

Unterbrechungsfreie Stromversorgung

Lithium-Ionen-Batterietechnologien für sichere und langlebige DC-USV-Systeme im Vergleich



Die unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) von Systemen und Komponenten in der Medizin- und Labortechnik ist oftmals von absolut essentieller oder gar lebenserhaltender Bedeutung. Mess-, Steuer- und Regelungstechnik, Embedded-PCs, Robotik, Stellantriebe, Kameras, Sensorik oder mobile Systeme müssen zuverlässig vor Ausfällen, Flicker oder Spannungseinbrüchen der DC-Stromversorgung mit 12, 24 oder 48 V geschützt werden.

Neben großen zentralen Notstromversorgungen kommen oftmals dezentrale und integrierte DC-USV-Systeme mit modularem Aufbau zum Einsatz. In Kombination mit der Lade- und Steuerungseinheit gilt es, einen passenden Energiespeicher auszuwählen. Faktoren wie Baugröße, Leistungs- und Energiedichte, Temperaturbereich, Lebensdauer, Sicherheit sowie Initial- und Folgekosten spielen bei dieser Abwägung eine wichtige Rolle. Im Wesentlichen

sind folgende Energiespeicher für den Einsatz in DC-USV-Systemen relevant: Klassische Blei-Gel-Batterien, Reinblei-Zinn-Batterien (Cyclon-Zellen), Supercaps (Ultrakondensatoren), konventionelle Lithium-Ionen-Zellen (u. a. LCO und NMC) sowie Lithium-Eisen-Phosphat-Zellen (LiFePO₄).

Große Batterie-Auswahl

Betrachtet man die verschiedenen Arten von Lithium-Ionen-Batterien, stellt sich die Frage, unter welchen Bedingungen die Verwendung dieser Batterietechnologie für DC-USV-Systeme sinnvoll erscheint und welche Vor- und Nachteile die unterschiedlichen Materialkombinationen aufweisen. Diese und weitere Fragestellungen beantwortet der vorliegende Fachbeitrag und bietet Systementwicklern Entscheidungshilfen bei der Auswahl eines passenden Lithium-Ionen-Energiespeichers für unterbrechungsfreie Stromversorgungen.

Lithium-Ionen-Batterietechnologie – kompakt und leistungsfähig

Für die Energieversorgung von DC-USV-Systemen mit längeren Überbrückungszeiten (bis zu meh-

