

## Intelligentes Batterie-Backup für kontinuierliche Energieversorgung

### Teil 1: Elektrisches und mechanisches Design

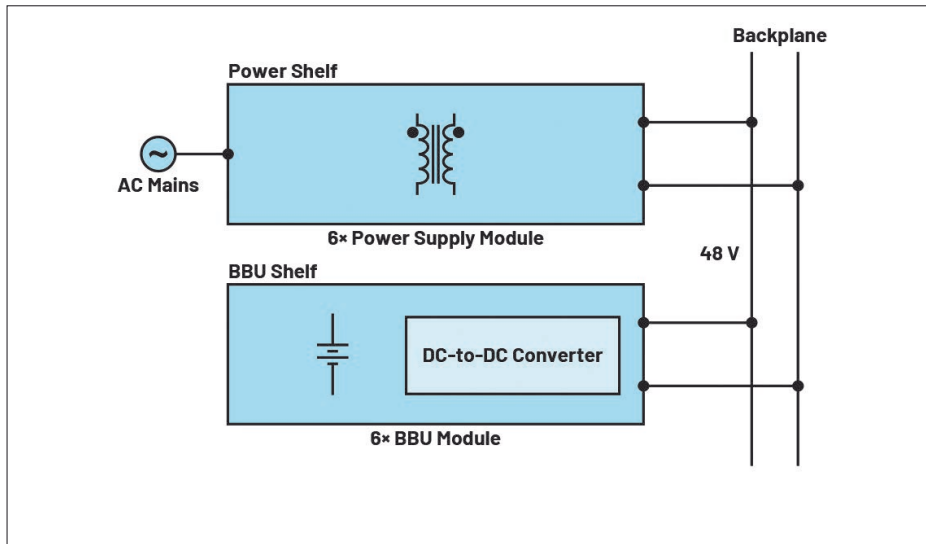


Bild 1: Die Stromversorgungsarchitektur des OCP ORV3

Dieser Artikel beschreibt die Systemanforderungen für die Batterie-Backup-Einheit (BBU) nach dem Standard Open Rack Version 3 des Open Compute Project (OCP ORV3). Es wird die Bedeutung einer effizienten und intelligenten BBU hervorgehoben, die bei Stromausfällen Energie liefern kann. Darüber hinaus werden die analogen und digitalen Designlösungen, die elektrischen und mechanischen Lösungen und deren Architekturen vorgestellt, die zur Erfüllung der schriftlichen Spezifikationen entwickelt wurden.

### Einführung

Rechenzentren sind der Motor des Internets und verbinden Gemeinschaften auf der ganzen Welt. Social-Media-Unternehmen wie Facebook, Instagram und X (früher als Twitter bekannt) benötigen Rechenzentren für die Verbreitung und Speicherung ihrer Informationen, während Suchmaschinen wie Yahoo! und Google Rechenzentren für ihre primären Suchmaschinen- und Speicherfunktionen nutzen. Nahezu alle großen Unternehmen und Behörden auf der ganzen Welt benötigen zuverlässige Rechenzentrumsfunktio-

nalität für den Betrieb und die Aufrechterhaltung ihrer primären Geschäftsfunktionen in Form von intelligenter Datenverarbeitung, Speicherung und Suche. Da die Zahl der Nutzer jedes Jahr steigt, müssen auch die Kapazitäten der Rechenzentren außerordentlich schnell erweitert werden, um mit der Nachfrage und den technologischen Verbesserungen Schritt zu halten. Mit den steigenden Wachstumsanforderungen muss auch die Systemarchitektur der Rechenzentren Schritt halten.

### Backplane-Spannung erhöht

Das OCP, eine Organisation, die Designs für Rechenzentren teilt, hat eine Systemarchitekturdefinition, die auf dem Open Compute Project Open Rack Version 2 (OCP ORV2) basiert, in der die Backplane-Nennspannung 12 V und die Systemleistung 3 kW beträgt. Andererseits führt eine erhöhte Nutzung zu einem erhöhten Energiebedarf, der den Strombedarf des 12-V-Systems übermäßig in die Höhe treibt und folglich die Gesamtleistung des Systems beeinträchtigt. Um diesem Fakt Rechnung zu tragen, wird die Spannung der Backplane auf 48 V erhöht, während die Systemleistung unverändert bleibt, wodurch die Menge an Strom und Kupferleitungen minimiert und die Wärmeabgabe in der Backplane reduziert wird. Diese Änderung erhöht den Gesamtwirkungsgrad des Systems und reduziert den Bedarf für ein komplexes Kühlsystem. Dies ist die Grundlage für den neuen Standard Open Rack Version 3, OCP ORV3.

