

Herausforderungen und Strategien beim Betrieb von Batteriegroßspeichern am Beispiel M5BAT

Lucas Koltermann und Dirk Uwe Sauer

Die Integration erneuerbarer Energien wie Wind- und Photovoltaikanlagen erfordert zunehmend flexible und zuverlässige Energiespeicherlösungen. Batteriegroßspeichersysteme (BESS) sind Schlüsselkomponenten zur Stabilisierung des Stromnetzes, zur Bereitstellung von Systemdienstleistungen wie Primär- und Sekundärregelleistung sowie zum Ausgleich von Energieerzeugung und -verbrauch.

In diesem Artikel werden praktische Erkenntnisse aus dem Betrieb des Forschungs-BESS M5BAT präsentiert, das verschiedene Batterietechnologien, darunter Blei-Säure- und Lithium-Ionen-Batterien, im Einzel- und Hybridbetrieb kombiniert. Der Schwerpunkt liegt auf dem Ladezustandsmanagement, dem Zell-

balancing, der Systemeffizienz und der Batteriealterung unter realen Betriebsbedingungen. Die Ergebnisse zeigen, dass gezielte SOC-Fenster und aktive Balancingstrategien die nutzbare Kapazität maximieren und die Alterung minimieren, während Multi-Use-Betriebsszenarien die Gesamteffizienz des Systems verbessern.

Die Ergebnisse bilden eine Grundlage für die Verbesserung bestehender BESS sowie für die Planung künftiger Batteriegroßspeicher und unterstützen die langfristige Zuverlässigkeit, Leistung und Netzintegration erneuerbarer Energiequellen.

1 Motivation

Die zunehmende Integration erneuerbarer Energien in die Stromnetze erfordert flexible und zuverlässige Speichertechnologien, um Schwankungen in der Erzeugung und im Verbrauch auszugleichen. Batteriegroßspeicher (BESS) spielen hierbei eine zentrale Rolle, da diese Flexibilität bieten und Systemdienstleistungen wie Primär- und Sekundärregelleistung erbringen und damit zur Netzstabilität beitragen. Trotz der zunehmenden Verbreitung von BESS bestehen weiterhin offene Fragen hinsichtlich Effizienz, Alterung, Balancing und Betriebsstrategien, die für den wirtschaftlichen und sicheren Einsatz entscheidend sind.

Im Rahmen der hier vorgestellten Arbeiten werden Einblicke in den Betrieb eines Forschungs-Batteriegroßspeichers gegeben und praxisrelevante Erkenntnisse systematisch analysiert. Der Schwerpunkt liegt auf der Identifikation von Betriebsparametern, die einen direkten Einfluss auf die Leistungsfähigkeit, Effizienz und Lebensdauer von Batteriegroßspeichern haben.

Sowohl für die Wissenschaft als auch für die Industrie sollen belastbare Daten und Erkenntnisse bereitgestellt werden, die als Grundlage für die kontinuierliche Verbesserungen bestehender Speicherlösungen und

die Planung zukünftiger Großspeicherprojekte dienen. Die systematische Untersuchung von Betriebsparametern und deren Einfluss auf die Effizienz, Alterung und Flexibilität von BESS ermöglicht die Ableitung fundierter Handlungsempfehlungen. Diese Empfehlungen unterstützen den langfristigen, zuverlässigen Betrieb dieser Schlüsseltechnologie und erleichtern gleichzeitig die Integration erneuerbarer Energien in die Stromnetze.

2 Batteriegroßspeicher

Grundlage der hier dargestellten Erkenntnisse sind die Forschungsarbeiten am Batteriegroßspeicher M5BAT – „Modularer Multi-Megawatt Multi-Technologie Mittelspannungs-Batteriespeicher“. Nach einem generellen Überblick über die Speicherlandschaft in Deutschland wird das Projekt M5BAT genauer vorgestellt. Im Anschluss werden aktuelle Fragestellungen aus Industrie und Forschung beleuchtet und die Ergebnisse der experimentellen Arbeiten werden zusammengefasst.

2.1 Überblick über BESS in Deutschland

In Deutschland ist der überwiegende Anteil an stationären Batteriespeichern mit ca. 80,3% der installierten Energie Heimspeichern zuzuordnen (Stand Dezember 2025). Batteriegroßspeicher machen in Deutschland nur einen Anteil von ca. 14,6% an stationären Speichern, bezogen auf die installierte Energie (Stand 09.12.2025), aus [1, 2]. Dabei wird jeder Batteriespeicher mit einer Leistung > 1MW oder einer Energie > 1MWh als Batteriegroßspeicher gewertet [1].