Autoren:
Apostolos Baltos und
Jochen Kessens, Designing
Engineers

Bicker Elektronik GmbH
info@bicker.de
www.bicker.de

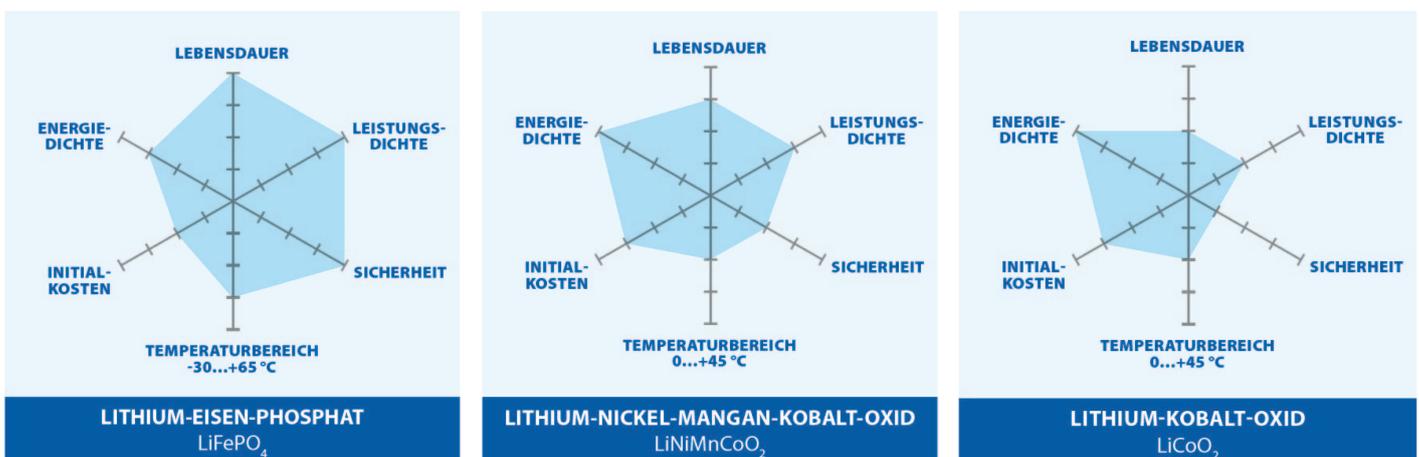


Bild 1: Lithium-Ionen-Energiespeicher im direkten Vergleich: LiFePO₄, Lithium-Eisen-Phosphat (LFP), LiNiMnCoO₂ Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid (NMC) und LiCoO₂, Lithium-Kobalt-Oxid (LCO). Die Eigenschaften basieren auf herstellerspezifischen Beispielen. Die jeweiligen Parameter im Netzdiagramm werden von innen nach außen besser

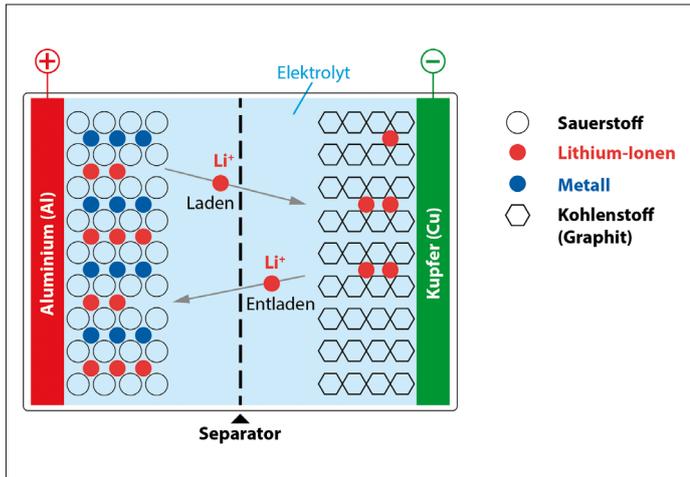


Bild 2: Schematischer Aufbau einer Lithium-Ionen-Zelle (stark vereinfacht)

renen Stunden) kommen je nach Leistungsbedarf der Applikation meist Energiespeicher auf Blei- oder Lithium-Basis mit hoher Kapazität zum Einsatz. Als Nachfolger der herkömmlichen Blei-Schwefelsäure-Batteriechemie hat sich mittlerweile die moderne Lithium-Ionen-Batterietechnologie durchgesetzt. Zwar sind diese Energiespeicher in der Anschaffung teurer als klassische Blei-Gel-Batterien, jedoch lassen sich mit Lithium-Ionen-Batterien (Li-Ion) besonders hohe Energiedichten mit einer Platz- und Gewichtseinsparung von bis zu 75 % realisieren. Lithium ist das leichteste Metall des Periodensystems und besitzt gleichzeitig ideale elektrochemische Eigenschaften für die Realisierung hoher spezifischer Energiedichten (Wh/kg). Ebenfalls vielfach größer als bei Blei-Gel-Batterien ist die Anzahl der Ladezyklen, die realisierbare Entladetiefe DoD (Depth of Discharge) sowie die Lebensdauer.

Neben zahlreichen weiteren Materialkombinationen haben sich unter anderem drei Kathodenmaterialien für Energiespeicher etabliert. Im Bereich der Eisenphosphate ist dies LiFePO_4 Lithium-Eisen-Phosphat (LFP), im Bereich der Lithium-Metalloxid-Verbindungen u. a. LiNiMnCoO_2 Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid (NMC) und LiCoO_2 Lithium-Kobalt-Oxid (LCO). Die verschiedenen Kathodenmaterialien ent-

sprechender Lithium-Ionen-Batteriezellen bedingen neben unterschiedlichen Nennspannungen eine Vielzahl weiterer Eigenschaften wie die Netzdiagramme in Bild 1 zeigen.

Aufbau und Funktionsweise von Lithium-Ionen-Zellen

Eine Lithium-Ionen-Zelle (Bild 2) besteht vereinfacht gesagt aus einer Kathode und einer Anode umgeben von einer extrem reinen und wasserfreien Elektrolyt-Flüssigkeit, welche für den optimalen Transport der Lithium-Ionen verantwortlich ist (bei einem festen Elektrolyt spricht man von Lithium-Polymer-Batterien).

