

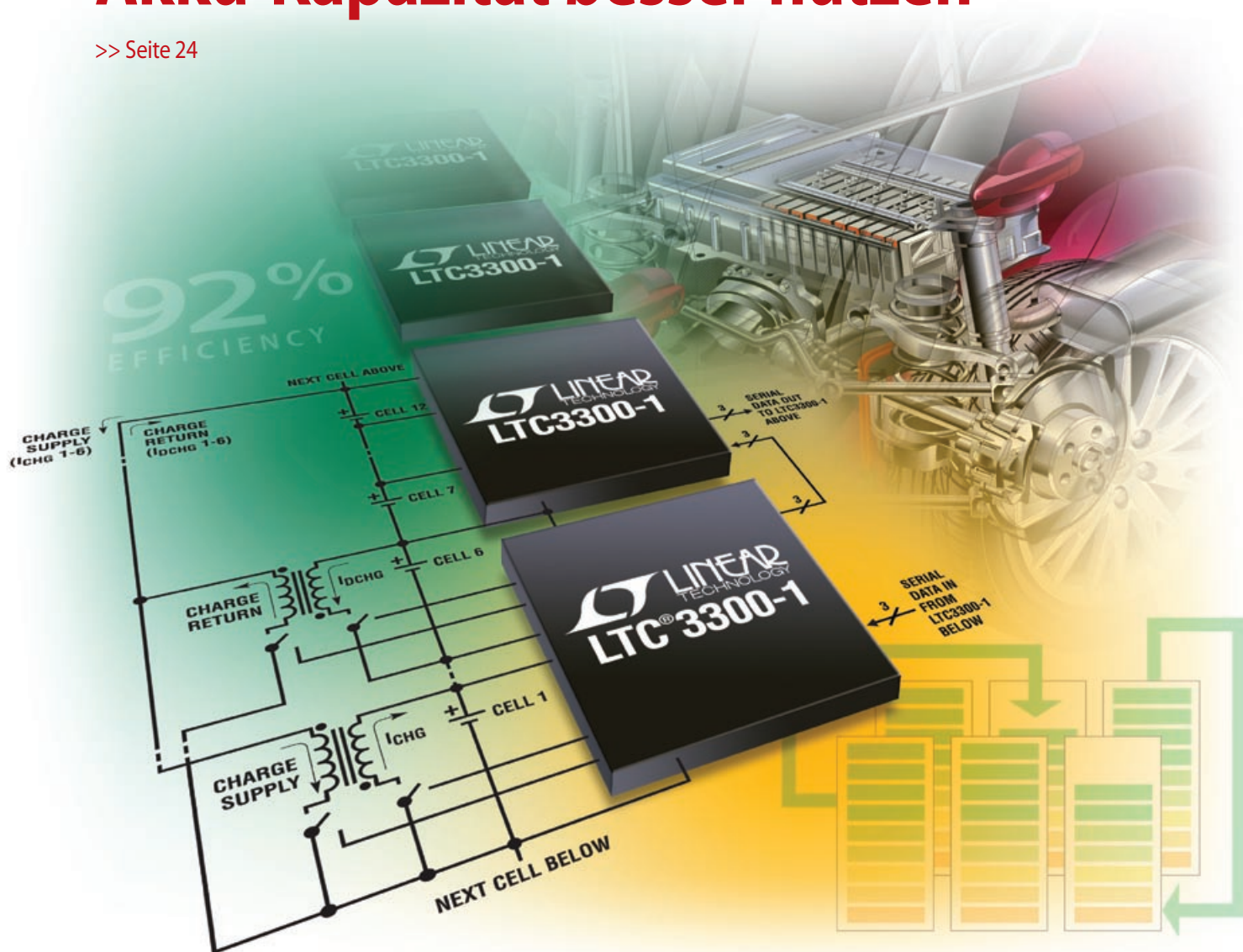
# Elektronik automotive

Fachmedium für professionelle Automobilelektronik

Aktive Zellen-Symmetrierung:

## Akku-Kapazität besser nutzen

>> Seite 24



Kabelbäume ab-  
specken mit neuen  
Sensoren >> Seite 32

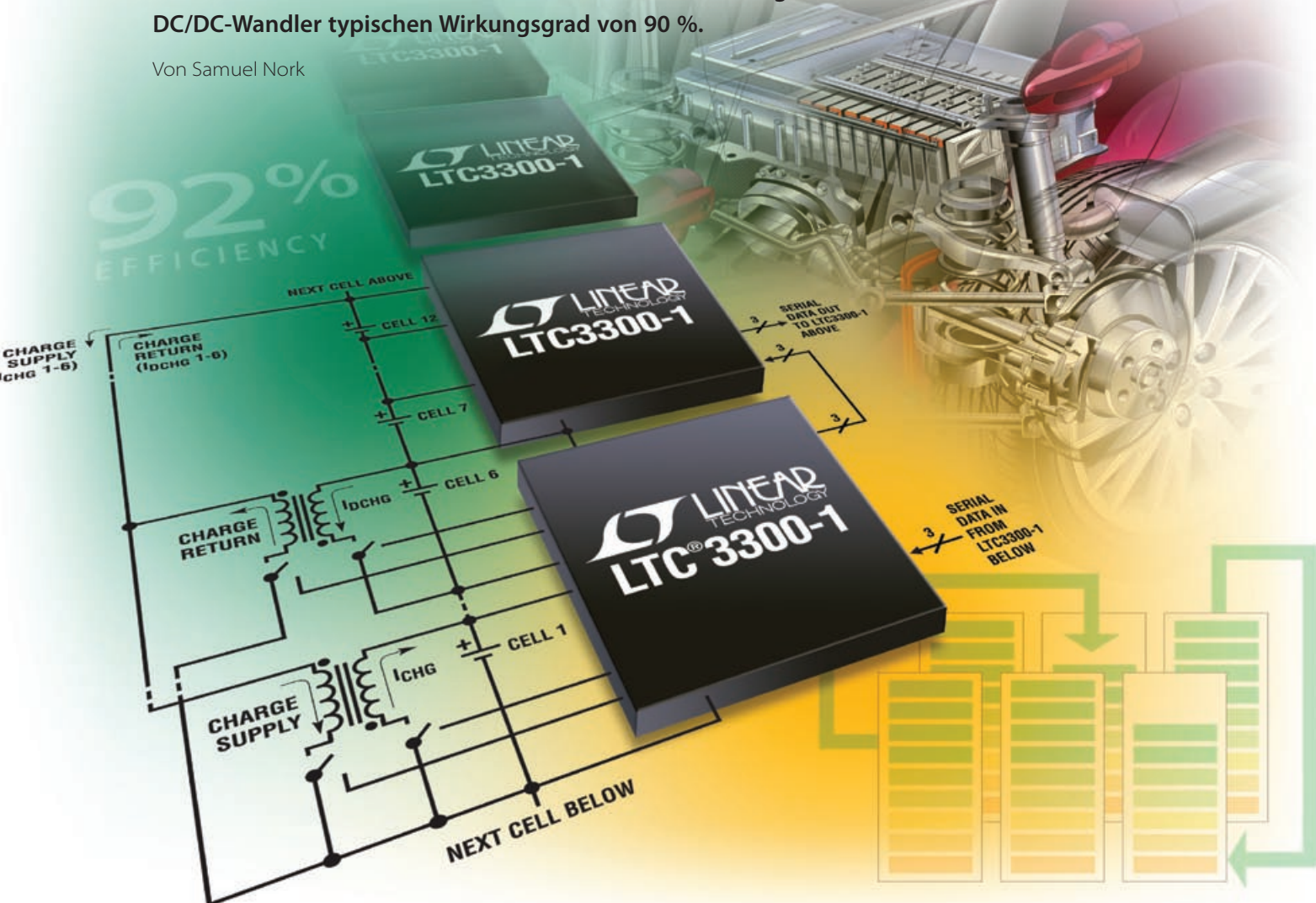
Sensoren:  
Sinnesorgane des  
Autos >> Seite 36

Open-Source-Software  
im Auto?  
>> Seite 39

# Aktive Zellen-Symmetrierung

Ein Akku ist so gut wie seine schwächste Zelle – insbesondere dann, wenn die Zellen in Reihe geschaltet sind. Die nutzbare Kapazität der Akkus in einem Strang wird von einer einzigen Zelle dominiert, der schwächsten. In allen anderen Zellen bleibt ein Teil der Kapazität ungenutzt. Symmetrierschaltungen sollen den Ladezustand zwischen den einzelnen Zellen angleichen. Eine passive Symmetrierung wandelt überschüssige Ladung in Wärme – Wirkungsgrad: 0 %. Die von Linear Technology entwickelte aktive, bidirektionale Symmetrierung verschiebt Ladung von Zellen mit höherem Ladezustand zu Zellen mit niedrigerem Ladezustand, mit einem für DC/DC-Wandler typischen Wirkungsgrad von 90 %.

Von Samuel Nork

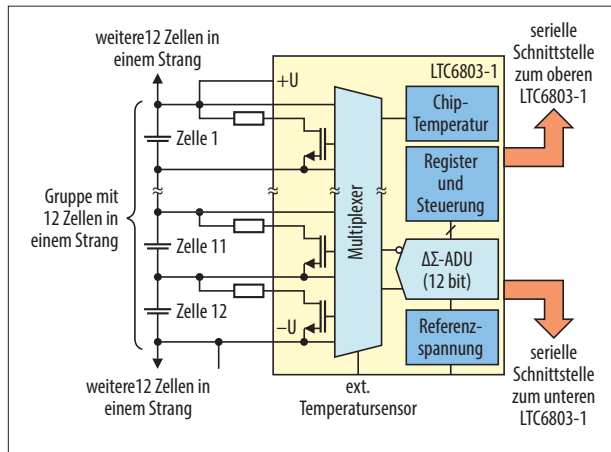


Die einzelnen Zellen in einer einem Akkusatz sind symmetriert, wenn jede einzelne Zelle den gleichen Ladezustand (SOC, state of charge) aufweist. SOC kennzeichnet den aktuellen Ladezustand einer einzelnen Zelle, bezogen auf ihre maximale Kapazität. Ein 10-Ah-Akku mit einer Ladung von 5 Ah hat folglich einen Ladezustand von 50 %. Alle Zellen eines Akkusatzes

