	$U_{e,min}$	=	2,5V
– max. Eingangsstrom	$I_{e,\,max}$	=	200A
– Ausgangsspannung	U_a	=	ca. 400V

Die minimale Eingangsspannung ergibt sich aus der tiefsten Entladeschlussspannung der meisten Lithium-Ionen-Zelltechnologien. Dieser Wandler wird für die vergleichsweise hohen Zellnennspannungen dimensioniert, weil diese Zelltechnologien nach heutigem Stand zukünftig die wahrscheinlichste Anwendung finden.

Aus der Dissertation, DC/DC-Wandler mit kleiner Eingangsspannung für photovoltaische, elektrochemische und thermoelektrische Zellen, werden die dort formulierten theoretischen Überlegungen auf den hier zu entwickelnden Wandler transferiert, da dort Wandler mit sehr ähnlichen Parametern untersucht wurden [4].

Als geeignetste Topologie kommt ein ungeregelter, hart schaltender, zweipulsiger Durchflusswandler mit Spannungsausgang und Spannungsverdoppler zum Einsatz.

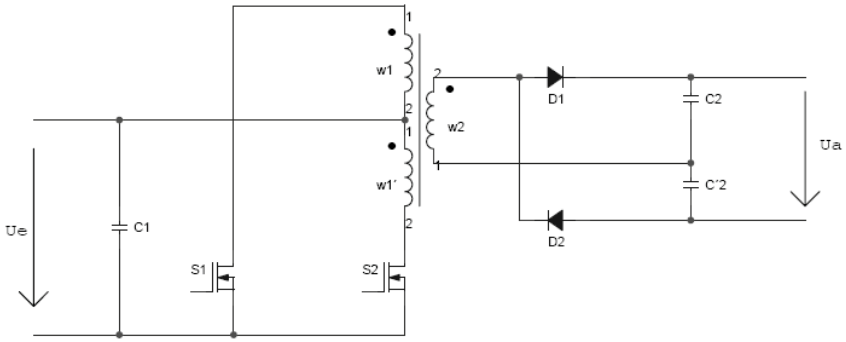

Bild 7: Hart schaltender zweipulsiger Durchflusswandler mit Spannungsausgang

Als Leistungsübertrager wurde ein nanokristalliner Schnittbandkern (Ringkerne, Vitroperm 500F) verwendet. Die Sättigungsinduktion dieses Materials liegt bei ca. 1,2T, die Permeabilität bei μ_e = 27000. Auf Grund dieser sehr großen Werte wird nur eine einzige Windung als Primärwicklung benötigt, um eine ausreichend große Hauptinduktivität zu erreichen und den Kern unterhalb der Sättigung zu betreiben. Durch die kurze Primärwicklung werden die ohmschen Verluste und sekundärseitig die Windungszahl und die Wicklungskapazität minimiert. Zwischen einem und vier Kurzschlusswicklungen sinkt die Streuinduktivität stark ab. Dieser Zusammenhang legt einen kreissymetrischen Aufbau des Wandlers um den Ringkern nahe.

Das Kernmaterial arbeitet im optimalen Arbeitspunkt bei einer, im Vergleich zu Feritten, relativ kleinen Taktfrequenz von 20kHz. Um die Schaltverluste in den Halbleiterschaltern möglichst zu minimieren, ist ebenfalls eine niedrige Taktfrequenz erstrebenswert. Aus diesen beiden Gründen wird die Taktfrequenz des Wandlers auf 20kHz festgelegt.
Bei dieser Frequenz sollte ein Blick auf den Skin-Effekt geworfen werden. Die frequenzabhängige Skintiefe δ bei 20kHz beträgt ca. 0,5mm, weshalb speziell die Primärwicklung in Hochfre-

quenzlitze ausgeführt wird. Um die Verluste möglichst zu minimieren und eine bessere mechanische Handhabung beim Wickeln zu erzielen, wird auch die Sekundärwicklung als HF-Litze realisiert.

Im nächsten Schritt muss ein passender „Leistungsschalter“ gefunden werden. Dabei wird die Auswahl direkt auf den Bereich der Power-MOSFETs begrenzt, da diese Bauteiltechnologie im Sperrspannungsbereich < 30V die mit Abstand geringsten Durchlasswiderstände besitzt. Vergleicht man verschiedene Power-MOSFETs in dieser Leistungsklasse miteinander, wird ersichtlich, dass der Durchlasswiderstand eines Typs, der den geforderten Nennstrom tragen kann, mehr als doppelt so groß ist, wie jener eines Typs mit halber Strombelastbarkeit. Aus diesem Grunde fällt die Wahl auf ein SMD-Transistorpaar pro Wicklung mit einem $R_{DS,on}$ von je 10 mΩ.