Die Anode besteht aktuell meist aus Kohlenstoff (C) in Form von Graphit zur Einlagerung der Lithium-Ionen aus dem Aktivmaterial der Kathode. Der mikroporöse Separator, welcher nur für die Lithium-Ionen durchlässig ist, trennt die Kathode (mit Aluminiumelektrode) elektrisch von der Anode (mit Kupferelektrode). Die beiden Elektroden werden beim Ladevorgang über eine Spannungsquelle verbunden, welche einen externen Elektronenfluss von der Kathode zur Anode in Gang setzt. Durch die Entfernung von Elektronen aus den Kathodenmaterial-Verbindungen beginnen sich die Lithium-Atome in der Kathode zu ionisieren. Die positiv geladenen Lithium-Ionen (Li^+)

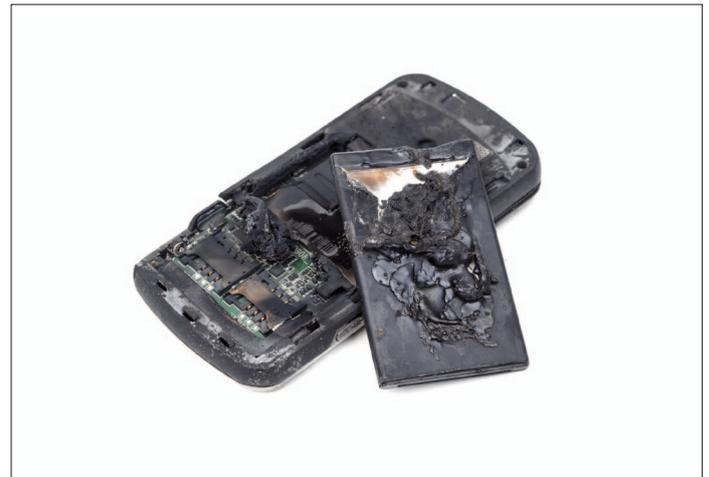


Bild 3: Schwerwiegende Folgen eines Thermal Runaway: Mobiltelefon und Batterie sind komplett zerstört. © Fotolia / weapat1003

lösen sich aus dem Verbund des Kathodenmaterials und diffundieren nun durch den Separator zur negativen Anode, verbinden sich mit den Elektronen wieder zu neutralen Lithium-Atomen und lagern sich in der molekularen Graphit-Schichtstruktur der Anode ein ($\text{LiC}_6 \leftrightarrow \text{C}_6 + \text{Li}^+ + \text{e}^-$).

Beim Entladevorgang über einen angeschlossenen Verbraucher findet der Prozess der Elektronen- und Lithium-Ionen-Bewegung in umgekehrter Richtung statt und die durch den Ladevorgang aufgenommene Energie wird über den Entladestrom an den Verbraucher abgegeben.

Zykluslebensdauer von Lithium-Ionen-Batterien

Bei jedem Vollzyklus (Laden/Entladen) ist die Lithium-Ionen-Zelle chemischen, thermischen und mechanischen Belastungen (Ausdehnung) unterworfen, die eine Alterung der Zelle verursachen. Insbesondere das Laden mit hohen Strömen (Schnellladung) sowie bei tiefen Temperaturen kann zu Lithium-Plating an der Anode führen. Hierbei lagern sich die Lithium-Ionen nicht wie vorgesehen in die Graphit-Schichtstruktur der Anode ein, sondern werden an der Oberfläche der Graphitanode metallisch abgeschie-



Bild 4: LiFePO_4 -Batteriepacks von Bicker Elektronik sind in zahlreichen Leistungsklassen sowohl als geschumpfte Batteriepacks BP-LFP (links), als auch in einer robusten DIN-Rail-Gehäusevariante BP-LFP-D (rechts) verfügbar



Bild 5: Die DC-USV-Serie UPSI-IP von Bicker Elektronik im komplett geschlossenen Aluminiumgehäuse ist mit integrierten LiFePO₄-Batteriepacks verfügbar. Die abgedichteten Gehäuseelemente und Steckverbinder sind wasser-, eis-, öl- und staubdicht nach Schutzart IP67

den und führen so zu erheblichen Leistungseinbußen oder gar Kurzschlüssen innerhalb der Zelle.