Batteriegroßspeicher sind dennoch von besonderer Bedeutung, da diese verschiedene Systemdienstleistungen wie Primärregelleistung (FCR) und Sekundärregelleistung (aFRR) zuverlässig erbringen und damit einen wichtigen Beitrag zur Systemstabilität

Autoren

Dr.-Ing. Lucas Koltermann
Prof. Dr. rer. nat. Dirk Uwe Sauer
Chair for Electrochemical Energy Conversion and Storage Systems
Institute for Power Electronics and Electrical Drives (ISEA)
Institute for Power Generation and Storage Systems (PGS)
E.ON ERC
Center for Ageing, Reliability and Lifetime Prediction of Electrochemical and Power Electronic Systems (CARL)
RWTH Aachen University
Aachen, Germany
Lkoltermann@isea.rwth-aachen.de

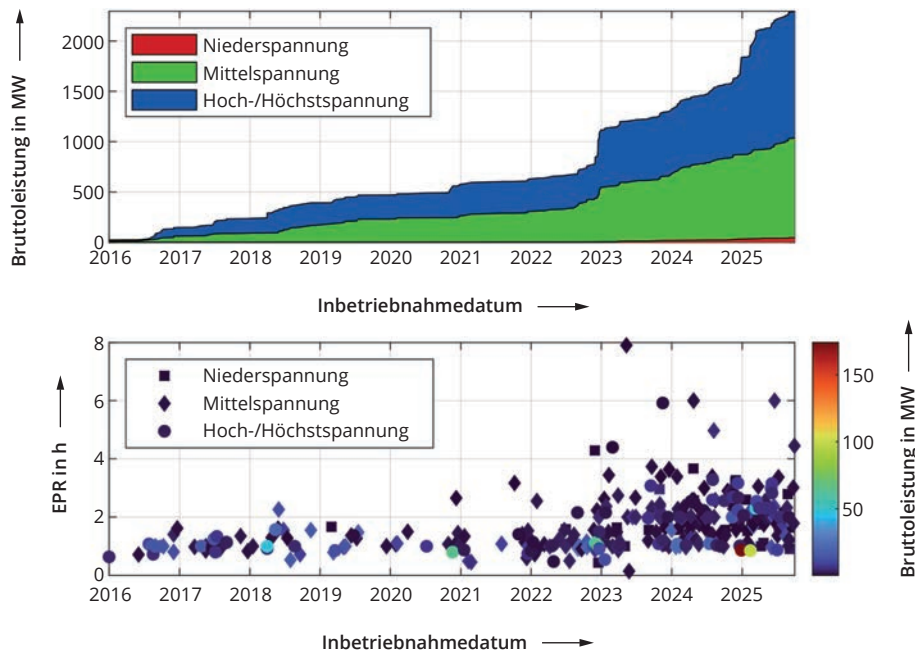


Bild 1. Entwicklung in Betrieb genommener Batteriegroßspeicher (> 1 MW oder > 1 MWh) in Deutschland bis 01.10.2025 (Stand 05.10.2025) [3, 4].

leisten. Nach [1, 2] verschiebt sich die Anwendung der zuletzt installierten und geplanten BESS zur Integration erneuerbarer Energien, Multi-Use-Betrieb und Grid Boostern. Dabei ist auch ein Anstieg des Energie-zu-Leistungs-Verhältnisses in h (engl.: Energy to power ratio, EPR) von ca. 1 h bis 2022 auf ca. 2-3 h in 2025 zu beobachten [1, 3]. In Bild 1 sind die kumulierten installierten Leistungen sowie die Energie-zu-Leistungs-Verhältnisse der Batteriespeicher nach Inbetriebnahmedatum gezeigt. Weitere Informationen zu Batteriespeichern in Deutschland sind unter <https://battery-charts.de/battery-charts/> verfügbar [1].

Ein wesentlicher Treiber für die Verschiebung der Anwendungen von BESS ist die zunehmende Sättigung von klassischen Dienstleistungen wie der Primärregelung, was durch die Marktdaten verdeutlicht wird. In Bild 2 sind auf der linken Seite die präqualifizierte BESS-Leistung für

die FCR und das Marktvolumen der FCR in Deutschland über die Zeit dargestellt. Auf der rechten Seite in Bild 2 ist die präqualifizierte FCR-Leistung für 2024 und 2025 abgebildet. Hieraus wird deutlich, dass die präqualifizierte Leistung die Nachfrage weit übersteigt und nicht alle Kraftwerke oder Batteriespeicher am FCR-Markt teilnehmen können. Selbst bei Betrachtung der BESS ist ersichtlich, dass bereits seit 2023 mehr BESS-Leistung für die FCR präqualifiziert ist, als benötigt wird. Somit müssen mit Batteriespeichern weitere Märkte bedient werden, um die BESS aktiv nutzen zu können. Dazu werden aktuell der Sekundärregelungsmarkt und das Intraday-Trading für BESS erschlossen.