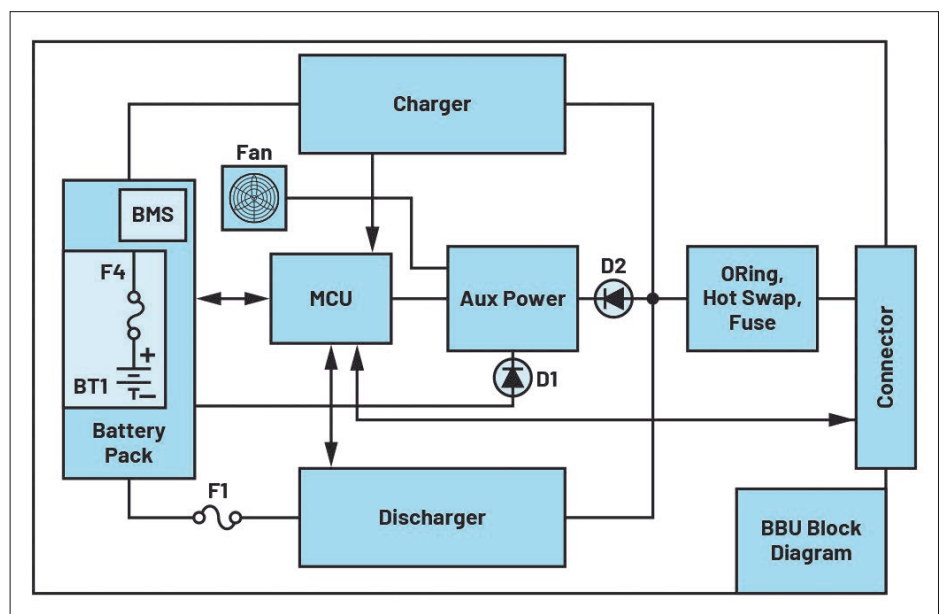


Bild 2: Blöckschaltbild der OCP ORV3-BBU

Autoren:  
Christian Cruz  
Senior Applications Development Engineer,  
Gary Sapia  
System Application Director,  
Marvin Neil Cabuenas  
Senior Firmware Engineer  
Analog Devices  
www.analog.com