Hohe Ladeschlussspannungen oder gar Überladung führt ebenfalls zu einer starken Wärmeentwicklung, Ausdehnung und Belastung der Lithium-Ionen-Zelle. Auf den Energiespeicher optimierte Lade- und Entladeprofile mit angepassten Ladeschlussspannungen und Entladetiefen (DoD - Depth of Discharge) sowie der Einsatz eines Batterie-Management-Systems (BMS) schonen die Materialien der Lithium-Ionen-Zelle und sorgen für eine lange Lebensdauer. Hinsichtlich der Lagerung von Lithium-Ionen-Batterien sollten diese trotz der äußerst geringen Selbstentladung regelmäßig nachgeladen werden, um eine Tiefenentladung und die damit verbundene Destabilisierung der Zellchemie zu vermeiden.

Thermal Runaway bei Lithium-Ionen-Zellen

Bei der Auswahl eines Lithium-Ionen-Energiespeichers für DC-USV-Systeme empfiehlt sich ein genauer Blick auf das eingesetzte Kathodenmaterial, denn

Lithium-Ionen-Technologie sorgt insbesondere in sicherheitstechnischer Hinsicht immer wieder für negative Schlagzeilen mit Bildern von brennenden Elektroautos oder schmelzenden Mobiltelefonen (Bild 3). Die hohe erzielbare Energiedichte aufgrund der elektrochemischen Vorteile

von Lithium birgt u. a. auch ein erhöhtes Brandrisiko, weshalb Lithium-Ionen-Batterien besonderen Transport- und Luftfrachtbestimmungen unterliegen.

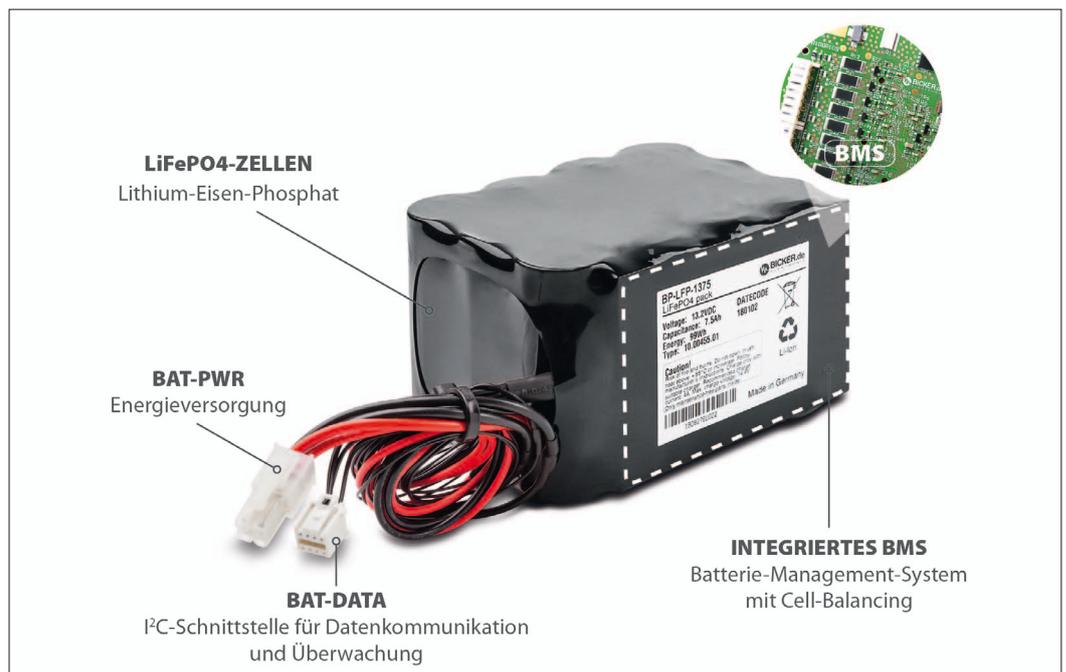
Gerade bei Zellen mit chemisch und thermisch instabilem Kathodenmaterial wie Lithium-Kobalt-Oxid (LCO) oder Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid (NMC) kann starke Wärmeentwicklung bei Überladung, ein interner oder externer Kurzschluss, mechanische Beschädigung, produktionsbedingte Verunreinigungen oder starke äußere Hitzeeinwirkung eine zellinterne exothermische chemische Reaktionen auslösen. Die freiwerdende Wärmeenergie erhöht die Reaktionsgeschwindigkeit der Zellchemie und lässt die zellinterne Temperatur weiter ansteigen. Dieser sich selbstbeschleunigende Prozess kann bei Überschreitung einer spezifischen Temperaturgrenze nicht mehr gestoppt werden. Diese Temperaturgrenze ist abhängig von der eingesetzten Zellchemie und beträgt beispielsweise 150 °C bei Lithium-Kobalt-Oxid (LCO). Es kommt zum Thermal Runaway (thermisches Durchgehen), was letztlich zum Brand oder zur Explosion der Zelle füh-

ren kann. Da der im Kathodenmaterial gebundene Sauerstoff in einem solchen Fall freigesetzt wird, ist ein derartiger Brand nur sehr schwer zu löschen.