2.2 Batteriespeicher M5BAT

M5BAT ist ein einzigartiger Forschungsbatteriespeicher, welcher vom Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA) der RWTH Aachen University be-

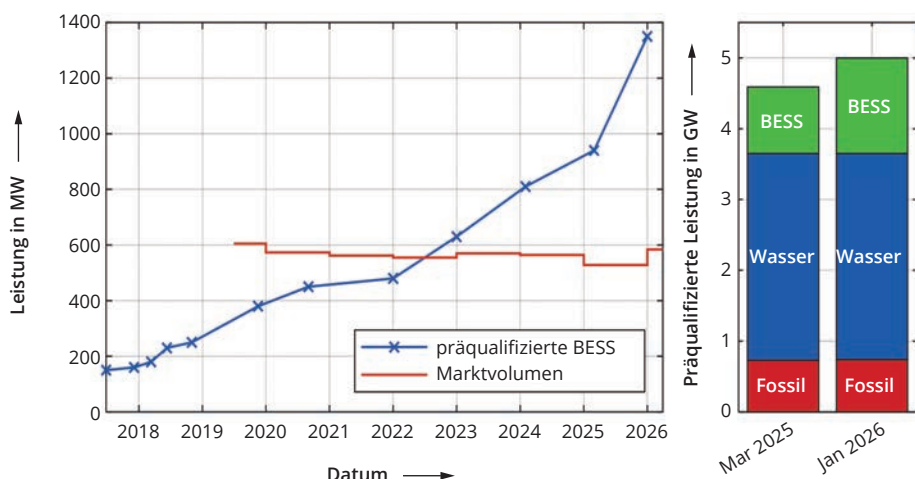


Bild 2. links: Entwicklung der präqualifizierten FCR-Leistung von BESS und FCR-Bedarfsentwicklung in Deutschland; rechts: präqualifizierte FCR-Leistung nach kategorisierten Kraftwerksarten (Stand: 15.01.2026) [4, 5].

trieben wird. Der BESS M5BAT wurde aufgebaut, um verschiedene Batterietechnologien einzeln und im Hybridbetrieb zu testen und wurde bereits Teil verschiedener Veröffentlichungen zu den Themen Planungsaspekte von Batteriegroßspeichern, Datenanalysen über den Primärregelungsbetrieb, Entwicklungen des Energiemanagementsystems und verschiedenen Betriebstests [6-9]. M5BAT besteht aus zehn Batterieeinheiten mit fünf verschiedenen Batterietechnologien: Blei-Säure (geschlossen und verschlossen) und Lithium-Ionen (LMO, LFP, LTO). Aufgrund von Umbau- und Ertüchtigungsmaßnahmen sind die Bleibatterieeinheiten 2025 außer Betrieb genommen worden und werden durch neuartige Technologien ersetzt. Somit sind aktuell (Stand Dezember 2025) nur sechs Batterieeinheiten in Betrieb. Jede Batterieeinheit ist mit einem einzelnen Wechselrichter verbunden, und zwei Wechselrichter sind mit einem Transformator auf der Niederspannungsseite verbunden. Die fünf Transformatoren sind dann über eine Sammelschiene an den Netzknoten angeschlossen. Das gesamte System wird über ein Energiemanagementsystem (EMS) gesteuert, das auch die Daten aller Batterieeinheiten und Wechselrichter aggregiert. Zusätzlich zum EMS gibt es ein umfassendes Datenerfassungssystem, das alle generierten Daten aufzeichnet und speichert.

Weitere Informationen und eine Live-Übersicht über M5BAT können unter <https://m5bat.isea.rwth-aachen.de/> eingesehen werden [10].

3 Methodik

3.1 Herausforderungen zum Betrieb von Batteriegroßspeichern

Um den aktuellen Stand von BESS realistisch zu bewerten, ist ein Blick auf die operativen Herausforderungen unerlässlich. Die am M5BAT gesammelten Daten dienen dabei als Fallstudie, deren Ergebnisse weit über die einzelne Anlage hinausreichen. Sie zeigen auf, welche Aspekte für Batteriespeichersysteme allgemein gelten und wo der Betrieb aktuell noch Einschränkungen aufweist.

Balancing & Batteriealterung

Ein BESS besteht aus mehreren tausend einzelnen Batteriezellen, die zusammen die Energie und Leistung bereitstellen. Bei der Nutzung von Zentralwechselrichtern begrenzen die schwächste Zelle und die beiden Zellen mit dem größten SOC-Unterschied das gesamte Batteriesystem und schränken die nutzbare Kapazität ein. Um dem entgegenzuwirken, ist im BMS ein Balancingsystem implementiert. Die genaue Funktionsweise des Balancingsystems und dessen Wirksamkeit sind jedoch oft nicht bekannt. Zusätzlich zum Balancing wird ein BESS auch durch unterschiedlich gealterte Batteriezellen eingeschränkt. Daher ist es

für den Betrieb eines BESS wichtig, den Alterungszustand der Batterieeinheiten kontinuierlich zu überwachen und zu kennen. Im Betrieb ist hingegen zumeist nur zu beobachten, dass die nutzbare Kapazität über die Lebensdauer sinkt. Eine Zuordnung der „verlorenen“ Kapazität auf Batteriealterung und Balancing ist oft nicht möglich. Dabei ist festzuhalten, dass durch Batteriealterung Kapazität irreversibel verloren geht, während die durch Balancing „verlorene“ Kapazität hingegen reversibel ist. Aus dem Betrieb und den verschiedenen Tests mit dem Forschungsspeicher M5BAT lassen sich Balancing und Batteriealterung exemplarisch einordnen.

