Einsatz von SuperCaps als wartungsfreie Energiespeicher in DC-USV-Systemen

Kurz gefasst

Bisher werden batteriegestützte „Unterbrechungsfreie Stromversorgungen" eingesetzt, um kurzzeitige Stromausfälle zu überbrücken oder Computersysteme kontrolliert herunterzufahren. Als Alternative stehen jetzt Doppelschicht-Kondensatoren, sogenannte SuperCaps, zur Verfügung.

In diesem Beitrag geht es um die Realisierung von unterbrechungsfreien Stromversorgungen für 12-V- und 24-V-Systeme im Bereich Kiosk, POS, Self-Service-Terminals und ePayment auf Basis wartungsfreier Doppelschicht-Kondensatoren (EDLC)

Selbst kurzzeitige Stromausfälle, Flicker, Schwankungen oder Einbrüche der Versorgungsspannung können für elektronische Bezahlsysteme, Kassen oder Self-Service-Terminals (SSTS) schnell zum Problem werden. Zahlungs- und Transaktionsvorgänge müssen sicher und verbindlich abgeschlossen, erfasste Daten zuverlässig transferiert werden. Bei längeren Stromausfällen muss ein entsprechendes Embedded-Computer-System kontrolliert herunterfahren und nach der Rückkehr der Versorgungsspannung wieder selbstständig starten. Meist kommt hierfür eine batteriegestützte USV (Unterbrechungsfreie Stromversorgung) zum Einsatz, welche jedoch nicht wartungsfrei ist, sondern turnusgemäß den Austausch alternder Batteriepacks erfordert und somit im Ernstfall ein Sicherheitsrisiko darstellen kann. Dieses Risiko beruht hauptsächlich auf der Tatsache, dass eine klassische Batterie (Blei-Gel oder Li-Ionen) jederzeit ausfallen kann obwohl die Akkukapazitätsanzeige Restenergie indiziert. Erst wenn die Batterie belastet wird, bricht die Spannung ein. Vielleicht haben Sie auch schon einmal die Erfahrung mit ihrem Mobiltelefon oder Auto gemacht, dass ohne Vorwarnung die Batterie ausfällt: Die Akkustand-Anzeige im Mobiltelefon fällt innerhalb weniger Minuten von 80 % auf 10 % oder das Fahrzeug lässt sich plötzlich nicht mehr starten.

Ultrakondensatoren oder SuperCaps

Als alternativer Energiespeicher bieten sich Doppelschicht-Kondensatoren (EDLC - Electric Double-Layer Capacitor) an, auch bekannt als Ultrakondensatoren oder SuperCaps. Im Gegensatz zu Batterien, die Energie über den Umweg einer chemischen Reaktion speichern, basieren SuperCaps auf elektrophysikalischen Prinzipien und sind innerhalb kürzester Zeit geladen und einsatzbereit, arbeiten in einem weiten Temperaturbereich (-40 bis +85 °C) und überzeugen mit einer hohen Strombelastbarkeit, Leistungsdichte und Zuverlässigkeit. Aufgrund der hohen Zyklenfestigkeit (>500.000 Be- und Entladezyklen) weisen DC-USV-Systeme mit Doppelschicht-Kondensatoren eine besonders lange Lebensdauer und einen weiten Betriebstemperaturbereich auf. Für das versorgte Gesamtsystem bedeutet dies eine Erhöhung der langjährigen Verfügbarkeit bei gleichzeitiger Minimierung des Wartungsaufwandes. Auch nach dem Erreichen der EOL (End of Life) ist ein Doppelschicht-Kondensator nicht defekt, sondern weist lediglich eine vordefinierte Minderung der Kapazität und einen höheren ESR (Ersatzserienwiderstand) auf.

Wie funktionieren DC-USV-Lösungen mit SuperCaps in der Praxis? Unter welchen konstruktiven Rahmenbedingungen lassen sich SuperCaps in DC-USV-Lösungen sinnvoll und wirtschaftlich einsetzen? Bicker Elektronik erklärt technische Hintergründe und Einsatzmöglichkeiten kompakter DC-USV-Module mit Doppelschicht-Kondensatoren für die sichere Stromversorgungen mit 12 V oder 24 V.