müssen innerhalb eines bestimmten SOC-Bereichs gehalten werden, um eine Verkürzung ihrer Lebensdauer oder gar ihre Zerstörung zu verhindern. Die erlaubten minimalen und maximalen SOC-Werte variieren je nach Aufbau der Zellen und Applikation. In Anwendungen wie z.B. Elektrofahrzeugen, für die eine lange Betriebszeit am wichtigsten ist, müssen alle Zellen im Bereich zwischen

einem minimalen SOC von 20 % und maximal 100 % arbeiten. Applikationen wie z.B. stationäre Energiespeicher, die eine möglichst hohe Lebensdauer fordern, können den SOC-Bereich auf minimal 30 % und maximal 70 % beschränken. Die wichtigste Rolle des Batteriemanagementsystems (BMS) ist es, jede einzelne Zelle im Akkusatz sorgfältig zu überwachen und sicherzustellen, dass keine der





**Bild 1.** Bei der passiven Symmetrierung wird parallel zur Zelle ein Widerstand geschaltet, um die Zelle zu entladen und einen Teil des Ladestroms an der Zelle vorbei zu leiten. Sie lässt sich nur während des Ladevorganges nutzen.

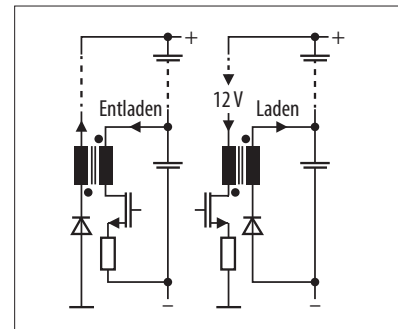
Zellen über den maximalen SOC-Grenzwert geladen und unter den minimalen SOC-Grenzwert entladen wird.

Bei parallel verbundenen Zellen kann üblicherweise davon ausgegangen werden, dass sich die Ladezustände der Zellen selbstständig angleichen, solange die Zellen leitend verbunden sind. Als ebenso gesichert gilt die Annahme, dass der Ladezustand von in Reihe verbundenen Zellen aufgrund mehrerer Faktoren dazu tendiert, mit der Zeit immer weiter voneinander abzuweichen. Solche graduellen SOC-Änderungen können wegen Temperaturunterschieden in den einzelnen Zellen eines Akkusatzes oder aufgrund von Zelle zu Zelle abweichender Impedanz, Selbstentladungsrate oder Ladeakzeptanz auftreten. Obwohl

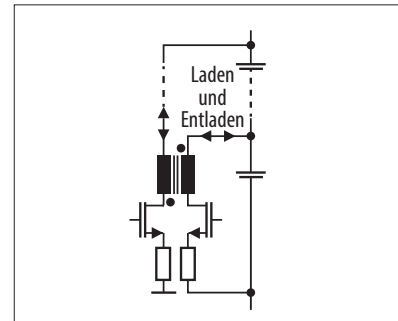
zwischen den Zellen ist der hauptsächliche Grund für das Symmetrieren von in Reihe geschalteten Zellen. Üblicherweise ist eine passive bzw. dissipative Symmetrierung ausreichend, um den Ladezustand in einem Akkusatz mit mehreren Zellen mit eng tolerierter Kapazität auszugleichen.

Wie in **Bild 1** dargestellt, ist die Schaltung für eine passive Symmetrierung einfach und preiswert. Die passive Symmetrierung gleicht den Ladezustand der einzelnen in Reihe geschalteten Zellen dadurch aus, dass die Ladung in allen Zellen so reduziert wird, bis sie mit dem Ladezustand der Zelle mit der geringsten Ladung übereinstimmt. Nachteilig ist, dass die passive Symmetrierung sehr langsam arbeitet und unerwünschte

die Lade- und Entladeströme des Akkus dazu tendieren, die Ladezustandsabweichung zwischen den Zellen zu verringern, wird der Unterschied im Ladezustand solange unvermindert anwachsen, bis der Ladezustand der Zellen periodisch angeglichen wird. Das Kompensieren von graduellen Änderungen im Ladezustand



**Bild 2.** Einfache Wandlerschaltungen eignen sich für die aktive Symmetrierung, bei der Ladung aus einer Zelle in eine andere verschoben wird. Sie können die Ladung jedoch nur in einer Richtung transportieren – entweder zum Laden oder Entladen einer Zelle.



**Bild 3.** Mit der aktiven bidirektionalen Symmetrierung kann eine Zelle gezielt geladen und entladen werden.

Wärme im Akkusatz erzeugt. Die passive Symmetrierung kann allerdings keine Fehler der Ladezustandsdiagnose aufgrund unterschiedlicher Kapazitäten effektiv ausgleichen.