Effizienz

Im Vergleich zu anderen Speichertechnologien gelten BESS als hocheffizient. Ihre hohe Round-Trip Effizienz von ca. 90 % wurde in Laboren und im Testbetrieb nachgewiesen. Dennoch unterscheidet sich die Effizienz im Labor und im Testbetrieb von der unter realen Bedingungen. Anhand des BESS M5BAT wurde die tatsächliche Effizienz des Gesamtsystems sowie der einzelnen Komponenten untersucht und Verbesserungsmöglichkeiten identifiziert und quantifiziert.

Energiemanagementsystem

Abschließend werden das EMS und der Leistungsaufteilungsalgorithmus von M5BAT vorgestellt. Diese Komponenten übernehmen die zentrale Aufgabe, die Energieflüsse innerhalb des Batteriesystems zu steuern. Insbesondere steuert der Leistungsaufteilungsalgorithmus die Verteilung der Lade- und Entladeströme unter Berücksichtigung des jeweiligen Zustands auf die einzelnen Batterieeinheiten. Der Einfluss dessen auf die Alterung und Effizienz von Batterien wurde bereits in [11, 12] gezeigt.

3.2 Erprobung und Umsetzung

Der Batteriespeicher M5BAT ist mit einem umfangreichen Datenloggingsystem ausgestattet, das Wetter- und Peripheriedaten, BESS-Systemdaten, Wechselrichterdaten, Batterieeinheitendaten und Einzelzellendaten aufgezeichnet. Diese Daten ermöglichen die nachfolgend gezeigten Auswertungen. M5BAT ist aktuell für die Erbringung von Primär- und Sekundärregelleistung (FCR & aFRR) präqualifiziert. Neben dem regulären Betrieb werden regelmäßige Batterietests durchgeführt, um die Batterieperformance und das Alterungsverhalten zu erfassen. Das EMS und der Leistungsaufteilungsalgorithmus wurden kontinuierlich verbessert, um die Stabilität, Effizienz und Leistungsfähigkeit von M5BAT zu steigern. Auf Basis der Daten aus dem regulären Betrieb, den aufgetretenen Betriebsfehlern, den Präqualifizierungstests und Performancetests sowie den für das EMS entwickelten Verbesserungen werden Ergebnisse gezeigt und Schlussfolgerungen für andere BESS gezogen.

Balancing & Batteriealterung

Die Batteriealterung und der Status des Balancings werden anhand von qOCV-Messungen an den Lithium-Ionen-Batterieeinheiten bewertet. Dabei werden auf der AC-Seite der Wechselrichter konstante Leistungen von 1/10 E eingestellt. Dies führt dazu, dass in der Ladephase die Ladeleistung der Batterien niedriger ist als die Entladeleistung der Batterien in der Entladephase. Nach den Messungen werden die Zellspannungen und Zellströme für die Auswertung in Form einer „differential voltage analysis“ (DVA) genutzt. Mit Hilfe der DVA lassen sich die Verschiebungen der Ladezustände der Zellen gegeneinander untersuchen und der Status des Balancings bestimmen. Exemplarisch wird die LTO-Batterieeinheit herangezogen und es werden zwei unterschiedliche Zeitpunkte gezeigt. Somit lassen sich auch die zeitlichen Veränderungen des Balancings beschreiben.

Die DVA-Kurven der einzelnen Zellen werden zudem miteinander verglichen und eine Stauchung oder Streckung der DVA-Kurve gegenüber anderen Zellen gibt die relative Alterung der Zellen zueinander an. Da die qOCV-Messung einen Vollzyklus darstellt, lässt sich daraus auch direkt die nutzbare Kapazität bestimmen.

Effizienz

Die Effizienz wird als Round-Trip-Effizienz (RTE) für die Komponenten Batterieeinheit, Wechselrichter, Transformator sowie das gesamte BESS berechnet. Exemplarisch für die Batterien bedeutet dies wie in Gleichung (1) gezeigt, dass die entladene Energie $E_{dis,Batt}$ durch die geladene Energie $E_{cha,Batt}$ geteilt wird.

$$RTE_{Batt} = \frac{E_{dis,Batt}}{E_{cha,Batt}} \cdot 100 \% \quad (1)$$

Wenn im Berechnungszeitraum zwischen Startzeitpunkt und Endzeitpunkt eine Differenz im Ladezustand (SOC) der Batterien auftritt, wird diese bei der Berechnung der RTE korrigiert. Die Berechnungen der RTEs der anderen Komponenten werden analog dazu ausgeführt.