Deshalb müssen Lithium-Ionen-Energiespeicher mit Schutzschaltungen gegen Übertemperatur (OTP), Überstrom (OCP), Überspannung (OVP) und Kurzschluss (SCP) ausgestattet sein sowie die direkte Einwirkung von Hitze und mechanische Beschädigungen der Zellen verhindert werden.

Lithium-Eisen-Phosphat – die sichere und langlebige Lithium-Ionen-Technologie

Mit Lithium-Eisen-Phosphat (LiFePO₄) steht für das Kathodenmaterial eine stabile chemische Verbindung mit erhöhter Sicherheit zur Verfügung. Im Falle einer Überladung ist die entstehende Wärmeenergie wesentlich geringer als bei LCO/NMC-Zellen. Selbst beim „Nageltest“ (interner Kurzschluss der Zelle durch Eindringen eines metallischen Körpers) ist ein thermisches Durchgehen der LiFePO₄-Zelle nahezu ausgeschlossen, da Lithium-Eisen-Phosphat im Fehlerfall nur wenig bis gar keinen Sauerstoff abgibt



LiFePO₄-ZELLEN
Lithium-Eisen-Phosphat

BAT-PWR
Energieversorgung

BAT-DATA
PC-Schnittstelle für Datenkommunikation und Überwachung

INTEGRIERTES BMS
Batterie-Management-System mit Cell-Balancing

Bild 6: LiFePO₄-Batteriepack BP-LFP von Bicker Elektronik mit integriertem BMS

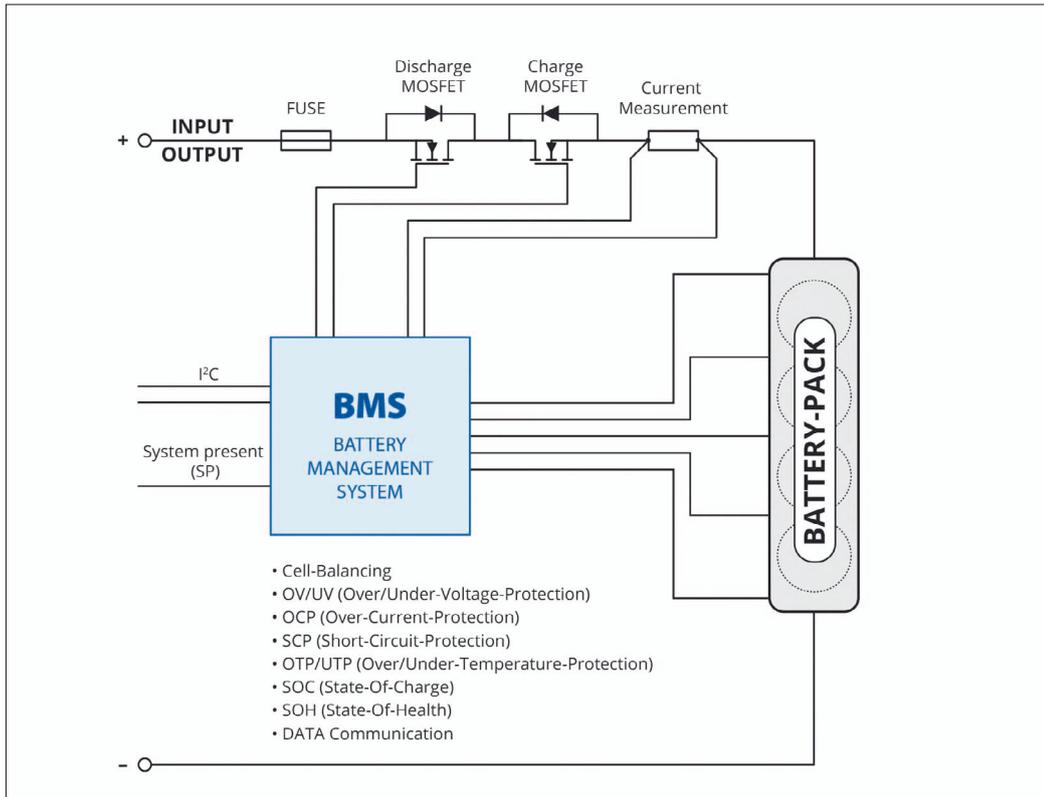


Bild 7: Das Batterie-Management-System steuert und überwacht den gesamten Lade- und Entladevorgang

und die spezifische Temperatur für einen Thermal Runaway mit 270 °C wesentlich höher liegt als bei anderen Kathodenmaterialien.