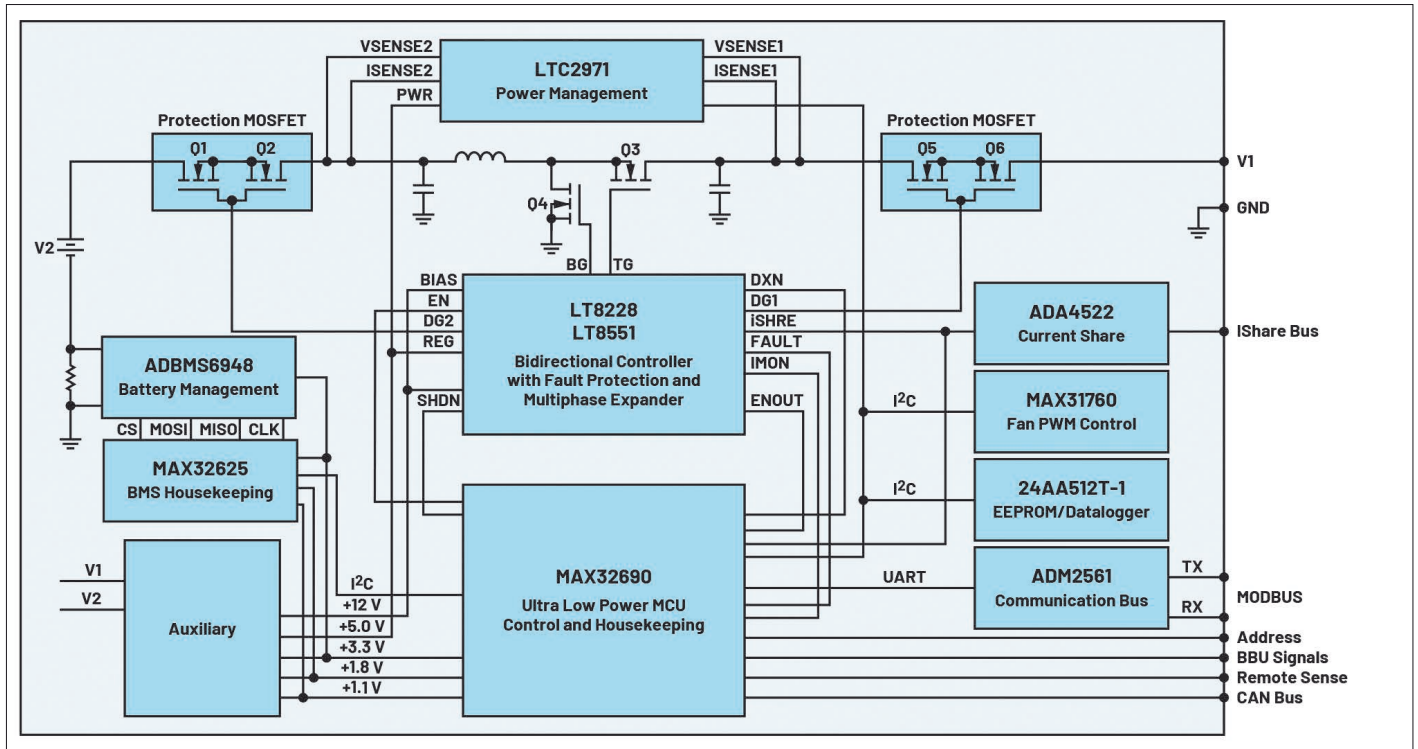


Bild 3: Blockschaltbild Analog Devices OCP ORV3-BBU

## Systemredundanz

Die Ausfallsicherheit eines Rechenzentrums ist eine grundlegende betriebliche Notwendigkeit. Das Hinzufügen einer BBU zum System sorgt für Systemredundanz. Bei einem Stromausfall oder Spannungsabfall benötigt das System Zeit, um die Situation zu erkennen, wichtige Daten zu sichern und den Betrieb auf einen anderen Server im Rechenzentrum zu verlagern, der sich wahrscheinlich in einer anderen Einrichtung und an einem anderen Standort befindet. Dies muss auf nahtlose Weise erfolgen. Notstromsysteme werden in jedem Rack eingesetzt, um die Überbrückungsleistung des Systems zu gewährleisten. Dieser Bedarf wird in der aktuellen Version des Standards ORV3 BBU als eine Leistung von 15 kW definiert, die einem Systembetrieb von 4 Minuten pro BBU-Einheit entspricht und auf der Speicherung und Konditionierung von Li-Ionen-Batterien basiert.

Diese Spezifikation bietet einen Leitfaden für die Fertigstellung und Entwicklung einer Referenzdesign-Lösung, die den bidirektionalen Leistungswandler von Analog Devices für Einzelschaltkreise für den Lade- und Entladebetrieb, ein Batteriemanagementsystem (BMS), einen On-Board-Design-System-Host-Mikrocontroller mit

Firmware- und GUI-Unterstützung sowie eine Hardware-Verstärkung durch Zusammenarbeit mit der OCP-Organisation umfasst.

## Designanforderungen und Hardware-Implementierung

Die von der OCP-Organisation zu erstellende Spezifikation (Revision 1.3) wird die Anforderungen beschreiben, die für die Konzeption und das Design zur Erfüllung des BBU-Modulstandards erforderlich sind. Das Referenzdesign des BBU-Moduls basiert auf dem ORV3 48-V-Designvorschlag und besteht aus einem Batteriesatz mit BMS, Lade-/Entladeschaltung und weiteren Funktionsblöcken, wie in Bild 2 dargestellt und besteht aus einem Batteriesatz mit BMS, Lade-/Entladeschaltung und weiteren Funktionsblöcken.

## Hauptbetriebsarten

Neben den Anforderungen an die Schaltkreise muss das BBU-Modul während seiner Lebensdauer die folgenden Hauptbetriebsarten abdecken:

- **Schlafmodus:** Dieser Modus wird verwendet, wenn sich das BBU-Modul auf dem Transportweg oder im Lager befindet oder nicht an eine aktive Stromschiene ange-

schlossen ist, wodurch der Entladestrom der Zelle für eine längere Lagerzeit minimiert wird. Die Überwachung der BBU sowie Berichtsfunktionen sind im Sleep-Modus nicht möglich. Die BBU wacht auf und verlässt den Schlafmodus, wenn die Sammelschienenspannung für >100 ms und <200 ms über 46 V liegt und das PSKILL-Signal Low ist.

- **Standby-Betrieb:** In diesem Zustand ist das BBU-Modul voll aufgeladen und in ordnungsgemäßem Zustand und überwacht ständig die Sammelschienenspannung, um auf ein Entladeereignis vorbereitet zu sein. Während des größten Teils seiner Lebenszeit arbeitet das BBU-Modul in dieser Betriebsart. Der Status und die Parameter der BBU-Module sind über den Kommunikationsbus auf dem vorgeschalteten Rack-Monitor sichtbar.

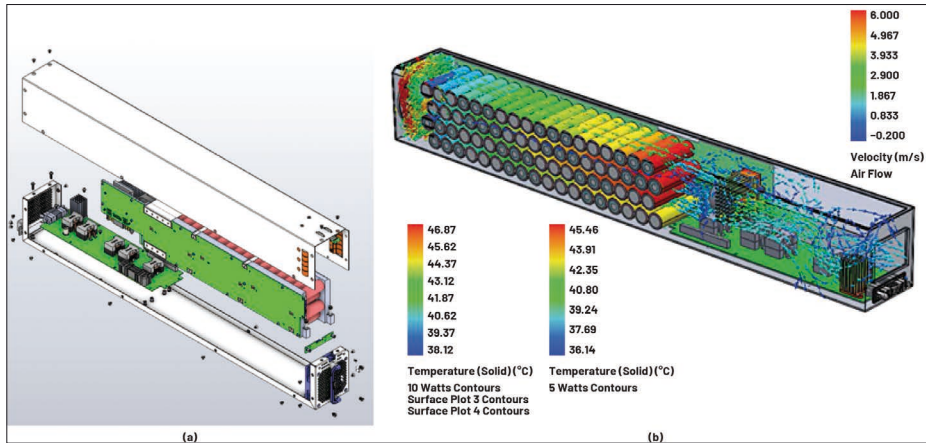
- **Entladebetrieb:** Dieser Modus wird aktiviert, wenn die Sammelschienenspannung für > 2 ms unter 48,5 V abfällt, wodurch sich das BBU-Modul entlädt. Das BBU-Modul sollte die Sammelschienenspannung innerhalb von 2 ms mit einer Backup-Zeit von 4 min übernehmen.