Alle Zellen verlieren an Kapazität, wenn sie altern und jede Zelle altern unterschiedlich. Da der Lade- und Entladestrom durch alle in Reihe geschalteten Zellen eines Akkusatzes fließt, wird die nutzbare Kapazität des Akkus von der Zelle mit der geringsten Kapazität in der Reihenschaltung bestimmt. Nur Methoden zur aktiven Symmetrierung (**Bilder 2 und 3**) können Ladung zwischen den Zellen verteilen und damit die Auswirkung des Kapazitätsverlusts einer Zelle auf die ganze Reihenschaltung verringern.

### Ungleich geladene Zellen reduzieren die Betriebszeit

Die Fehlanpassung zwischen den einzelnen Akkuzellen, sowohl bezüglich Kapazität als auch des Ladezustands, kann die nutzbare Kapazität des Akkusatzes deutlich reduzieren, wenn der Ladezustand

Zelle Nr.	Startbedingungen		Nach Entladen		Nach Schnellladen	
	Kapazität [Ah]	Ladezustand (SOC) [%]	Ladung [Ah]	Ladezustand (SOC) [%]	Ladung [Ah]	Ladezustand (SOC) [%]
1	110	100	47	43	77	70
2	100	100	37	37	67	67
3	100	100	37	37	67	67
4	100	100	37	37	67	67
5	100	100	37	37	67	67
6	100	100	37	37	67	67
7	100	100	37	37	67	67
8	100	100	37	37	67	67
9	100	100	37	37	67	67
10	90	100	27	30	57	63
Summe	1.000		370		670	

**Tabelle 1.** Ein Akkusatz mit 10 Zellen in Reihenschaltung mit einer Kapazitätstoleranz von  $\pm 10\%$ . Ohne Symmetrierung der Ladezustände lässt sich die Gesamtkapazität des Akkus nicht maximal nutzen. Beim Entladen sorgt die kleinste Zelle (Nr. 10) dafür, dass der Akku als „leer“ diagnostiziert wird und beim Laden meldet die größte Zelle (Nr. 1) vor allen anderen den Vollladezustand. Statt 400 Ah (700 Ah – 300 Ah) stehen so nur 670 Ah – 370 Ah = 300 Ah zur Verfügung.

Zelle Nr.	Startbedingungen		Nach Entladen		Nach Schnellladen	
	Kapazität [Ah]	Ladezustand (SOC) [%]	Ladung [Ah]	Ladezustand (SOC) [%]	Ladung [Ah]	Ladezustand (SOC) [%]
1	110	100	33	30	77	70
2	100	100	30	30	70	70
3	100	100	30	30	70	70
4	100	100	30	30	70	70
5	100	100	30	30	70	70
6	100	100	30	30	70	70
7	100	100	30	30	70	70
8	100	100	30	30	70	70
9	100	100	30	30	70	70
10	90	100	27	30	63	70
Summe	1.000		300		700	

Tabelle 2. Der gleiche Akkusatz wie in Tabelle 1 mit aktiver Zellsymmetrierung beim Laden und Entladen. Unabhängig von der Kapazität einer Zelle wird jede Zelle bis zum vorgesehenen Ladezustand entladen und geladen. Damit kann die Kapazität des Akkusatzes maximal ausgenutzt werden:  $700 \text{ Ah} - 300 \text{ Ah} = 400 \text{ Ah}$ .

der Zellen nicht symmetriert wird. Das Maximieren der nutzbaren Kapazität des Akkusatzes erfordert, dass die Ladungen in den einzelnen Zellen sowohl während des Ladens als auch beim Entladen ausgeglichen werden.

Der in Tabelle 1 beispielhaft gezeigte Akku besteht aus einer Reihenschaltung von zehn Zellen, jeweils mit einer Nennkapazität von 100 Ah und einer Kapazitätstoleranz von  $\pm 10\%$ . Für die Betrachtung sind nur die Zellen mit der höchsten und der niedrigsten Kapazität ausschlaggebend. Dieser Akkusatz wird zwischen den Grenzwerten SOC = 30 % und SOC = 70 % geladen und entladen. Wird der

Ladezustand zwischen den Zellen nicht angeglichen, so reduziert sich die nutzbare Kapazität des Akkus bereits nach einem vollständigen Lade/Entladezyklus, im Vergleich zur theoretischen nutzbaren Kapazität des Akkusatzes, um 25 %. Die passive Symmetrierung könnte theoretisch den Ladezustand jeder Zelle während des Ladens ausgleichen, aber nicht verhindern, dass die Zelle mit der kleinsten Kapazität (Zelle Nr. 10) beim Entladen den 30 %-SOC-Grenzwert vor den anderen Zellen erreicht. Eine passive Symmetrierung während des Ladens kann nicht verhindern, dass während des Entladens ein Teil der maximal möglichen Kapazität

nicht genutzt werden kann und somit „verloren“ geht. Nur eine aktive Symmetrierung der Ladezustände kann die maximale Kapazität des Akkusatzes auch tatsächlich nutzen, indem sie während der Entladung innerhalb der Reihenschaltung Ladung von Zellen mit hohem Ladezustand auf Zellen mit niedriger Ladung umverteilt.

