

Kombination unterschiedlicher Batteriemodule in einem System

# Nachhaltige Batteriespeichersysteme

Steigende Energiekosten und volatile Strompreise belasten Industrie und Gewerbe. Die zunehmenden Preisschwankungen an den Stromhandelsmärkten stellen jedoch nicht nur Risiken dar, sondern bieten auch Chancen. Diese hohen Preisausschläge sind Investitionssignale für den Ausbau von Batterie-Energiespeichersystemen (BESS), die für Preisarbitragegeschäfte genutzt werden können. Unternehmen können die Preisschwankungen am Markt zu ihrem Vorteil nutzen, indem sie BESS implementieren, um die eigenen Strombezugskosten zu senken oder die Preisdifferenzen am Tag wirtschaftlich auszunutzen.

Die wichtigste Einzelkomponente eines Batterie-Energiespeichersystems ist das verbaute Batteriemodul. Bei der Art des verbauten Batteriemoduls sollte differenziert werden zwischen Neubatterien (First Life), ausgedienten Batterien (Second Life) und überschüssigen Batterien (Second Chance).

- **First Life:** Hierbei handelt es sich um fabrikneue Batterien, die speziell für einen bestimmten Einsatzzweck produziert werden. Sie weisen die volle Nennkapazität und -leistung auf und sind frei von jeglicher Vorbenutzung.
- **Second Life:** Diese Batterien stammen aus Elektrofahrzeugen und haben bereits einen Lebenszyklus im mobilen Einsatz hinter sich. In Fahrzeugen werden Batterien in der Regel ausgetauscht, wenn ihre Restkapazität zum Beispiel unterhalb des Herstellersprechens liegt oder ein technischer Defekt innerhalb der Gewährleistungs- oder Garantieperiode auftritt.
- **Second Chance:** Dabei handelt es sich um Batterien, die zwar bereits produziert wurden, aber nie im vorgesehenen Einsatz, etwa im Elektrofahrzeug, eingesetzt wurden. Dies können Lagerüberschüsse, Produktionsüberhänge oder übrige Batterien aus einem Modellwechsel sein. Sie sind nahezu oder vollständig unbenutzt.

Second Chance bieten eine attraktive Balance zwischen der Kostenersparnis von Second-Life-Batterien und der Leistungsfähigkeit von First-Life-Batterien. Sie vereinen viele Vorteile von Neubatterien zu einem reduzierten Preis und tragen gleichzeitig zur nachhaltigen Ressourcennutzung bei. Im Vergleich zu Second Life Batterien verfügen sie über eine längere Restlebensdauer (Tabelle 1).

## Die Bedeutung der Systemarchitektur

In herkömmlichen BESS wird häufig eine zentrale Wechselrichterarchitektur verwendet. Vereinfacht gesagt, zeichnet sie sich dadurch aus, dass die Batteriemodule in Serie geschaltet sind, um die benötigte Gleichspannung (beispielsweise 800 V) zu erreichen. Diese hohe Gleichspannung wird beim Entladen durch einen zentralen Wechselrichter in Wechselstrom umgewandelt. Das Funktionsprinzip eines zentralen Wechselrichters ist dabei von entscheidender Bedeutung.

Die einzelnen Batteriemodule werden hintereinandergeschaltet, wodurch sich ihre Spannungen addie-



Bildquelle (alle Bilder): encore | DB

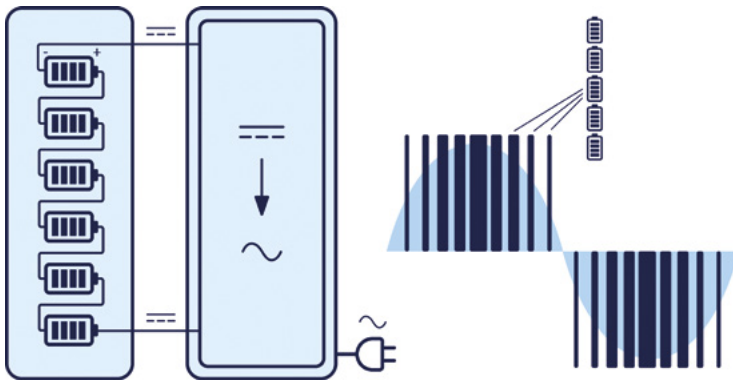


Abbildung 1. BESS mit Batteriemodulen in Serie geschaltet und Funktionsprinzip des zentralen Wechselrichters