Energiemanagementsystem

Für den effizienten Betrieb von M5BAT spielt der Leistungsaufteilungsalgorithmus eine entscheidende Rolle. Dazu werden die wesentlichen Erkenntnisse aus dessen Entwicklung und die damit verbundenen technischen Verbesserungen erläutert. Spezifische Analysen zum Energiemanagementsystem und dem Leistungsaufteilungsalgorithmus sind bereits in Fachpublikationen [11-13] veröffentlicht.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Balancing & Batteriealterung

Die Erkenntnisse und Ergebnisse des Balancings von Lithium-Ionen-Batterien werden

am Beispiel der M5BAT LTO-Batterieeinheit dargestellt. Das Balancing dieser Batterieeinheit funktioniert in vielen Zeiträumen gut, jedoch gibt es ebenso Zeiträume an denen größere Fehler sichtbar werden. Während die LMO-Einheiten des BESS M5BAT als Beispiel für ein sehr stabiles Zellbalancing dienen, traten bei der spezifischen Konfiguration der LFP-Batterieeinheit signifikante Abweichungen auf. Dies unterstreicht, dass die Wirksamkeit des Balancings stark von der gewählten Systemarchitektur und dem Batteriemanagementsystem (BMS) abhängt und nicht als pauschale Eigenschaft der Zellchemie gewertet werden kann.

In Bild 3 sind die qOCV-Messungen und die DVA auf Zellebene für die LTO-Batterieeinheit dargestellt (September 2023). Der gleiche Test wurde ca. ein halbes Jahr später (172 Tage) durchgeführt. Die qOCV und DVA dieses Tests sind in Bild 4 dargestellt. Anhand dieser Ergebnisse lassen sich die Veränderungen nach einem halben Jahr FCR-Betrieb und die Veränderungen im State of Balancing (SOB) analysieren. Jede farbige Linie in Bild 3 und Bild 4 steht für eine einzelne Batteriezelle der LTO-Batterieeinheit.

Der erste gezeigte qOCV-Test der LTO-Batterieeinheit zeigt zwei markante Maxima in der DVA-Kurve. Der größte Unterschied zwischen den Positionen der Maxima der Zellen von Maximum 1 beträgt 14,16 Ah. Im Vergleich zum perfekten SOB in Maxima 1 der DVA sind 17,7 % der Kapazität nicht nutzbar, könnten jedoch wiederhergestellt werden, was zu einer nutzbaren Kapazität von mehr als 100 % führen würde. Dies ist durch die Überdimensionierung des Herstellers verursacht. Bei der Analyse des Unterschieds zwischen den beiden Maxima in Bild 3 beträgt der Unterschied zwischen der besten und der schlechtesten Zelle 3,88 Ah, was 4,86 % der Nennkapazität entspricht. Dieser Unterschied ist auf einen Kapazitätsverlust aufgrund unterschiedlich degradierter Zellen zurückzuführen.

Der zweite Test in Bild 4 weist im Vergleich zum ersten Test in Bild 3 einige Ausreißer auf, die die nutzbare Kapazität einschränken. Außerdem ist nur das erste Maximum der DVA für alle Zellen deutlich erkennbar, während das zweite Maximum aufgrund der Verschiebung der SOC's nicht für alle Zellen erkennbar ist. Aus den Ergebnissen lässt sich daher keine Aussage zur Alterung ableiten. Die Streuung der Position des ersten Maximums beträgt 28,3 Ah, was im Vergleich zum perfekten SOB einer nicht nutzbaren Kapazität von 35,4 % der Nennkapazität entspricht. Im Vergleich zu den Ergebnissen in Bild 3 hat sich das SOB verschlechtert und die nicht nutzbare Kapazität hat sich innerhalb eines halben Jahres verdoppelt.