Die Wirkung einer „idealen“ aktiven Symmetrierung zeigt Tabelle 2. Während des Entladevorganges muss aus der Zelle mit der höchsten Kapazität (Zelle Nr. 1) mehr Ladung entnommen werden als bei den Zellen mit Nennkapazität und diese Ladung muss an die Zelle mit der niedrigsten Kapazität (Zelle Nr. 10) übergeben werden. Sonst erreicht die Zelle mit der kleinsten Kapazität (Zelle Nr. 10) ihren minimalen Ladezustand (30 %) vor den anderen Zellen und die Entladung des Akkus muss gestoppt werden, um eine schädliche Tiefentladung zu vermeiden. Umgekehrt muss während der Lade-Phase des Akkusatzes Ladung aus der Zelle mit der kleinsten Kapazität (Zelle Nr. 10) genommen und an die Zelle mit der höchsten Kapazität (Zelle Nr. 1) übergeben werden – sonst erreicht die Zelle mit der kleinsten Kapazität (Zelle Nr. 10) ihre maximale Ladungsgrenze von 70 % zu erst und der Ladezyklus muss gestoppt werden bevor die übrigen Zellen bis an ihren SOC-Grenzwert geladen sind.

Durch die unterschiedliche Alterung der Zellen in einem Akkusatz, verändern sich zwangsläufig auch die Kapazitäten der einzelnen Zellen unterschiedlich. Dies hat zur Folge, dass die Kapazität der Zellen nicht maximal ausgenutzt werden kann, sondern sich an den Zellen mit der größten und kleinsten Kapazität orientiert. Nur eine aktive Symmetrierung kann dann eine „Kapazitätserholung“ bewirken, indem Ladung von Zellen mit hohem Ladezustand auf Zellen mit geringerem Ladezustand umverteilt wird. Um die Kapazität eines Akkusatzes über die gesamte Lebensdauer maximal auszunutzen, erfordert es eine aktive Symmetrierung. Nur damit lassen sich die einzelnen Zellen effektiv laden und entladen, um einen gleichmäßigen Ladezustand aller Zellen im Akkusatz zu erreichen.

### Aktive bidirektionale Zellsymmetrierung mit hohem Wirkungsgrad

Der Controller LTC3300 (Bild 4) kann den Ladezustand von bis zu sechs in Reihe

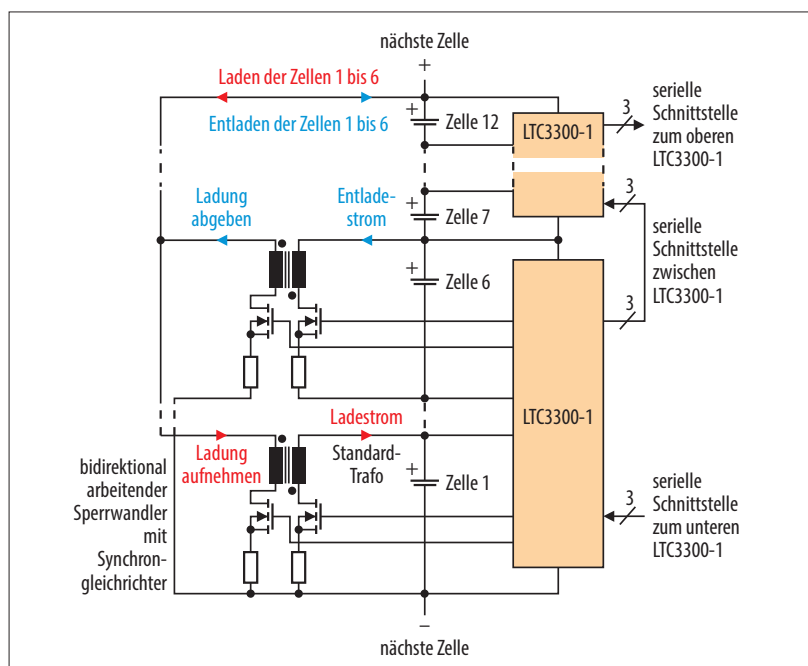
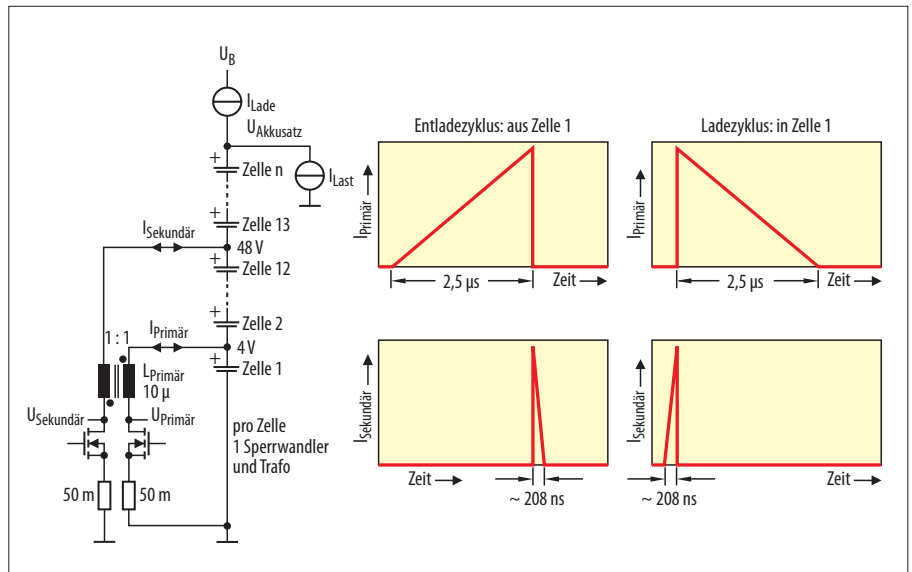