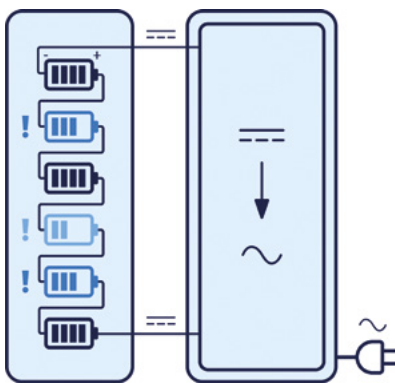


Abbildung 2. Probleme der Serienschaltung bei heterogenen Batteriemodulen

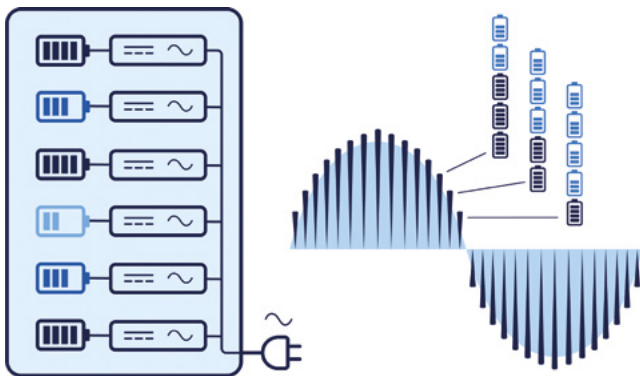


Abbildung 3. BESS mit einzeln angesteuerten Batteriemodulen und Funktionsprinzip mit modularer Multilevel-Wechselrichterarchitektur

ren. Dies führt zu der hohen Gesamtspannung, die für den Wechselrichter geeignet ist.

Der zentrale Wechselrichter konvertiert die hohe Gleichspannung in eine sinusförmige Wechselspannung. Dazu werden Schalter im Wechselrichter abwechselnd geschlossen, wodurch die Richtung des Stromflusses geändert wird und somit Wechselstrom entsteht. Die in Serie geschalteten Batteriemodule sind stets gleichzeitig am Laden oder Entladen, wobei

das schwächste Modul die maximale Lade- und Entladedauer bestimmt.

Zur Spannungserzeugung nutzt der Wechselrichter die Pulsweitenmodulation, bei der Schalter mit hoher Frequenz zwischen Ein- und Aus-Zuständen wechseln. Die Dauer der Einschaltzeiten variieren innerhalb einer Periode. Je länger eingeschaltet, desto höher die resultierende Durchschnittsspannung. Die Einschaltzeit folgt dabei einem Sinusverlauf. Das Ergebnis wird dann gefiltert, sodass aus den rechteckigen Pulsen eine glatte Sinusspannung entsteht (Abbildung 1).

Für einen effizienten Betrieb beim Einsatz eines zentralen Wechselrichters ist es wichtig, dass alle Batteriemodule möglichst identische elektrische Eigenschaften aufweisen, insbesondere in Bezug auf Kapazität und Innenwiderstand.

Bei heterogenen Batteriemodulen, etwa die sich in ihrem Gesundheitszustand („State of Health“, SoH) unterscheiden, wird die Leistungsfähigkeit des BESS durch das schwächste Modul begrenzt. Da alle Module bei einem zentralen Wechselrichter in Serie geschaltet sind, bestimmt das Modul mit dem geringsten SoH oder dem höchsten Innenwiderstand die Gesamtleistung des Systems. Ist ein Modul erschöpft oder defekt, beeinträchtigt dies die gesamte Kette (Abbildung 2).

Aus diesem Grund sind zentrale Wechselrichtersysteme für heterogene Batteriemodule, wie sie bei Second-Life- oder Second-Chance-Batterien vorkommen, mit Nachteilen verbunden. Aber auch bei der Nutzung von First-Life-Batterien können im Laufe der Zeit aufgrund unterschiedlicher Alterungsabläufe Ineffizienzen bei einem zentralen Wechselrichteransatz auftreten, die den Betrieb beeinträchtigen.

## Flexible und effiziente Nutzung der Batteriemodule

Die modulare Multilevel-Wechselrichterarchitektur (engl. modular multilevel converter, MMC) bietet einen innovativen Ansatz, um die genannten Herausforderungen zu überwinden. Dabei ist diese Technologie nicht neu. Für Hochvolt-DC-Übertragungen ist sie bereits seit rund zwanzig Jahren im Einsatz. Dieser MMC-Ansatz ist einfach skizziert, jedoch steckt die Komplexität in dem reibungslosen Zusammenspiel der verschiedenen Hard- und Softwarebestandteile.