Doppelschicht-Kondensatoren - Hocheffiziente Energiespeicher

Prinzipiell bestehen Kondensatoren aus zwei Elektrodenflächen, die sich in geringem Abstand gegenüberstehen und einem Dielektrikum als nicht leitende Isolationsschicht dazwischen. Schließt man die Elektroden an eine Spannungsquelle an, so werden diese - vereinfacht beschrieben - gegenpolig aufgeladen und erzeugen aufgrund des elektrischen Potentials zwischen den beiden Elektrodenflächen ein elektrisches Feld. Sind beide Elektrodenflächen vollständig positiv bzw. negativ geladen, kommt der Stromfluss zum Erliegen, d. h. der Kondensator ist geladen und speichert die elektrische Energie, so dass diese durch den Anschluss eines Verbraucherstromkreises wieder entnommen werden kann. Die Speicherkapazität oder kurz Kapazität C eines Kondensators hängt hierbei wesentlich von der Oberflächengröße der Elektroden und ihrem Abstand zueinander ab. Auch die Beschaffenheit des Dielektrikum fließt in Form der Dielektrizitätszahl in die Formel für die Kapazitätsberechnung eines Kondensators ein:

$$C\,[F] = \varepsilon \cdot A / d$$

C =Kapazität
ε = Dielektrizitätszahl
A =Fläche
d = Plattenabstand

Bei der Entwicklung von Doppelschicht-Kondensatoren bzw. SuperCaps wurden diese Parameter an einigen Stellen entscheidend optimiert, so dass, im Vergleich zu Keramik-, Tantal- oder Elektrolytkondensatoren, auf wesentlich kleinerem Raum hohe Kapazitäten (bis zu mehreren tausend Farad) realisiert werden können: Zum einen bestehen die Elektroden aus Aktivkohle, also reinem Kohlenstoff mit einer besonders großen Oberfläche von bis zu 1000 Quadratmetern pro Gramm. Zum anderen wurde das Dielektrikum durch ein elektrisch leitendes Elektrolyt und einen ionen-durchlässigen Separator ersetzt. Bild 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Doppelschicht-Kondensators. Beim Ladevorgang wandern die negativen Anionen durch den Separator hindurch zur positiven Elektrode, die positiven Kationen bewegen sich zur negativen Elektrode. An den beiden Grenzschichten zwischen Kohlenstoff-Elektroden und Elektrolyt bilden sich die nur wenige Molekülschichten dünnen Helmholtz-Doppelschichten. Durch den extrem kleinen Abstand entstehen elektrische Ladungsträger-Schichten mit besonders hoher Leistungsdichte, die sich wie zwei Kondensatoren gleicher Kapazität verhalten, welche über den Elektrolyt in Reihe miteinander verbunden sind.