Bild 4. Ein LTC3300-1 steuert sechs Symmetrierstufen – bidirektional arbeitende Sperrwandler mit Synchrongleichrichter – und kann für große Akkusätze mit weiteren LTC3300-1 kaskadiert werden.

benachbarten Zellen verschoben wird. Die Entscheidung zur Zellsymmetrierung muss von einem separaten Überwachungs-IC getroffen werden, das als übergeordneter Controller die Symmetrier-Algorithmen handhabt und den LTC3300 steuert. Hierbei kann Ladung von einer ausgewählten Zelle auf eine Gruppe von zwölf oder mehr benachbarten Zellen verteilt werden, um eine einzelne Zelle gezielt zu entladen. Genauso wird in umgekehrter Richtung Ladung aus einer Gruppe von zwölf oder mehr benachbarten Zellen zu einer bestimmten Zelle transferiert, um diese eine Zelle gezielt zu laden. Alle Symmetrier-Bausteine können simultan in jede Richtung arbeiten, um die Zeitspanne für die Symmetrierung des Ladezustandes zu minimieren. Alle Steuerbefehle für das Verschieben von Ladung werden über einen störfesten SPI-Bus transportiert. Die SPI-Interfaces der ICs sind für eine Kaskadierung ausgelegt, so dass Akkusätze mit beliebig vielen Zellen in Reihenschaltung möglich sind.

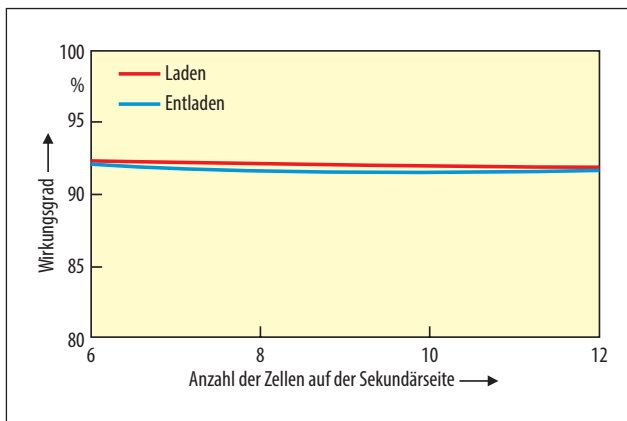
Jede Symmetrierschaltung im LTC3300 steuert eine Sperrwandlerstufe



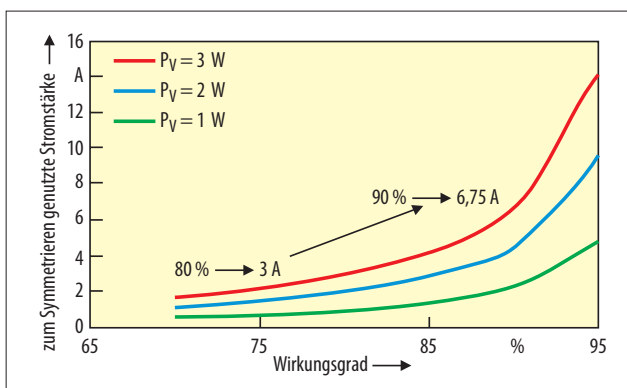
**Bild 5.** Die Sekundärseite der Sperrwandler-Trafos einer Sechsergruppe – sechs Zellen mit einem LTC3300 – arbeitet auf den positiven Anschluss der darüber angeordneten Sechsergruppe, um den Ladezustand der Zellen zu symmetrieren.

geschalteten Li-Ionen-Zellen angleichen. Diese Ladezustände der Zellen werden symmetriert, indem Ladung zwischen einer ausgewählten Zelle und einer Untergruppe von bis zu zwölf oder mehr

mit Synchrongleichrichter, die an der Lückgrenze betrieben wird, um eine Ladung und Entladung der einzelnen Zelle mit hohem Wirkungsgrad zu erreichen (Bild 5). Für jede Zelle wird je ein Sperr-



**Bild 6.** Der Wirkungsgrad der aktiven, bidirektionalen Symmetrierung ist weitgehend unabhängig von der Anzahl der auf der Sekundärseite überbrückten Zellen (gemessen mit Zellenspannung 3,6 V und Lade-/Entladestrom 2,5 A).