Anstatt die Batteriemodule statisch in Serie zu verschalten, wird jedes Batteriemodul einzeln angesteuert und kann unabhängig vom Rest des Systems Energie liefern oder aufnehmen. Dies ermöglicht eine flexible und effiziente Nutzung der Batteriemodule, insbesondere wenn diese unterschiedliche Eigenschaften oder Zustände aufweisen. Jedes einzelne Batteriemodul wird mit einem Submodul des MMC verbunden. Über einen Master-Controller, der als Art Dirigent gegenüber den Submodulen fungiert, wird eine dynamische und stets wechselnde Verschaltung der Batteriemodule koordiniert. Dieses präzise ab-

	First Life	Second Life	Second Chance
Anschaffungskosten	am höchsten	niedrig	moderat bis niedrig
Leistungsfähigkeit	100%	40-80%	98-100%+
Restlebensdauer	maximal	moderat	hoch
Garantie	vollständig vom Hersteller	verhandelbare Produkt- und Kapazitätsgarantien	verhandelbare Produkt- und Kapazitätsgarantien
Nachhaltigkeit	hoher Ressourcenverbrauch	ressourcenschonend	ressourcenschonend
Modulvarianz	homogen, kontrollierte Qualitäten	heterogen, variierende Qualitäten	homogen, kontrollierte Qualitäten
Wartungsaufwand	gering	moderat, abhängig von Restkapazität	gering
Verfügbarkeit	hoch	abhängig von Rücklaufmengen	schwankend, abhängig von Produktionsüberschüssen

**Tabelle 1. Eigenschaften und Unterschiede der verschiedenen Arten von Batteriemodulen**

gestimmte Zusammenspiel zwischen Batteriemodul, Submodul und Master-Controller erzeugt eine sinusförmige Treppenspannung. Dadurch kann der BESS direkt an das Netz angeschlossen werden, ohne dass ein zentraler Wechselrichter erforderlich ist (Abbildung 3). Diese Architektur bietet mehrere entscheidende Vorteile:

- **Optimale Nutzung der Batteriemodule:** Leistungsfähigere Module können stärker belastet werden, während schwächere Module entsprechend weniger beitragen. Dies ermöglicht eine gleichmäßige Alterung der Batterien und maximiert die Gesamtkapazität des Systems.
- **Flexibilität bei der Modulintegration:** Unterschiedliche Batteriemodule in Bauart, Hersteller, Alter oder Zellchemie, können in ein gemeinsames BESS integriert werden. Dies ist besonders vorteilhaft beim Einsatz von Second Life und Second Chance Batterien, aber auch bei First Life Batterien, sobald die Alterung einen Effekt zeigt.
- **Erhöhte Zuverlässigkeit:** Da jedes Modul unabhängig agieren kann, führt ein Ausfall eines einzelnen Moduls nicht automatisch zum Stillstand des gesamten Systems. Der Betrieb kann mit minimaler Beeinträchtigung fortgesetzt werden.
- **Effiziente Erzeugung der Sinusspannung:** Durch die stufenweise Zusammenschaltung der Module wird eine hochqualitative Annäherung an die Sinuswelle erreicht. Dies reduziert harmonische Verzerrungen und verbessert die Netzverträglichkeit. Für den Einsatz dieser Technologie bei der Deutschen Bahn hat dies beispielsweise den Vorteil, dass durch wenige softwareseitige Änderungen eine 16,7 Hz Netzspannung erzeugt werden kann.
- **Vereinfachte Wartung und Erweiterbarkeit:** Module können sehr schnell hinzugefügt oder entfernt werden, der Speicher muss dafür nur kurzzeitig außer Betrieb genommen werden. Dies reduziert enorm Ausfallzeiten und vereinfacht den Systemausbau.

Der MMC-Ansatz revolutioniert die Art und Weise, wie Batteriemodule in einem BESS gesteuert und genutzt werden. Durch die individuelle Ansteuerung und flexible Verschaltung der Module werden Effizienzsteigerungen erzielt und die Lebensdauer des Gesamtsystems verlängert. Diese Technologie ermöglicht es, die Herausforderungen bei der Nutzung heterogener Batteriemodule zu überwinden und bietet eine robuste und skalierbare Lösung für die Energiebedürfnisse von Industrie und Gewerbe.