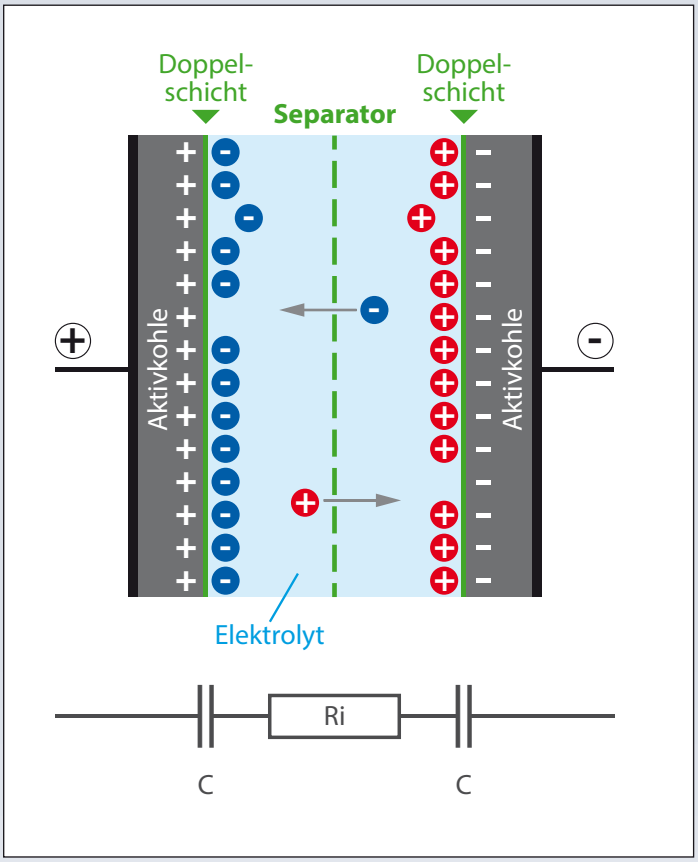

Bild 1: Schematischer und stark vereinfachter Aufbau eines Doppelschicht-Kondensators (EDLC - Electric Double-Layer Capacitor)

Die Kombination aus großer Elektrodenfläche und minimalen Abständen an den Grenzschichten macht den Doppelschicht-Kondensator letztlich zu einem Kapazitätsriesen mit kompakten Abmessungen.

SuperCaps in der praktischen Anwendung

Anhand der beiden SuperCap-USV-Systeme UPSIC-1205 (12 V_{DC} / 5 A) bzw. UPSIC-2403 (24 V_{DC} / 3 A) von Bicker Elektronik sollen die praktischen Aspekte für den Einsatz von Doppelschicht-Kondensatoren veranschaulicht werden. Ausgestattet mit 4x 100 F-SuperCaps sind die DC-USV-Module in maximal 60 Sekunden voll beladen und versorgen bei Stromausfall angeschlossene DC-Verbraucher sicher mit Strom. Aufgrund der kompakten Abmessungen, bei gleichzeitig hoher Leistungsdichte, ist die platzsparende Integration derartiger USV-Lösungen in eine Vielzahl sensibler Applikationen denkbar. Bei der Be- und Entladung sowie der Beschaltung von Doppelschicht-Kondensatoren gilt es allerdings einige wichtige Aspekte in der Praxis zu beachten.

Lebensdauer und Temperaturbereich

Obgleich die Temperaturfestigkeit und Lebensdauer von Doppelschicht-Kondensatoren im Vergleich zu anderen Energiespeichern besonders hoch ist verändert sich im Laufe der Lebenszeit deren Kapazität (C) und Innenwiderstand (ESR Equivalent Serial Resistor). Das Ende der Lebensdauer eines SuperCaps ist erreicht, wenn die Kapazität auf 70 % des ursprünglichen Wertes sinkt oder der Innenwiderstand sich verdoppelt. Hierbei hängt die effektive Lebensdauer entscheidend von der Umgebungstemperatur, der Zellspannung und den Lade-/Entladeströmen ab. Die vorgestellten USV-Module der UPSIC-Serie verwenden jeweils vier in Reihe geschaltete SuperCaps mit einer nominellen Zellspannung von je 3,0 Volt und einer Kapazität von 100 F pro Kondensator. Diese Reihenschaltung ist notwendig um entsprechend höhere Modulspannungen erzeugen zu können, welche mit Hilfe nachgeschalteter Spannungswandler an den Ausgängen