Durch die qOCV-Messungen lassen sich zudem die nutzbare Kapazität und Aspekte der Batteriealterung bestimmen. Um die indivi-

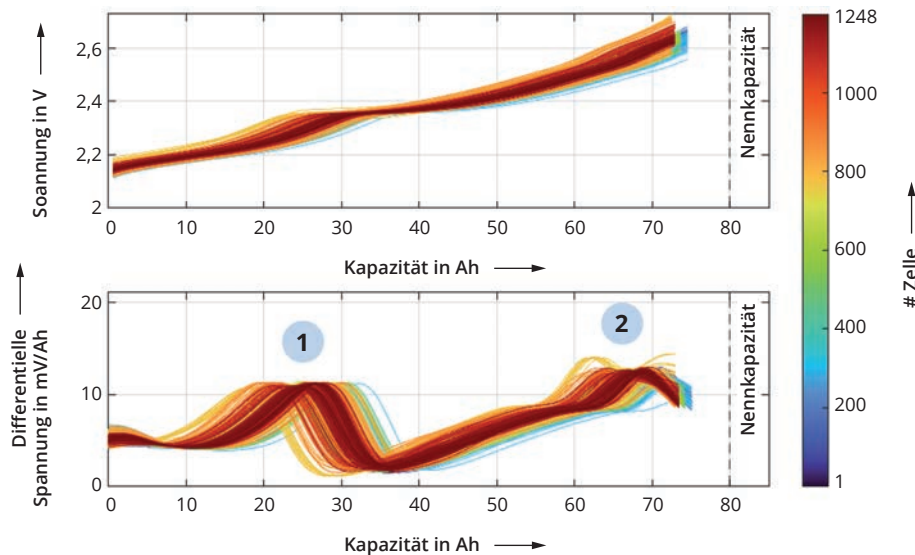


Bild 3. Oben: qOCV-Kurven für einzelne Zellen der LTO-Batterieeinheit, unten: DVA-Kurven für einzelne Zellen der LTO-Batterieeinheit. qOCV und DVA wurden am 27. September 2023 durchgeführt.

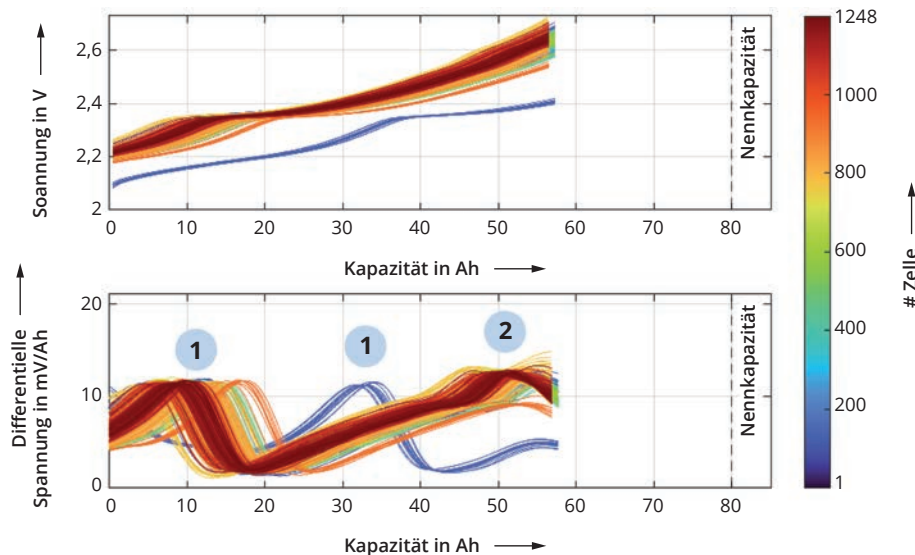


Bild 4. Oben: qOCV-Kurven für einzelne Zellen der LTO-Batterieeinheit, unten: DVA-Kurven für einzelne Zellen der LTO-Batterieeinheit. qOCV und DVA wurden am 17. März 2024 durchgeführt.

duelle Zellalterung zu bestimmen, kann die DVA-Kurve der Zelle mit der DVA-Kurve der Zelle zum „Begin of Life“ verglichen werden. Dabei geben die Stauchung, sowie die Ausprägung und Verschiebung der charakteristischen Merkmale Indikatoren für die Zellalterung [14–16]. Des Weiteren lassen sich die Kurven unterschiedlicher Zellen miteinander vergleichen, um Alterungsdifferenzen zwischen den Zellen zu ermitteln.

Durch regelmäßige qOCV-Messungen und Auswertungen können die nutzbare Kapazität und die Zellalterung nachverfolgt werden. Für die LTO-Batterieeinheit des BESS M5BAT wurden diese Messungen regelmäßig ausgeführt, sodass die nutzbare Kapazität in Bild 5 verfolgt werden kann. Zudem ist in Bild 5 oben die Kapazitätsdifferenz im Maximum 1 der DVA-Kurve im zeitlichen Verlauf dargestellt. Diese Differenz ist eine Verschiebung des Ladezustandes der Zellen