### Wirtschaftlichkeit von BESS: Mehr als nur Investitionskosten

Die Wahl der richtigen Systemarchitektur für ein Batteriespeichersystem hat nicht nur technische, sondern vor allem auch wirtschaftliche Implikationen. Während die initialen Investitionskosten (CAPEX) oft



**Nahaufnahme eines Wechselrichters**



**Das Unternehmen encore | DB entwickelt und produziert nachhaltige Batteriespeichersysteme für den DB-Konzern, für Industrieunternehmen, Projektentwickler oder Stadtwerke/Kommunen**

im Fokus von Entscheidern stehen, bestimmen die laufenden Betriebskosten (OPEX) in hohem Maße die Gesamtwirtschaftlichkeit eines BESS. Die vorgestellte MMC-Architektur bietet neben den zuvor genannten technischen Vorteilen auch wirtschaftliche Verbesserungen:

- **Höhere Round-trip-Efficiency (RtE):** Durch die individuelle Ansteuerung der Batteriemodule und die Vermeidung von zusätzlichen Wandlungsverlusten erreicht das System eine RtE von ca. 94 %, deutlich über dem Marktdurchschnitt von etwa 85 % bei der Nutzung zentraler Wechselrichtersysteme. Eine höhere RtE bedeutet, dass weniger Energie bei der Speicherung und Rückgewinnung verloren geht. Dies führt zu niedrigeren Betriebskosten, da weniger Strom zugekauft werden muss, und erhöht die Einnahmen bei der Stromvermarktung durch effizientere Nutzung der gespeicherten Energie.
- **Reduzierte OPEX:** Die Möglichkeit, einzelne Batteriemodule unabhängig voneinander zu überwachen und bei Bedarf auszutauschen, ohne das gesamte System zu beeinträchtigen. Wartungskosten werden gesenkt, da nicht mehr ganze Batteriepacks ausgetauscht werden müssen. Die Lebensdauer des BESS wird verlängert, was zu geringeren Kosten über den gesamten Lebenszyklus führt.
- **Flexibilität und Zukunftssicherheit:** Die Fähigkeit, heterogene Batteriemodule zu integrieren und neue Technologien problemlos zu implementieren. Investitionssicherheit, da das System an zukünftige Anforderungen angepasst werden kann, ohne hohe Zusatzkosten. Vermeidung von Abschreibungen auf veraltete Technologien.

Entscheider sollten sich von der rein kapitalorientierten Betrachtung (Euro/kWh) lösen. Obwohl die initialen CAPEX wichtig sind, bieten sie allein kein vollständiges Bild der Wirtschaftlichkeit eines BESS. Wichtige Faktoren sind hier die Gesamtkosten über den Lebenszyklus inklusive der Berücksichtigung von OPEX, Ausfallrisiken, Effizienzverlusten und Restwert. Zudem reduzieren längere Garantien und ein zuverlässiger Service das finanzielle Risiko und verbessern die Projektfinanzierbarkeit. Aber auch die Anpassungsfähigkeit ist hier von Bedeutung. Ein System, das sich an technologische Entwicklungen anpassen kann, vermeidet zukünftige Ersatzinvestitionskosten.

Ein BESS mit höherer RtE und niedrigeren OPEX kann trotz höherer initialer Investitionskosten über den Lebenszyklus kostengünstiger sein als ein günstigeres System mit niedrigerer Effizienz und höheren Betriebskosten.

### Fazit

Die steigenden Energiekosten und die Volatilität der Strompreise stellen Unternehmen vor große Herausforderungen, bieten jedoch auch Chancen. Nachhaltige Batteriespeicher mit MMC-Architektur ermöglichen es, diese Chancen effektiv zu nutzen. Durch einen höheren Gesamtwirkungsgrad, reduzierte Betriebskosten und flexible Anpassungsmöglichkeiten. Es gilt, über die reinen Investitionskosten hinauszublicken und eine ganzheitliche Wirtschaftlichkeitsbetrachtung anzustellen.

[www.encore.deutschebahn.com/encore-de](http://www.encore.deutschebahn.com/encore-de)

### Autor



**Fabian Cordes,**

Co-Founder & Leiter Partnerschaften und Kundenentwicklung,  
encore | DB by DB Bahnbau Gruppe GmbH, Frankfurt am Main