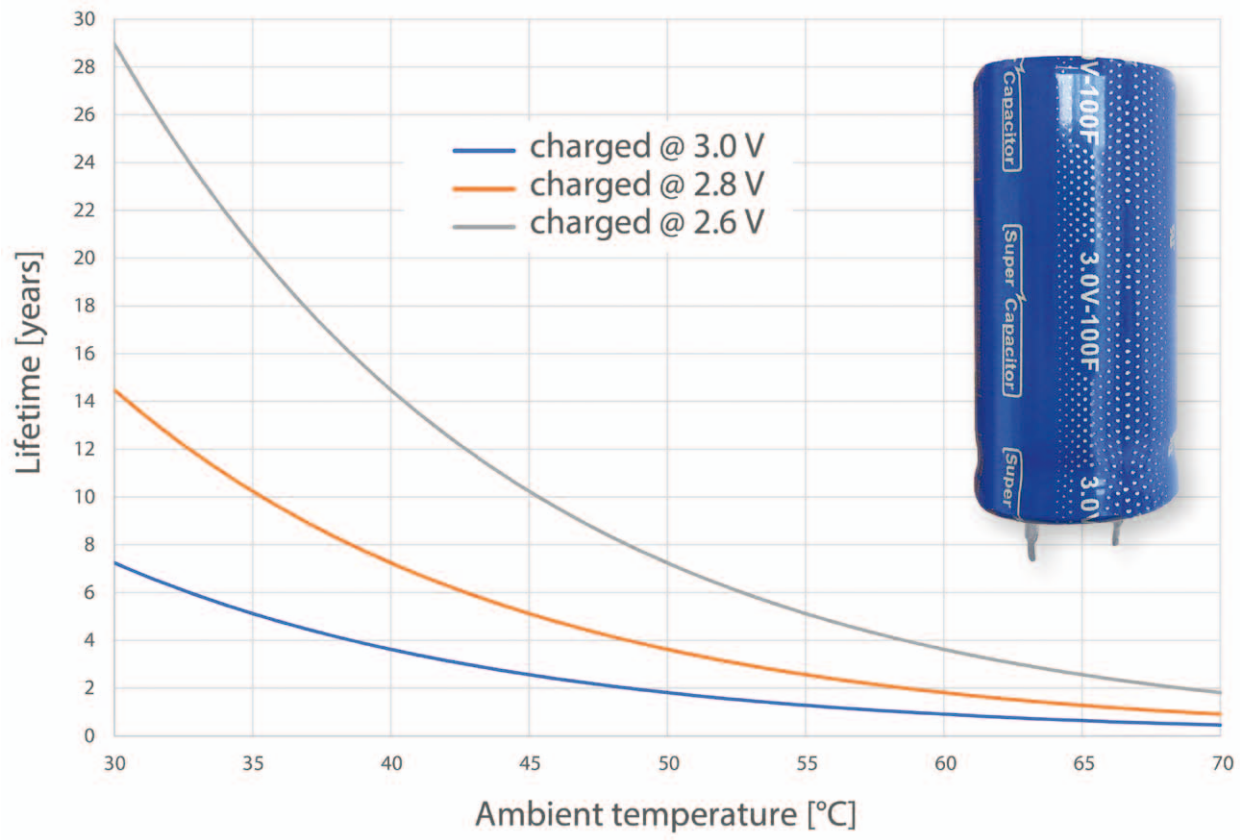

Bild 2: Abhängigkeit der Lebensdauer eines Doppelschicht-Kondensators (3 V / 100 F) von der Umgebungstemperatur. Eine Temperaturerhöhung um 10 °C halbiert die Lebensdauer. Eine Verringerung der Ladeschlussspannung um 0,2 V verdoppelt die Lebensdauer.

konstant gehalten werden. Das Diagramm in Bild 2 zeigt den direkten Zusammenhang von Temperatur und Lebensdauer bei unterschiedlichen Zellspannungen. Minus-Temperaturen bereiten den SuperCaps – im Gegensatz zu Standard-Blei-Gel-Batterien – keine allzu großen Probleme, obgleich der Innenwiderstand bei niedrigen Temperaturen aufgrund der verminderten Ionenbeweglichkeit im Elektrolyt ansteigt, dies jedoch durch die resultierende Wärmeentwicklung im SuperCap schnell wieder ausgeglichen wird. Hohe Temperaturen beeinflussen allerdings die Lebensdauer negativ. Analog zu anderen Elektronik-Komponenten gilt auch hier die Faustregel, dass eine Betriebstemperatur-Erhöhung um 10 °C eine Halbierung der Lebensdauer nach sich zieht. Wie das Diagramm in Bild 3 weiter zeigt, lässt sich bei SuperCaps durch Reduzierung der Zellspannung um ca. 0,2 Volt pro 10-°C-Temperaturerhöhung der Verkürzung der Lebensdauer aktiv entgegenwirken.