Da die Eingangskapazität nicht an einer Stelle, sondern von den symmetrisch um den Leistungsübertrager angeordneten Primärwicklungen benötigt wird und ein einziger Kondensator dieser Kapazität relativ groß sein würde, werden acht gleiche Kondensatoren ebenfalls symmetrisch um den Kern verteilt.

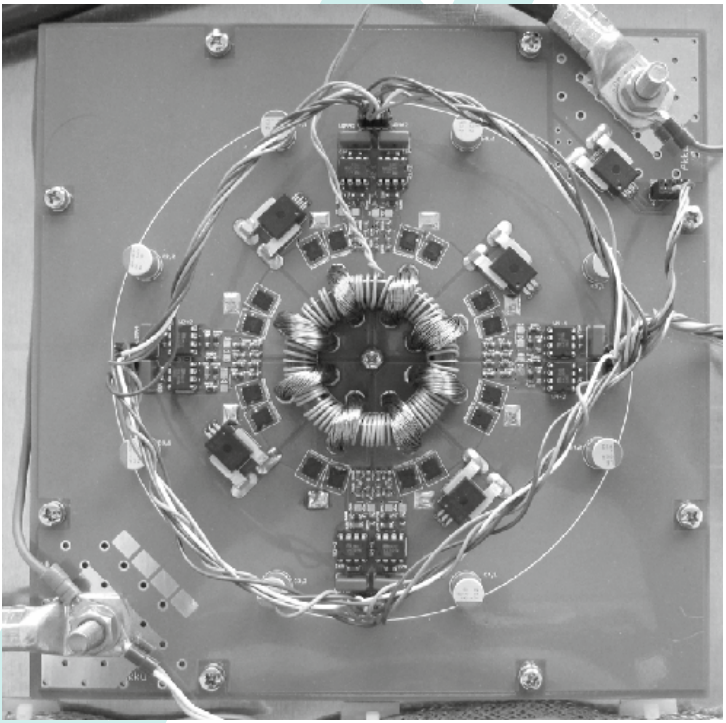

Bild 8: Prototypischer Aufbau des DC/DC-Wandlers

ALI 2012

Um eine Strommessung bzw. Überstromüberwachung in den Wandler zu implementieren, wird als letztes Bauteil im Primärhauptstrompfad ein Stromsensor mit möglichst kleinem Widerstand ausgewählt. Seit langem bewährt sind für solche Anwendungen die Shuntwiderstände. Sehr viel platzsparender und niederohmiger sind hingegen Hall-Effekt-Stromsensoren. Daher fällt die Wahl des Eingangsstromsensors auf einen derartigen Typ. Dieser hat einen bidirektionalen Strommessbereich von. Der Durchlasswiderstand beträgt 100µΩ und ein integrierter Messverstärker inklusive Temperaturkompensation ist ebenfalls vorhanden. Um die Ströme der einzelnen Wicklungen messen zu können, wird dieser Sensortyp in der +/- 50A Version zusätzlich an jedes der 4 Primärwicklungspaare eingebunden.

Wie auf dem Foto des Wandlers ersichtlich, wurden die Hochstromkontaktierungen der Zelle diagonal gegenüber angeordnet, damit sich eine möglichst symmetrische Stromverteilung auf der Leiterkarte einstellt. Die Lagendicke der Doppellagen-Leiterkarte beträgt 210µm, um auch hier die ohmschen Verluste zu minimieren. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, massive Kupferverbindungen parallel zur Leiterbahn zu verlegen, da an den entsprechenden Stellen Lötstopplack-Freiflächen vorgesehen sind. Die kreisförmige Anordnung der vielen Einzellitzen stellt die Verbindung zwischen den Treiberstufen bzw. den Stromsensoren und der Steuerung dar.

Die Spannungsbelastung der Gleichrichterdioden D_1 und D_2 ist gleich der Ausgangsspannung U_a. Da die Taktfrequenz des Wandlers bei 20kHz liegt und somit die Periodendauer 50µs beträgt, müssen die Dioden besonders schnellschaltend sein. Außerdem sollte die Durchlassspannung U_F kleinstmöglich sein, um auch hier die Verlustleistung zu minimieren.