- **Ladebetrieb:** Dieser Modus liegt vor, wenn das BBU-Modul seine interne Ladeschaltung aktiviert, um den Akku zu laden, sofern alle Bedingungen erfüllt sind. Der Ladestrom kann je nach vorheriger Entladetiefe der Batteriekapazität zwischen 0 A und 5,5 A liegen. Zudem kann das vorgeschaltete System den Ladestrom über den Kommunikationsbus außer Kraft setzen. Es sollte ein Zeitüberwachungssystem für das Ladegerät vorhanden sein, das auf dem berechneten Ladestrom basiert.

- **State of health check (SOH)-Modus:** In diesem Modus überprüft das BBU-Modul routinemäßig die Kapazität des Akkus durch Zwangsentladung des Akkus. Das BBU-Modul führt den SOH-Test alle 90 Tage durch, um den End-of-Life-Status des Akkus zu bestimmen.

- **Systemsteuerungs-Modus:** Die BBU muss dem vorgelagerten System ermöglichen, den Betrieb des Lade-/Entladegeräts über den Kommunikationsbus zu steuern.

- Zusätzlich zu den Anforderungen an den Betrieb der BBU-Module spezifiziert das OCP den Standard für die Kapazität des Akkupacks,



**Bild 4. a) Eine in 3D gerenderte mechanische Übersicht eines ADI BBU-Moduls und b) Luftstromsimulationen**

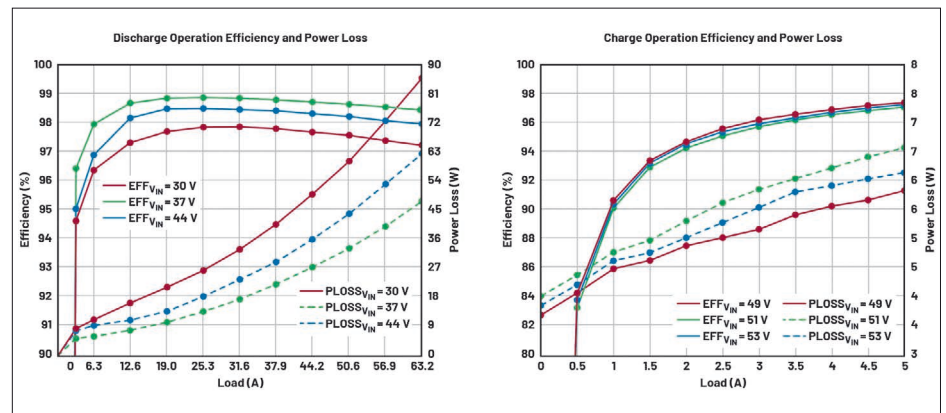
den Typ der Batteriezellen und die Konfiguration des Akkupacks. Die Spezifikationen sind folgende:

- **Kapazität des Akkupacks:** Das BBU-Modul muss über einen Zeitraum von 4 Jahren maximal 4 Minuten lang 3 kW Reserveleistung liefern können.
- **Batterietyp:** Das BBU-Modul sollte einen Li-Ion-Akku vom Typ 18650 mit einer Zellenspannung von 3,5 V bis 4,2 V, einer Batteriekapazität von mindestens 1,5 Ah sowie einem Nennladestrom von 30 A aufweisen.
- **Konfiguration des Akkupacks:** Das BBU-Modul sollte die Akkupack-Konfiguration 11S6P (sechs parallele Strings mit je 11 Zellen in Reihe) haben.

Zudem muss das BBU-Modul über ein BMS für Batterielade-/Entladelgorithmen, Schutzfunktionen, Steuersignale und Kommunikationsschnittstellen verfügen. Das BMS ist darüber hinaus für eine Zellenausgleichsschaltung verantwortlich, mit der die Zellenspannung des Akkupacks innerhalb von  $\pm 1\%$  (0,1 V) gehalten wird.

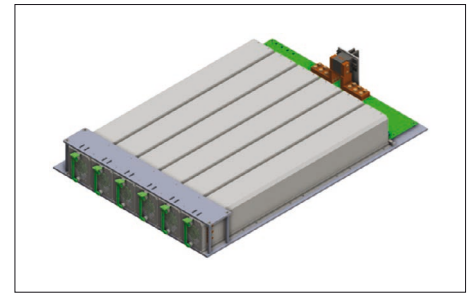
Das Blockdiagramm des Referenzdesigns (Bild 3) zeigt ausgewählte Komponenten und integriert verschiedene Elemente, die für bestimmte Aufgaben vorgesehen sind, sowie Schaltkreise, die die unterbrechungsfreie Stromversorgung, die Bestimmung des Modulzustands, die Fehlererkennung und die Modulkommunikation ermöglichen. Der LT8228, ein bidirektionaler Synchronregler, ist im BBU-Modul untergebracht. Dieses Bauelement gewährleistet die Stromumwandlung im Falle einer Netzunterbrechung und die Batterieladung im störungsfreien Betrieb. Der LT8551, ein 4-Phasen-Synchron-Boost-DC-to-DC-Phase-Expander, der mit dem LT8228 zusammenarbeitet, um die abgegebene Entladeleistung auf 3 kW pro BBU-Modul zu erhöhen. Neben den Stromwandler-ICs enthält das