Insgesamt sind LiFePO₄-Zellen wesentlich unempfindlicher gegenüber Hitze und selbst der Einsatz bei Minus-Temperaturen ist möglich. Der Temperaturbereich handelsüblicher LiFePO₄-Zellen erstreckt sich hierbei von -30 bis +65 °C. Wobei der Arbeitstemperaturbereich für die LiFePO₄-Batteriepacks der BP-LFP-Serie von Bicker Elektronik bewusst auf -20 bis +55 °C spezifiziert wurde: Einerseits ist bei extremen Minus-Temperaturen keine praktikable Ladung der Zellen mehr möglich. Andererseits erreichen die Zellen innerhalb eines Batteriepacks im Normalbetrieb bei einer Umgebungstemperatur von +55 °C aufgrund der Eigenerwärmung bereits eine Zelltemperatur von +65 °C (und würden somit bei höheren Umgebungstemperaturen überlastet). Ein wichtiges Detail, welches man beim Produktvergleich von verschiedenen Zell- und Batteriepacks hinsichtlich der Temperatur-

angaben berücksichtigen sollte. Generell gilt in diesem Zusammenhang die RGT-Regel (Reaktionsgeschwindigkeit-Temperatur-Regel), welche besagt, dass sich die Reaktionsgeschwindigkeit einer chemischen Reaktion bei einer Temperaturerhöhung um 10 K (Kelvin) mindestens verdoppelt. Übertragen auf Batteriezellen bedeutet dies vereinfacht formuliert, dass sich bei einer Temperaturerhöhung von 10 °C die Lebensdauer der Komponenten halbiert. Deshalb sollten Systementwickler frühzeitig der Analyse und Optimierung des Temperatur- und Wärmemanagements einer Applikation besonderes Augenmerk schenken.

Hohe Zyklenfestigkeit

Aufgrund der etwas niedrigeren Zellspannung von 3,2 V ist die Energiedichte von LiFePO₄-Zellen zwar nicht ganz so hoch wie bei NMC/LCO-Zellen, jedoch wird dieser vermeintliche Nachteil bereits nach kurzer Einsatzdauer durch eine rund zehnfach höhere Zyklenfestigkeit (>3000 Lade- und Ent-

ladezyklen bei 80 % der Anfangskapazität) mehr als ausgeglichen. NMC/LCO-Zellen altern zyklisch wesentlich schneller und weisen bereits nach ca. 300 Zyklen nur noch 80 % der Anfangskapazität auf. Dahingehend relativieren sich die etwas höheren Initialkosten beim Einsatz von Lithium-Eisen-Phosphat.

Darüber hinaus verfügen Lithium-Eisen-Phosphat-Energiespeicher im direkten Vergleich zu anderen Lithium-Ionen-Batterien über eine höhere Leistungsdichte, was hohe Lade- und Entladeströme sowie eine erhöhte Impulsbelastbarkeit ermöglicht. Nicht zuletzt leistet LiFePO₄-Batterietechnologie durch den Verzicht auf giftige Schwermetalle wie Nickel oder dem seltenen Rohstoff Kobalt einen aktiven Beitrag zum Schutz von Mensch und Umwelt.

Sicherer und langlebiger Energiespeicher

All diese Vorteile empfehlen Lithium-Eisen-Phosphat-Batteriezellen als sichere und besonders langlebige Energiespeicher für

DC-USV-Systeme. Ausgestattet mit einem Hochleistungs-Batterie-Management-System (BMS) sind entsprechende LiFePO₄-Energiespeicher sowohl als geschumpfte Batteriepacks BP-LFP, als auch in einer DIN-Rail-Gehäusevariante BP-LFP-D bei Bicker Elektronik verfügbar (Bild 4). Zudem kommen die robusten LiFePO₄-Batteriepacks auch in der integrierten Outdoor-USV-Lösung UPSI-IP mit geschlossenem Aluminiumgehäuse und IP67-Schutz für extreme Umgebungsbedingungen zum Einsatz (Bild 5).