**Bild 7.** Mit steigender Stromstärke steigt die Verlustleistung in der aktiven, bidirektionalen Symmetrierschaltung. Dennoch arbeitet die Schaltung mit hohem Wirkungsgrad.

wandler mit eigenem Trafo benötigt. Die Primärseite jedes Trafos ist mit jeweils einer Zelle verbunden. Die Sekundärseiten von zwölf oder mehr Trafos, die zu Zellen aus einem Strang gehören, sind parallel verschaltet und überbrücken die Reihenschaltung aus den zwölf oder mehr zugehörigen Zellen. Die Anzahl der in Reihe geschalteten Zellen auf der Sekundärseite der Trafos wird nur von der maximal zulässigen Betriebsspannung der Komponenten begrenzt. Die Lade- und Entladestromstärke für das Symmetrieren der Zellen wird über einen externen Widerstand begrenzt – maximal sind 10 A möglich. Ein hoher Wirkungsgrad wird durch einen MOSFET als Synchrongleichrichter und die sorgfältige Auswahl der Komponenten erreicht. Die einzelnen Symmetrierschaltungen werden über den Prozessor des Batteriemanagementsystems aktiviert und bleiben solange aktiv, bis das Batteriemanagementsystem den Ladungstransport stoppt oder ein Fehler eintritt.

Wie in **Bild 6** und **7** gezeigt, erreicht das vom LTC3300 gesteuerte bidirektionale aktive Zellsymmetrieren sowohl beim Laden als auch Entladen einen Wirkungsgrad von >90 %. Im Vergleich zu einer Symmetrierschaltung mit einem Wirkungsgrad von 80 % kann die Schaltung mit dem LTC3300 bei gleicher Verlustleistung, mit einem mehr als doppelt so großen Ausgleichsstrom arbeiten. Darüber hinaus vergeudet eine Symmetrierschaltung mit höherem Wirkungsgrad weniger Ladung aus den Zellen, so dass die Ladungsumverteilung und damit der gesamte Ladevorgang schneller erfolgt.

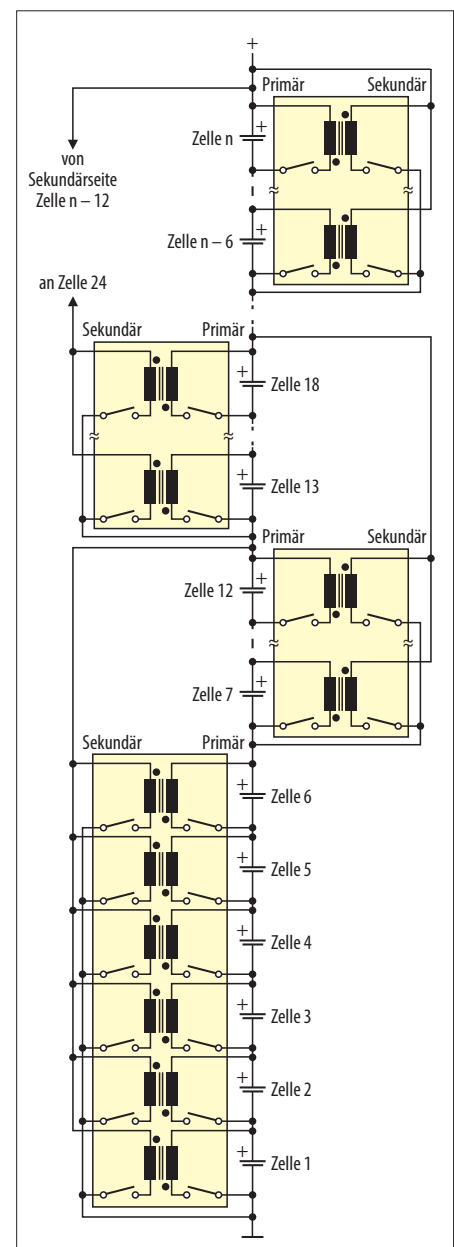
### Nachbarschaftshilfe: Ladung auf benachbarte Zellen verteilen

Um die Ladezustände der Zellen in einem Akkusatz zu symmetrieren, wird die Sammelleitung der Sekundärseiten einer Gruppe von sechs Zellen, die von einem LTC3300 gesteuert wird, über die

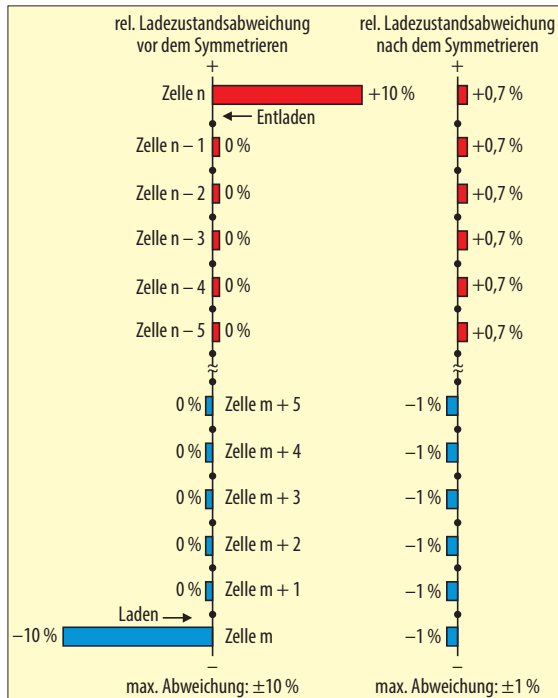
### Der Wirkungsgrad der Symmetrierschaltung ist entscheidend