BBU-Modul zudem den MAX32690, einen Arm-Mikrocontroller mit extrem niedrigem Stromverbrauch, der für den gesamten Systembetrieb verantwortlich ist. Der LTC2971, ein zweikanaliger Power-System-Manager, dient zur präzisen Erfassung und Fehlererkennung im Stromversorgungspfad und bietet zudem eine wichtige Spannungsdrosselungsfunktion. Der MAX31760, ein Präzisions-Lüfterdrehzahlregler, wurde für die Systemkühlung während der Lade- und Entla-



**Bild 6: Wirkungsgrad und Verlustleistung im Entlade- bzw. Ladebetrieb**

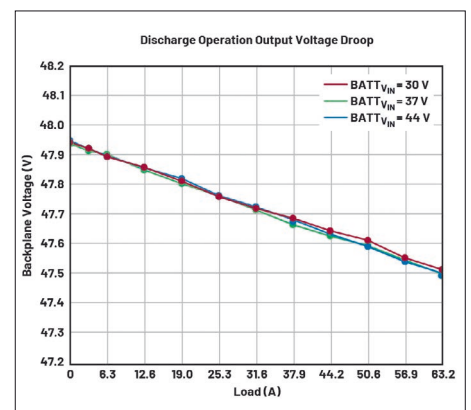
devorgänge eingesetzt. Ein EEPROM dient als Datenspeicher, der es dem Benutzer ermöglicht, alle brauchbaren Daten auf dem BBU-Modul während dessen Betriebszeit wiederherzustellen. Neben dem Stromwandler und dem House-keeping-Mikrocontroller wurde auch ein BMS-IC in das Design aufgenommen. Der ADBMS6948, ein 16-kanaliger Multizellen-Batteriemonitor, wird für die Überwachung der Batteriespannung verwendet, wobei sein inhärenter Coulomb-Zähler zur Bestimmung des Ladezustands (SOC) und der SOH-Werte für den Zellenausgleich und die Berechnung der Batterielebensdauer eingesetzt wurde. Die Überwachung des Batteriestatus erfolgt über den MAX32625, einen Arm-Mikrocontroller mit extrem niedrigem Stromver-



**Bild 5: 3D-Darstellung eines ADI-BBU-Trägers mit sechs eingesetzten BBU-Modulen**

brauch. Beide Mikrocontroller wurden sorgfältig ausgewählt, um den Gesamtstromverbrauch zu senken und so die Batterielebensdauer während des BBU-Schlafmodus zu verlängern.

Neben den mitgelieferten Teilen werden in diesem Referenzmodul auch das BBU-Modul (Bild 4a) und der BBU-Träger (Bild 5) hergestellt und gebaut, um das Referenzdesign in Übereinstimmung mit den mechanischen Spezifikationen des OCP ORV3 BBU-Moduls und des Trägers unterzubringen und zu demonstrieren. Der BBU-Träger verfügt über sechs Steckplätze für das BBU Modul, daher kann ein einzelner BBU-Träger je nach Bedarf bis zu 18 kW Backup-Leistung bieten.



**Bild 7: Ein Abfall der Ausgangsspannung während des Entladebetriebs**



## Architektonische Vorteile

Mechanisches Rendering und Luftstromsimulation sind zwei der architektonischen Vorteile des BBU-Modul-Referenzdesigns. Dazu gehört zunächst eine Visualisierung, die genaue und ansprechende Darstellungen ermöglicht. Durch die mechanisch-strukturelle Analyse werden Konstruktionsprobleme und mögliche Änderungen frühzeitig erkannt, was den gesamten Konstruktionsprozess unterstützt. Nicht zuletzt kann dies den Bedarf an tatsächlichen Prototypen verringern, deren Anfertigung zeitaufwendig und teuer sein kann. Darüber hinaus kann die Luftstromsimulation eine Leistungsanalyse liefern, bei der Identifizierung potenzieller Probleme helfen und die Designeffizienz erhöhen. Außerdem unterstützt die Simulation das Wärmemanagement, indem sie bei der Identifizierung von Hotspots hilft, die Wärmeverluste optimiert und die Zuverlässigkeit des Systems insgesamt erhöht. Darüber hinaus trägt die Planung von Batterieräumen im Hinblick auf Sicherheit und Einhaltung von Vorschriften zur Risikominderung bei, siehe Bild 4b für weitere Informationen.