Batterie-Management-System (BMS)

Wie bereits erwähnt benötigen gerade Lithium-Ionen-Energiespeicher hinsichtlich der Optimierung von Lebensdauer und Sicherheit zwingend ein Batterie-Management-System (BMS), welches entweder extern oder als integraler Bestandteil des Energiespeichers umgesetzt werden kann (Bild 6). Das BMS überwacht und steuert den kompletten Lade- und Entladevorgang jeder Batteriezelle des Energiespeichers (Bild 7).

- Batterietyp-Authentifizierung zur automatischen Einstellung der passenden Ladeschlussspannung (BMS übermittelt Batterie-ID an USV-Steuereinheit)
- Ladezustandsanzeige und SOC-Überwachung (State of Charge)
- Überwachung der Zellspannungen
- Stromfluss-Überwachung
- Battery-Health- und Zyklen-Monitoring
- Temperaturüberwachung des Batteriepacks mit Abschaltung bei Über-/Untertemperatur
- Schutz vor Über-/Unterspannung an den Zellen, Überstrom und Tiefenentladung
- Trennung des Hauptstrompfades bei Kurzschluss

Cell-Balancing-Funktion

Eine weitere Kernaufgabe des BMS (Batterie-Management-System) ist das Cell-Balancing. Innerhalb eines Energiespei-

chers werden zur Erhöhung der Nennspannung mehrere Einzelzellen in Reihe geschaltet. Aufgrund von Fertigungstoleranzen und unterschiedlich starker Alterung der Zellen unterscheiden sich diese in Kapazität und Innenwiderstand. Die Leistungsfähigkeit und Gesamtkapazität des Lithium-Ionen-Batteriepacks richtet sich in diesem Fall nach der „schwächsten“ Zelle im Verbund, da diese beim Ladevorgang als erste den Spannungsgrenzwert für die Ladebegrenzung erreicht und somit die vollständige Aufladung der restlichen Zellen verhindert (Bild 8). Dies beeinflusst Lebensdauer, Zyklenanzahl und Kapazität des Energiespeichers negativ und kann letztlich sogar die Beschädigung des Batteriepacks hervorrufen. Das Cell-Balancing (aktiv oder passiv) gleicht diese Unterschiede zwischen den einzelnen Verbund-Batteriezellen durch eine entsprechende Beschaltung aus und sorgt für eine ausgewogene und gleichmäßige Ladung aller Zellen, so dass die volle Kapazität des Lithium-Ionen-Batteriepacks nutzbar bleibt und keine kritischen Extremsituationen an einzelnen Zellen entstehen. Durch das übergeordnete Cell-Balancing kann die Lebensdauer des Batteriepacks entscheidend verlängert werden.

BMS mit Batterie-Relax-Modus verlängert Lebensdauer von Lithium-Ionen-Batterien

Mit dem Batterie-Relax-Modus greift Bicker Elektronik die Problematik auf, dass in vielen DC-USV-Systemen der Batteriepack oft über sehr lange Zeit (ggf. über Monate) auf Ladeschlussspannung am Lader betrieben wird, um die volle USV-Bereitschaft jederzeit zu gewährleisten. Wenn jedoch Lithium-Ionen-Zellen über derart lange Zeiträume unter ständiger Belastung im Ladeschluss-Zustand bleiben, nimmt die Lebensdauer der Zellen nach einigen Monaten stark ab. Zur