Optimale Zellspannung

Bei der Dimensionierung der UPSIC-Serie haben sich die Entwicklungsingenieure bei Bicker Elektronik für eine ausgewogene Lösung mit einer reduzierten Zellspannung von 2,6 Volt (nominell 3,0 Volt) pro SuperCap entschieden, um den langjährigen Betrieb im definierten Betriebstemperaturbereich der USV-Module sicherzustellen. Da jedoch

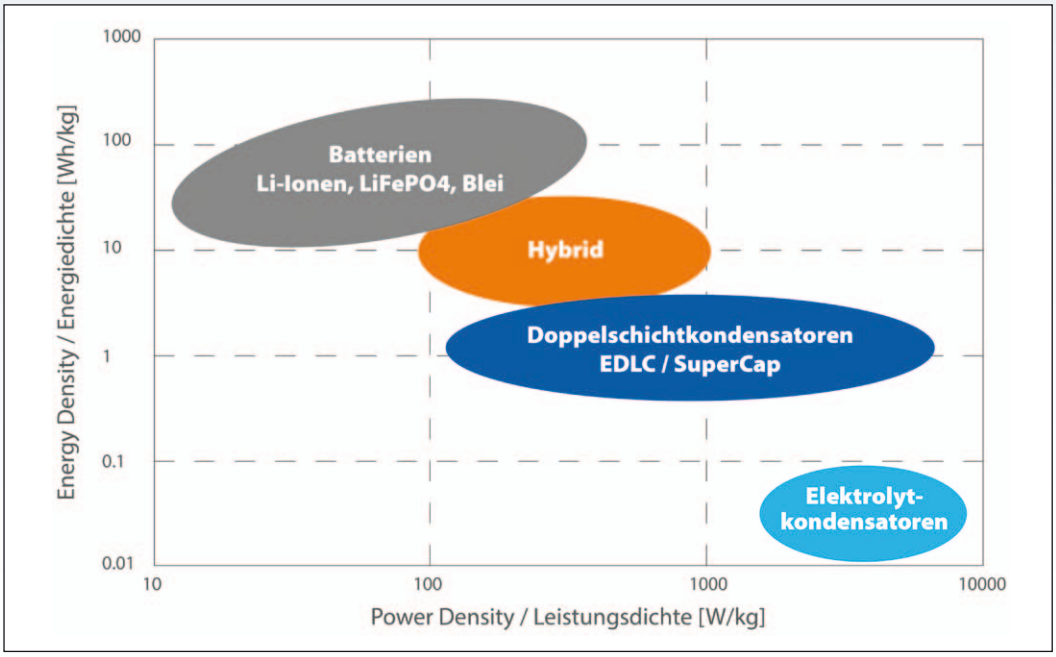

Bild 3: Vergleich von Leistungs- und Energiedichte verschiedener Energiespeicher.