## Daten und Ergebnisse

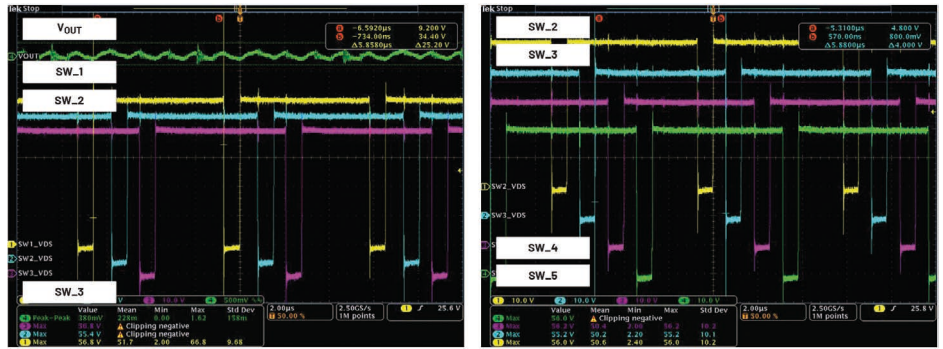
Die nachstehend aufgeführten Testergebnisse umfassen stationäre Leistungsmessungen, funktionale Leistungskurven, Temperaturmessungen und Betriebsübergänge. Die folgenden Konfigurationen wurden mit dem Referenzdesign für das BBU-Modul getestet:

Entladebetrieb (Aufwärtsmodus)	Ladebetrieb (Abwärtsmodus)
Eingangsspannung: 30 V bis 44 V	Eingangsspannung: 49 V bis 53 V
Ausgangsspannung: 47,5 V bis 48 V	Ausgangsspannung: 48 V
Ausgangslast: 0 A bis 63,2 A	Ausgangslast: 0 A bis 5 A
Schaltfrequenz 150 kHz	Schaltfrequenz 400 kHz

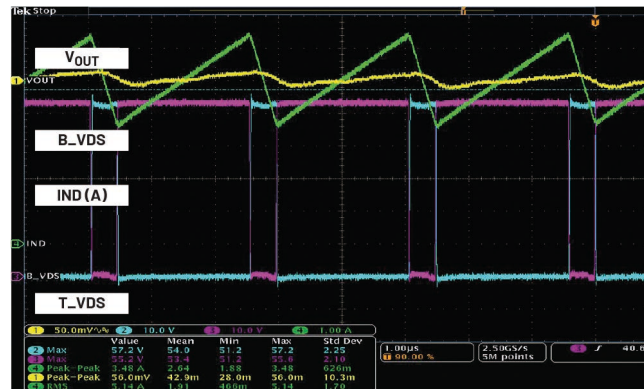
**Tabelle 1: Parameter des ORV3 BBU-Moduls**

## Wirkungsgrad und Verlustleistung

Das Referenzdesign des BBU-Moduls demonstriert die Fähigkeit, die in der ORV3-BBU-Spezifikation spezifizierten Einschränkungen in Bezug auf Effizienz und Verlustleistung zu übertreffen. Die Grenzen für den Wirkungsgrad beim Entladen und Laden wurden auf 97 % bzw. 95 % festgelegt. Während des Entladebetriebs betrug der gemessene durchschnittliche Wirkungsgrad bei halber Last (31,6 A) 98,5 %, während der durchschnittliche Wirkungsgrad bei voller Last (63,2 A) 98 % betrug. Eine wesentlich größere Induktivität, ein geringerer Drain-Source-On-Widerstand der MOSFETs und eine sorgfältig gewählte Schalt-



**Bild 8: Spannungsverläufe des Hauptreglers und des Expanders im Entladebetrieb bei 44 V Eingangsspannung und 63,2 A Ausgangslast**



**Bild 9: Spannungsverläufe eines Hauptreglers im Ladebetrieb bei 53 V Eingangsspannung und 5 A Ausgangslast**

frequenz sorgen für einen hohen Wirkungsgrad und einen geringeren Rippelstrom. Darüber hinaus erreicht das BBU-Modul im Ladebetrieb bei einer Last von 5 A einen hohen durchschnittlichen Wirkungsgrad von 97 %. Bei einer Schaltfrequenz von 400 kHz und gleichem Induktivitätswert konnte der Wirkungsgrad erhöht und die Verlustleistung minimiert werden. Ein hoher Wirkungsgrad und geringere Leistungsverluste verlängern die Lebensdauer der Batterie und verringern die für die thermische Kühlung erforderliche Lüfterdrehzahl (Bild 6).

Andererseits tragen die Leitungsverluste der Steuer- und Synchronisations-MOSFETs zu den Gesamtverlusten während der Entlade- und Ladevorgänge der BBU bei.

## Ausgangsspannungsabfall

Eine weitere Anforderung der ORV3 BBU-Spezifikation war die Einbeziehung eines Spannungsabfalls während des Entladebetriebs. Spannungsabfall ist der absichtliche Einbruch der BBU-Backplane-Spannung während des Betriebs der Systemlast. Die Spannung der BBU-Backplane ändert sich in Echtzeit als Reaktion auf den gemessenen Systemlaststrom unter Verwendung des LTC2971 In-Circuit-DAC. Dadurch bleibt der Spannungsabfall auf der Backplane zwischen Leerlauf und Vollast unter dem von der ORV3 BBU geforderten Grenzwert von  $\pm 1\%$  (Bild 7).