Einer der größten Feinde für einen Akku ist Wärme. Hohe Umgebungstemperaturen verringern die Lebenszeit und die Leistung eines Akkusatzes. Unglücklicherweise müssen in Hochstrom-Akkus die Symmetrierströme auch hoch sein, um möglichst viel Ladung entnehmen zu können und so die Betriebszeit zu maximieren oder ein Schnellladen zu ermöglichen. Ein schlechter Wirkungsgrad der Symmetrierschaltung – in diesem Beispiel Sperrwandler – führt zu unerwünschter Wärmeentwicklung im Akkusatz und muss bei der Entwicklung berücksichtigt werden. So kann beispielsweise die Anzahl der gleichzeitig arbeitenden Symmetrierstufen reduziert werden oder es werden zusätzliche Kühlmaßnahmen eingeplant.

sechs Zellen geführt, die im Strang vorgeschaltet sind (**Bild 8**). Durch diese Überlappung auf den positiven Anschluss der vorgeschalteten Gruppe aus sechs Zellen ist es möglich, Ladung bidirektional zwischen benachbarten Gruppen zu je sechs Zellen zu transferieren. Durch diese Überlappung können sowohl die benachbarten Zellen oberhalb als auch die Zellen unterhalb einer Sechsergruppe für den Ladungsaustausch verwendet werden.



**Bild 8.** Der LTC3300 fasst sechs Zellen zu einer Gruppe zusammen. Die Sekundärseiten der Trafos einer Gruppe sind parallel geschaltet und mit dem positiven Anschluss der übergeordneten Zellengruppe verbunden. Dadurch wird eine Überlappung erreicht, die den Ladungstransfer zu beiden benachbarten Zellengruppen erlaubt.



**Bild 9.** Beispiel für die Wirkungsweise der aktiven, bidirektionalen Zellsymmetrierung mit dem LTC3300. Die Ladezustände der Zellen (n und m) mit der größten Abweichung werden vom LTC3300 angeglichen, indem die überschüssige Ladung auf die benachbarten Zellen verteilt (oben) oder fehlende Ladung aus den benachbarten Zellen entnommen (unten) wird, bis die Ladezustände aller Zellen einer Gruppe (sechs Zellen) gleich sind.

Diese Flexibilität ist hilfreich, um den Ausgleichsalgorithmus zu optimieren. Allgemein wird angenommen, dass überlappende Symmetrierschaltungen Ladung von einer Zelle oben im Strang zu einer Zelle, die unten im Strang platziert ist, nur mit hohen Verlusten umverteilen können. Schließlich müsste die Ladung viele Wandlerstufen durchlaufen. In der Praxis jedoch wird die Ladung nie so weit über den Zellenstrang transportiert. Das Beispiel in **Bild 9** zeigt, dass der größte Teil der Ladung, die für eine Symmetrierung verschoben werden muss, einfach zu oder von den Zellen erfolgt, die derjenigen Zelle am nächsten sind, deren Ladezustand anzupassen ist. Durch das Überlappen von Zellengruppen und dem bidirektionalen Ladungstransport muss die Symmetrierschaltung mit dem LTC3300 keine Ladung zwischen weit entfernten Zellen eines Stranges transferieren – für den Ausgleich sorgen die Nachbarzellen.

### Sicherheit steht an erster Stelle

Im Symmetrierer-IC LTC3300 wurden Sicherheitsfunktionen integriert, um ei-

nen fehler- und störungsfreien Betrieb während des Ausgleichs der Ladezustände und um eine möglichst hohe Zuverlässigkeit zu erreichen. Per CRC (cyclic redundancy check) werden alle eintreffenden und ausgehenden Daten überprüft. Weiteren Schutz vor fehlerhaften Daten und Befehlen bieten Watchdog-Timer sowie die Prüfung der geschriebenen Daten durch einen anschließenden Lesebefehl. Eine programmierbare Begrenzung des magnetischen Flusses stellt sicher, dass Strom-Messfehler während der Symmetrierung nicht dazu führen, dass die Stromstärke über den zulässigen Maximalwert ansteigt.

Der LTC3300 prüft außerdem die Anschlüsse an jeder Zelle auf Über- und Unterspannung (Primärseite) und den sekundärseitigen Anschluss auf Überspannung. Dadurch wird eine Beschädigung der Symmetrierer-ICs auch bei Verdrahtungsfehlern während der Montage der Zellen und des Akkusatzes vermieden.

hs



### Samuel Nork

kam 1988 als leitender Ingenieur zu Linear Technology nach Milpitas, Kalifornien. 1994 baute er ein Entwicklungszentrum für analoge ICs auf, das er auch heute noch als Direktor leitet. Sein Team mit fast 100

Mitarbeitern entwickelt analoge ICs im Bereich Power Management. Er hat selbst zahlreiche Stromversorgungs-ICs entwickelt und ist an sieben Patenten beteiligt. Er studierte am Dartmouth College in Hanover, New Hampshire, USA, mit den Abschlüssen als Bachelor of Arts und Bachelor of Engineering.

[snork@linear.com](mailto:snork@linear.com)