Das zweite zu dimensionierende Bauteilpaar sind die Ausgleichskondensatoren. Die Spannungsbelastung pro Kondensator ist gleich der halben Ausgangsspannung. Da auch die Ausgangskondensatoren im Hauptstrompfad integriert sind, sollen sie einen möglichst kleinen Serienersatzwiderstand aufweisen. Deshalb werden Snubber Impulskondensatoren eingesetzt.

Um im ersten Schritt eine möglichst einfache Steuerung mit nur den Grundfunktionen zu realisieren, wird als Herzstück ein Strom-Modus-PWM-Kontroller verwendet. Dieser besitzt eine Gegentakt-Ausgangsbrücke, eine Überstromüberwachung, Soft-Start und eine bis 500kHz frei wählbare Taktfrequenz.

Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse der Wirkungsgradmessung des DC/DC-Wandlers. Der Wandler wurde bei 25°C Umgebungstemperatur betrieben und vor jeder Messwertaufnahme 15 Minuten in diesem Betriebszustand gehalten. Die Eingangsspannung wurde unmittelbar an den Hochstrom-Kabelschuhen gemessen, der Eingangsstrom mittels Messung und Umrechnung der Ausgangsspannung des +/- 200A Stromsensors. Die Ausgangsspannung und der Ausgangsstrom wurden unmittelbar am Ausgang des Sekundär-Leistungsteils mittels Volt- und Amperemeter gemessen.

U_e / V	I_e / A	U_a / V	I_a / A	η / %
2,50	5,77	347,80	0,04	93,88
3,67	8,29	511,20	0,06	97,40
4,21	9,56	585,20	0,07	96,06
4,21	50,62	575,30	0,36	97,01
3,28	102,32	433,10	0,73	93,69
2,92	132,30	374,30	0,95	91,89
4,27	133,91	563,80	0,95	93,23
3,11	140,88	398,70	1,00	91,03

Tabelle 1: Wirkungsgradmessung des DC-DC-Wandlers

Erwähnenswert ist, dass der Wandler ohne jegliche Kühlung auskommt. Es wurde eine Thermographie des DC/DC-Wandlers unter Nennlast mit I_e = 150A und U_e = 4,2V über eine Stunde durchgeführt. Die Umgebungstemperatur betrug 25°C und es wurde keine aktive Kühlung betrieben. Kein Bauteil wurde über 75°C warm, sodass die Umgebungstemperatur ohne weitere Maßnahmen noch um mindestens 30°C ansteigen darf.

4 Zusammenfassung

Abschließend kann festgehalten werden, dass die gesamten durchgeführten Überlegungen von den Messergebnissen der Inbetriebnahme positiv bestätigt werden. Es wird durch diese Topologie eine maximale Systemverfügbarkeit garantiert und die Zellen werden optimal betrieben. Ein Blick in die Zukunft für dieses Projekt zeigt viele Erweiterungs- und Optimierungsaufgaben. So muss der DC/DC-Wandler für einen bidirektionalen Betrieb erweitert werden, um einen Rekuperationsbetrieb zu gewährleisten bzw. die Zellen laden zu können. Dadurch können gleichzeitig die Gleichrichterdioden im Sekundärleistungsteil durch IGBTs oder MOSFETs ersetzt werden. Die voll funktionsfähige Version des DC/DC-Wandlers könnte höchstwahrscheinlich direkt auf die Anschlusspole der Zelle montiert werden, wodurch das Gewicht gesenkt wird. Durch die verringerte Verlustleistung in den Zuleitungen könnte der Wirkungsgrad noch einmal gesteigert werden.

Literatur:

[1] Jahn, J.: Lade- und Entladeregler für Akkumulatoren; Diplomarbeit Fraunhofer Institut für solare Energietechnik (kurz: ISE) und Fachhochschule Aalen, Freiburg, 1991 (Im Anschluss an die Arbeit durchgeführte Messreihe vom 19. bis 22.11.1991).

[2] Luszczynski, K.: Vergleich von Zell-Ladungsausgleichseinrichtungen und Aufbau einer elektromobilitäts-optimierten Topologie; Diplomarbeit FH Aachen, 2011.

[3] Marcinkowski, J.: Aktiver Ladungsausgleich bei Lithium-Ionen-Akkusätzen; Automobil-Elektronik, Heft Oktober 2010.

[4] Meyer, T.: DC/DC-Wandler mit kleiner Eingangsspannung für photovoltaische, elektrochemische und thermoelektrische Zellen; Dissertation, VDI Verlag GmbH, Fortschrittberichte VDI Reihe 21, Nr. 288, Freiburg, 2000.