## Schaltwellenformen

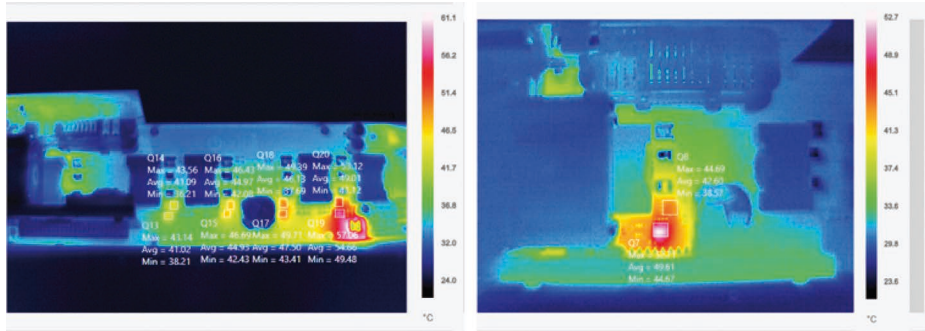
Die Untersuchung von Schaltwellenformen liefert wertvolle Informationen für die Leistungsbe-

wertung, Fehleranalyse, Wirkungsgradoptimierung, EMI-Reduzierung und Sicherheitsüberlegungen. Sie ermöglicht es den Technikern, Probleme zu erkennen und zu beheben, die Systemleistung zu optimieren und den zuverlässigen und effizienten Betrieb des BBU-Moduls im Rechenzentrum sicherzustellen.

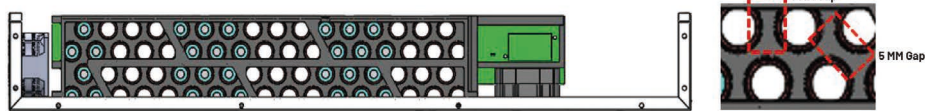
Der Schaltvorgang des BBU-Moduls ist während des Entladebetriebs von entscheidender Bedeutung, da er die Spannung von 30 V bis 44 V des Akkupacks in 48-V-Backplane-Spannung umwandelt. Dies wird durch den Einsatz eines synchronen Leistungs-MOSFETs erreicht, der durch das PWM-Signal des LT8228 präzise geregelt wird und von einem LT8551 unterstützt wird, der die Funktion des LT8228 wiederholt. Die Schaltfrequenz und die Stromaufteilung einer jeden Phase, die zu einer verstärkten Spannung führt, sind für deren Betrieb von entscheidender Bedeutung. Die Schaltkurven des Hauptumrichters und seines mehrphasigen Expanders bei Vollast sind in Bild 8 dargestellt. Im Ladebetrieb arbeitet der bidirektionale Wandler einphasig und reduziert die Backplane-Spannung von 49 V bis 53 V auf 44 V, um den Akkupack zu laden. Er arbeitet durch schnelles Schalten des synchronen Leistungs-MOSFETs und rampenförmiges Ansteigen des Spulenstroms. Die Schaltkurve des bidirektionalen Wandlers bei einer Last von 5 A ist in Bild 9 dargestellt.

## Thermische Leistung

Thermisches Verhalten und Wirkungsgrad müssen sorgfältig abgewogen werden. Zwar ist es von entscheidender Bedeutung, dass



**Bild 10: Thermisches Verhalten des Boards bei Vollast im Entlade- bzw. Ladebetrieb**



**Bild 11: Ausführung der Zwischenräume zwischen den Batteriezellen**

ein BBU-Modul hohen Temperaturen standhält und ohne Überhitzung arbeitet, gleichzeitig ist es aber auch wichtig, dass ein BBU-Modul mit optimalem Wirkungsgrad arbeitet und möglichst viel der Eingangsleistung in Ausgangsleistung umwandelt.

In Bild 10 betrug die niedrigste gemessene Temperatur des Boards nur 40 °C bis 60 °C während des Entladebetriebs, der etwa 4 Minuten lang unter Vollast lief. Im Ladebetrieb lag die Temperatur der synchronen MOSFETs unter 50 °C.

Ein sorgfältig konstruiertes Luftkühlssystem reduziert die Temperatur der Komponenten und verhindert ein thermisches Durchgehen. Die richtige Gestaltung der Zwischenräume zwischen den Zellen im Akkustapel und ein angemessenes Design für den Luftstrom sorgen für eine ausreichende thermische Kühlung (Bild 11).