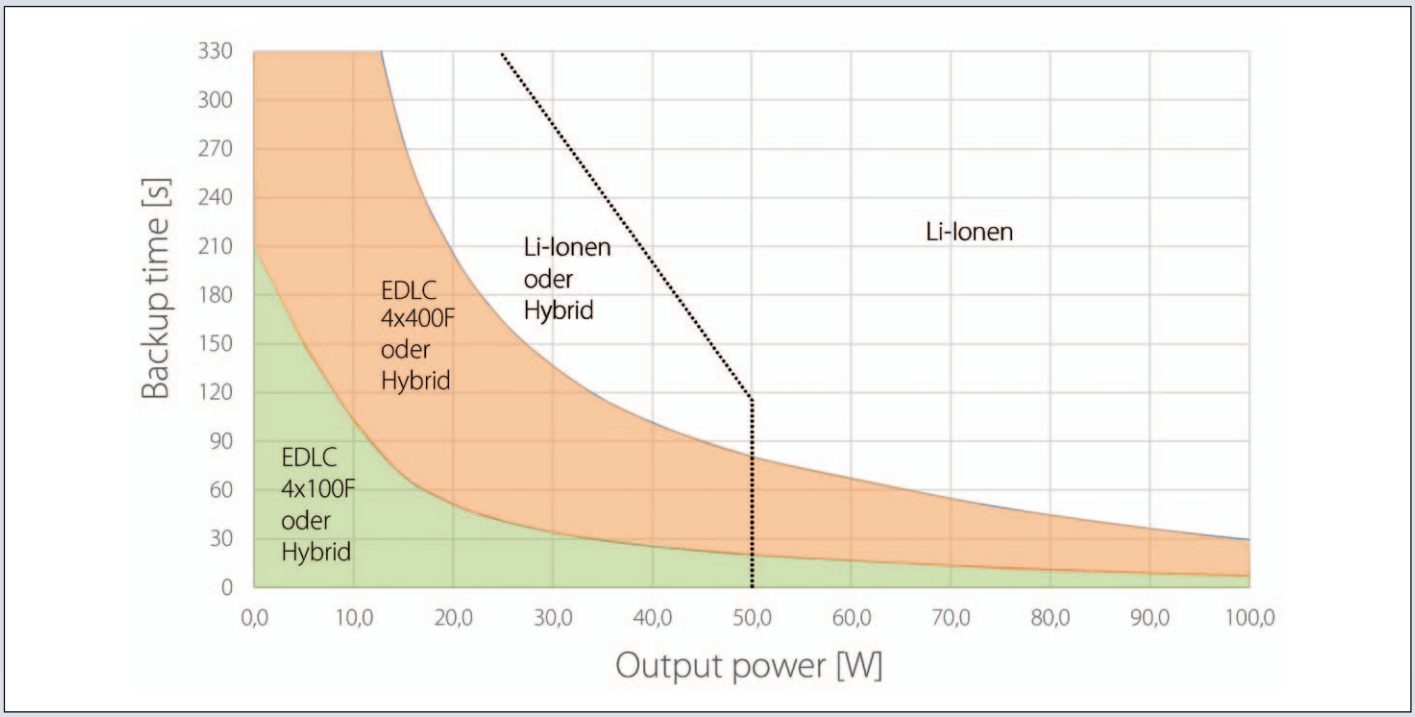

Bild 4: Vergleich unterschiedlicher Energiespeicher für die UPSI-Serie anhand der Überbrückungszeit und mittleren Leistungsentnahme als Grundlage für die Auswahl geeigneter Batterietechnologien und Formfaktoren. Bildquellennachweis: © Bicker Elektronik GmbH / © kjekol/Fotolia.com

die gespeicherte Energiemenge im Kondensator abhängig von der Zellspannung im Quadrat zu- oder abnimmt (W = 0,5 • C • U2), gilt es die Reduzierung der Zellspannung genau abzuwägen. Zumal sich die nutzbare Energiemenge aufgrund der Tatsache weiter reduziert, dass die SuperCaps in der Praxis nur bis zu einer minimalen Spannung U_{min} von ca. 1,0 Volt entladen werden, da bereits beim Absinken der Kondensator-Nennspannung U_{max} auf die Hälfte Ihres Wertes rund 75 % der gespeicherten Energie abgegeben wurden. Eine Tiefenentladung unterhalb von U_{min} ist somit technisch nicht sinnvoll, obgleich eine vollständige Entladung den SuperCaps keinen Schaden zufügen würde. Es steht somit die effektive Energiemenge $W_{effektiv} = 0{,}5 \cdot C \cdot (U2_{max} - U2_{min})$ für die Applikation zur Verfügung.