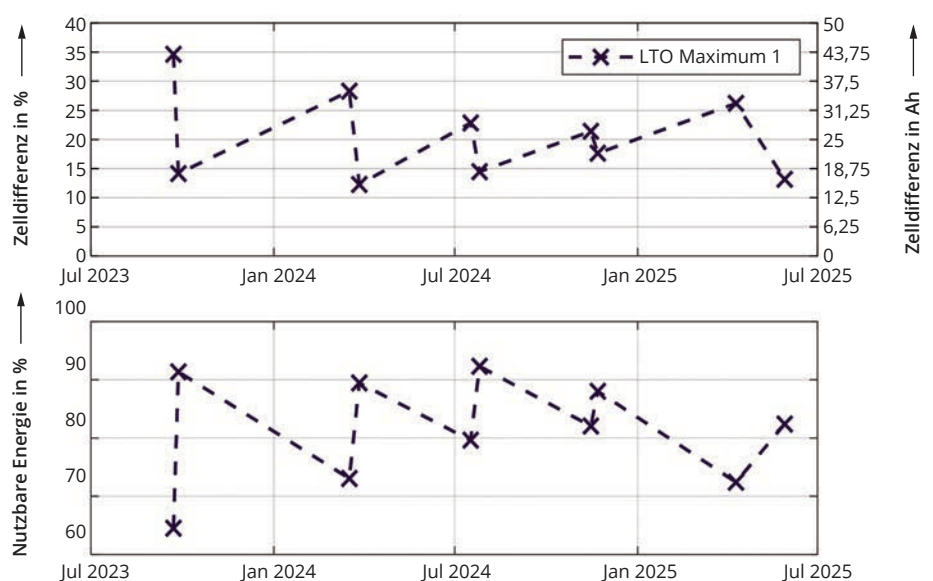


Bild 5. oben: maximale Differenzen zwischen der Position des ersten Maximums der Zellen; unten: zeitlicher Verlauf der nutzbaren Energie des Gesamtsystems.

gegeneinander, welche durch Balancing ausgeglichen werden kann.

Beide Teilgrafiken in Bild 5 zeigen ein Sägezahnmuster. Dieses entsteht, da im Laufe der Betriebszeit die Zellen auseinanderdriften, das Balancing diesen Drift jedoch nicht ausgleicht. Der sprunghafte Anstieg der nutzbaren Kapazität zeigt die Phase, in der manuelles Balancing, d.h. händisches Anpassen der Ladezustände der Module vorgenommen wurde. Hierdurch ist nach dem manuellen Balancing mehr Kapazität nutzbar.

4.2 Effizienz

Die Effizienzen des BESS M5BAT werden für jedes Betriebsszenario jeweils für das Gesamtsystem, die Transformatoren, die Umrichter und die Batterieeinheiten angegeben. In Bild 6 sind die Effizienzen der Betriebsszenarien „Primärregelleistung“ und „Intraday-Handel“ gezeigt. Zudem sind die Effizienzen für einen Vollzyklus als Referenz abgebildet. Die Effizienzen der Primärregelleistung basieren auf dem Jahr 2023, da der BESS M5BAT in diesem Jahr überwiegend in der Primärregelleistung eingesetzt wurde. M5BAT erreicht dabei eine RTE von knapp 78%. Auffällig sind die niedrigen Effizienzen der Transformatoren und Umrichter, die sich auf den Teillastbetrieb bei geringer Auslastung (< 10%) zurückführen lassen. Die Batterieeinheiten selbst erreichen trotz des gemischten Betriebs von Blei-Säure- und Lithium-Ionen-Batterien eine RTE von 95,5%. Für den Intraday-Handel wurden ausschließlich Lithium-Ionen-Batterien des Typs LMO eingesetzt. Da hierbei die RTE-Werte der Transformatoren und Umrichter um mehrere %-Punkte angestiegen sind, ist auch der RTE-Wert des Gesamtsystems mit knapp 85% höher als im Regelleistungsbetrieb. Im Referenztest bei Volllastung der Umrichter steigen die Effizienzen nochmals an, verglichen mit dem Intraday-Trading-Szenario. Es gibt hierbei