## Betriebsübergang

Der Betriebsübergang eines BBU-Moduls ist entscheidend für die Sicherstellung einer unterbrechungsfreien Stromversorgung bei Stromunterbrechungen oder -schwankungen. Dieses Verfahren umfasst die einwandfreie Übertragung der Energie des Akkupacks auf die Backplane eines Rechenzentrums, wodurch sichergestellt wird, dass wichtige Systeme und Geräte für 4 Minuten funktionsfähig bleiben. Das BBU-Modul überwacht kontinuierlich die Sammel-

schienspannung der Backplane. Wenn die Sammelschienspannung für 2 ms auf den Aktivierungspegel des BBU-Moduls von 48,5 V abfällt, muss die Backplane-Spannung des BBU-Moduls ansteigen, um innerhalb von 2 ms die volle Leistung an die Sammelschiene abzugeben. Die Sammelschienspannung darf während des gesamten Übergangs nicht unter 46 V abfallen. Sobald das BBU-Modul erkennt, dass die Sammelschienspannung für mehr als 200 ms über 48,5 V liegt, beendet es den Entladebetrieb (Bild 12).

## Zusammenfassung

Rechenzentren gehen zunehmend zu 48-V-Systemen über, um Energie zu sparen. 48-V-Server-Racks sind in Bezug auf Strom- und Wärmeabgabe, Größe und Kosten effizienter als 12-V-Server-Racks, da sie einen geringeren Stromverbrauch, geringere Kupferverluste und eine bessere Dimensionierung der Stromschienen aufweisen. Für Server-Mikroprozessoren und Speicher in Rechenzentren eignet sich am besten eine hocheffiziente Front-End-Stufe, gefolgt von einem Spannungsregler, der auf die entsprechende Last abgestimmt ist. Diese Überlegungen und die neuesten Innovationen von OCP ebnen den Weg für eine effizientere Stromverteilung und ein intelligentes Batterie-Backup-System, das einen kontinuierlichen und fehlerfreien Betrieb ermöglicht.

Die Auswahl und Implementierung der richtigen Komponenten für das BBU-Modul und den Baugruppenträger vereinfacht das Gesamtdesign, verlängert die Lebensdauer des Akkus, reduziert die lange Entwicklungszeit und minimiert die Entwicklungs- und Produktionskosten. Darüber hinaus verkürzt die Durchführung von mechanischen Simulationen die Prototyping-Phase, liefert Daten, die zur Verbesserung der thermischen Kühlung und des Wärmemanagements verwendet werden können, und erhöht die Design-Sicherheit. Schließlich gewährleistet die Bereitstellung eines geeigneten und gut konzipierten Firmware-Algorithmus und einer entsprechenden Sequenz einen reibungslosen und mühelosen Betrieb der BBU.

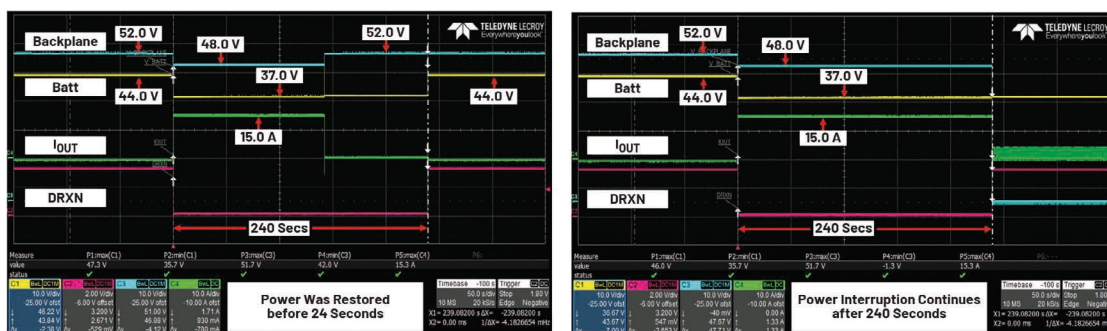
In Teil 2 dieser Serie werden die wichtigsten Mikrocontrollerfunktionen und -operationen der verschiedenen BBU-Module im Zusammenhang mit dem speziellen Design für das BBU-Housekeeping erläutert. Darüber hinaus wird ein detaillierter Überblick darüber gegeben, wie nützliche Informationen überwacht und dazu verwendet werden können, eine korrekte Workflow-Routine aufzubauen und auszuführen.

## Wer schreibt:

Christian Cruz ist Senior Applications Development Engineer bei Analog Devices, Inc. Er verfügt über mehr als 12 Jahre Erfahrung in den Bereichen analoges und digitales Design, Firmware-Design und Leistungselektronik.

Gary Sapia erwarb seinen Bachelor of Science in Ingenieurwissenschaften an der Texas A&M University. Er hat mehr als 28 Jahre Erfahrung im Bereich Design und Entwicklung analoger Systeme, einschließlich Leistungswandlung und Hochfrequenzlösungen für den Kommunikations- und GPS-Markt.

Marvin Neil Solis Cabueñas erwarb einen Bachelor-Abschluss in Elektrotechnik an der De La Salle University in Manila, Philippinen. Er verfügt über mehr als zehn Jahre Berufserfahrung in verschiedensten Bereichen wie der Programmierung eingebetteter Systeme, digitaler Signalverarbeitung, Simulationsmodellierung und anderen. ◀



**Bild 12: Übergang vom stabilen Betrieb zu einer Stromunterbrechung**