Hohe Stromstärken und flexibles Zellen-Balancing

Doppelschicht-Kondensatoren verfügen über eine hohe Leistungsdichte, d. h. sie können mit hohen Strömen be- und entladen werden, wodurch sich kurze Ladezeiten und hohe Spitzen-Ausgangsleistungen erreichen lassen. Bei den UPSIC-USV-Lösungen sorgt das intelligente Power-Sharing am Eingang dafür, dass die vorgeschaltete AC/DC-Stromversorgung nicht überdimensioniert werden muss, sondern die Eingangsleistung konstant gehalten und entsprechend angepasst auf Last und SuperCap-Lader verteilt wird. Bei geringer Last am Ausgang fließt mehr Energie in den SuperCap-Lader und umgekehrt. Entsprechend hohe Ladeströme werden mit einem aktiven Shunting - einer speziellen Form des Balancing - bereits während des Ladevorgangs gleichmäßig auf die einzelnen SuperCap-Zellen verteilt. Dieser Ladungsausgleich (Balancing) ist bei Reihenschaltung von SuperCaps zwingend notwendig, da aufgrund produktionstechnisch bedingter Unterschiede in Kapazität und Innenwiderstand die einzelnen Zellen unterschiedliche Zellspannungen aufweisen und somit entsprechende Ausgleichsströme zwischen den einzelnen SuperCaps fließen würden. Bicker Elektronik setzt je nach Applikation auch auf das passive Balancing, welches beispielsweise für die extern angeschlossenen Batteriepacks der UPSI-Serie eingesetzt wird.

Energiespeicher-Technologien unter wirtschaftlichen Aspekten

Obgleich die schnellen SuperCaps, wie dargestellt, beeindruckende Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten für die unterbrechungsfreie Stromversorgung bieten, gilt es bei der Gesamtkonzeption eines Systems immer nach wirtschaftlichen und technologischen Aspekten das optimale Energiespeicher-System auszuwählen. Hierbei ist zunächst der Unterschied zwischen Energiedichte (in Wh/kg) und Leistungsdichte (in W/kg) von Bedeutung (siehe Bild 3). Werden große Energiedichten und lange Überbrückungszeiten benötigt, lässt sich dies mit Doppelschicht-Kondensatoren unter Umständen nicht mehr wirtschaftlich sinnvoll lösen (großes Batteriepack-Volumen, hohe Kosten etc.). Daher bietet Bicker Elektronik neben den kompakten SuperCap-USVs auch weitere Lösungen mit externen Batteriepacks auf Basis von Lithium-Eisenphosphat ($LiFePO_4$) oder extrem robusten Cyclon-Reinblei-Batteriezellen an. Darüberhinaus sind Batteriepacks mit Hybrid-Energiespeichern, die verkürzt gesagt die Vorteile von Batterien und SuperCaps vereinen, ebenfalls eine hochinteressante Batterietechnologie. Sie weisen eine deutlich höhere Lebensdauer als Li-Ionen oder Blei Akkus auf und haben eine ausgewogene Zusammenstellung aus Energie- und Leistungsdichte. Die UPSI-Serie von Bicker Elektronik bietet hierfür ein modulares USV-System mit umfangreicher Hard- und Softwarefunktionalität für die flexible Konfiguration mit unterschiedlichen und zukunftsweisenden Energiespeicher-Technologien (siehe Bild 4).

Individuelle Dimensionierung

Ein überdimensioniertes oder falsch ausgelegtes USV- und Stromversorgungssystem kann unnötig hohe Kosten verursachen. Um letztlich die richtige Entscheidung zu treffen, sind eine fundierte Applikationsanalyse und eine individuelle Design-In-Beratung hinsichtlich der Stromversorgungs- und USV-Einbindung unabdingbar. Kundenkontakt ist hierbei sehr wichtig, denn nur gemeinsam lässt sich die beste USV- und Stromversorgungslösung für eine spezifische Applikation finden und so ein sicheres und zuverlässiges Gesamtsystem realisieren.

Autor:
Apostolos Baltos,
Designing Engineer,
Bicker Elektronik GmbH
info@bicker.de
www.bicker.de