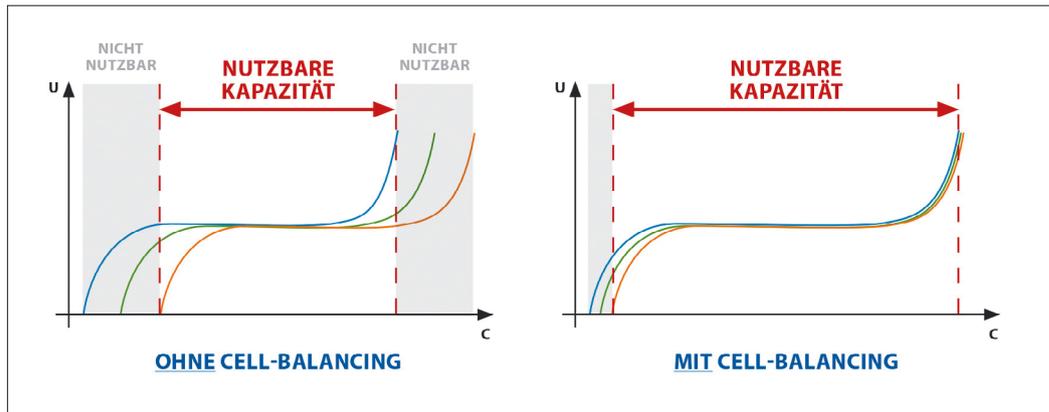


Bild 8: Das Cell-Balancing gleicht die Ladekurven einzelner Zellen an, so dass die maximale Kapazität des Batteriepack erreicht wird

Schonung der Zellen ist es daher notwendig, dass nach einer definierten Zeit der Lade-MOSFET bei Ladeschluss deaktiviert wird. Der Entlade-MOS-FET bleibt weiterhin aktiv, so dass eine Entladung jederzeit möglich ist. Bei detektierter Entladung (USV-Betrieb nach Stromausfall) wird der zuvor deaktivierte Lade-MOSFET unmittelbar wieder zugeschaltet, so dass der Stromfluss über die Body-Diode nur wenige Mikrosekunden andauert und der Lader in den regulären Betriebsmodus zurückkehrt. Die Schonung des Batteriepacks durch den Relax-Modus resultiert in einer deutlich verlängerten Lebensdauer und somit einer erhöhten Systemverfügbarkeit.

System-Present-Funktion erhöht Sicherheit und Lagerfähigkeit von Batteriepacks

Bei der System-Present-Funktion bleibt der Ausgang des Batteriepacks solange deaktiviert (Ausgangsspannung = 0 V) bis dieser mit der DC-USV-Einheit verbunden und freigeschaltet wird. Da die Bauteile auf der BMS-Platine im Standby-Betrieb laufen, erhöht diese Stromsparfunktion die Lagerfähigkeit des (geladenen) Batteriepacks.

Fazit

In DC-USV-Systemen bieten sich Lithium-Ionen-Zellen

als Energiespeicher mit hoher Energiedichte, einem weiten Temperaturbereich und einem sehr guten Preis-Leistungsverhältnis an. Kombiniert mit einem Batterie-Management-System (BMS) ermöglicht die Lithium-Ionen-Technologie den Aufbau besonders leistungsfähiger und effizienter Energiespeicherlösungen, welche im Vergleich zu Bleibatterien eine enorme Platz- und Gewichtseinsparung ermöglichen und mit kurzen Ladezeiten überzeugen. Allerdings gilt es bei der Auswahl eines passenden Energiespeichers die Eigenschaften der verschiedenen Lithium-Ionen-Kathodenmaterialien genau zu betrachten. Neben konventionellen Lithium-Ionen-Zellen auf Basis von Lithium-Kobalt-Oxid (LCO) oder Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid (NMC) hat sich insbesondere Lithium-Eisen-Phosphat (LiFePO₄) als besonders robuste, sichere und langlebige Zellchemie etabliert. Mit einer 10-fach höheren Zyklenanzahl im Vergleich zu LCO/NMC und einer niedrigen Total Cost of Ownership (TCO) bieten LiFePO₄-Energiespeicher optimale Langzeiteigenschaften mit geringem Wartungsaufwand und einem hohen Maß an Investitionsschutz und funktionaler Sicherheit, was nicht zuletzt in der Medizin- und Labortechnik zentrale Auswahlkriterien sein dürften.

Weiterführendes Whitepaper kostenlos verfügbar



Das Whitepaper „Auswahl der richtigen Batterietechnologie für langlebige und sichere DC-USV-Systeme“ von Bicker Elektronik zeigt detailliert die technologischen Unterschiede und Auswahlkriterien für Energiespeicher auf. Supercaps, Lithium-Eisen-Phosphat-Zellen, konventionelle Lithium-Ionen-Zellen (LCO/NMC), Reinblei-Zinn- sowie klassische Blei-Gel-Batterien werden hinsichtlich zahlreicher Parameter verglichen, u.a. Zellaufbau, Sicherheit, Energie- und Leistungsdichte, Lebensdauer, Strombelastbarkeit, Arbeitstemperaturbereich, Wartung, Transport und Lagerung sowie Initial- und Folgekosten. Das Whitepaper ist über die Website www.bicker.de/whitepaper kostenlos abrufbar. ◀