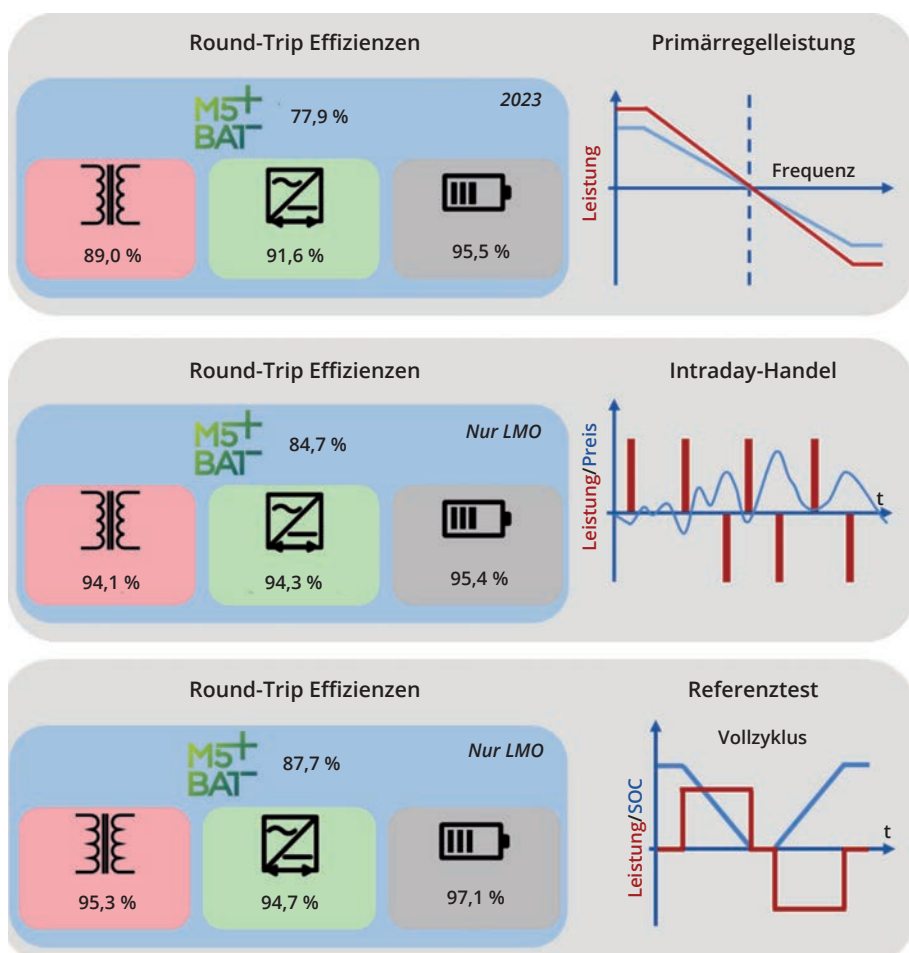


Bild 6. Komponenteneffizienzen des Batteriespeichers M5BAT unter verschiedenen Betriebsarten: Intraday-Handel [17, 18] Referenztest [19].

nur minimale Pausenzeiten, sodass Umrichter und Transformatoren eine noch höhere Auslastung aufweisen.

Im Realbetrieb des BESS M5BAT wurden Wirkungsgrade von rund 80 % erzielt, womit die Effizienzwerte aus Einzeltests und Laboren (ca. 90 %) erwartungsgemäß unterschritten wurden. Die Ergebnisse zeigen jedoch klare Hebel zur Optimierung auf: Neben fortschrittlicheren Systemdesigns bietet vor allem eine gesteigerte Auslastung – etwa durch die Kombination verschiedener Betriebsszenarien (Multi-Use) – großes Potenzial, die Effizienz von BESS über die Ergebnisse von M5BAT hinaus zu steigern.

4.3 Energiemanagementsystem

Das EMS von M5BAT wird am ISEA kontinuierlich weiterentwickelt und wurde im Laufe der Betriebsjahre mehrfach verbessert und aktualisiert. Das SOC-Management im Leistungsaufteilungsalgorithmus (engl.: power distribution algorithm, PDA) ist eine der wichtigsten Verbesserungen des EMS von M5BAT. Die Entwicklung des PDA in mehreren Versionen begann Ende 2020 [11, 12]. Das SOC-Management wurde seit 2021 eingeführt und getestet und ist in [11–13] veröffentlicht.

Ein Überblick über das EMS von M5BAT und die integrierten Funktionen ist in Bild 7

gezeigt. Das EMS stellt dabei auch die Schnittstelle zu allen Feldgeräten sowie zur externen Vermarktung dar. Dementsprechend sind die Kommunikationskanäle zu Batterien, Wechselrichtern, der Schaltanlage, sowie den Vermarktern implementiert. Die Funktionen des EMS umfassen die Datenaggregation der Feldgeräte sowie Sollleistungsberechnungen für die Regelreserveprodukte bzw. den Multi-Use-Betrieb. Für

die Primärregelleistung ist zudem ein SOC-Management erforderlich und im EMS integriert. Die Struktur des BESS M5BAT aus unterschiedlichen Batterieeinheiten erfordert ein intelligentes Energiemanagement. Daher bilden ein Leistungsaufteilungsalgorithmus und integrierte Testfunktionen das Herzstück des Systems, um den verschiedenen Technologien gerecht zu werden.

Leistungsaufteilung

Der Leistungsaufteilungsalgorithmus hat die Aufgabe, die geforderte Gesamtsolleistung nach unterschiedlichen Regeln auf die einzelnen Batterieeinheiten zu verteilen. Eine Kurzübersicht über den in M5BAT implementierten Algorithmus ist in Bild 8 dargestellt. Als Eingaben für den Algorithmus werden kontinuierliche Daten zum Leistungssollwert des BESS sowie Statusmeldungen der Umrichter und Batterieeinheiten benötigt. Zudem werden benutzerdefinierte Einstellwerte Ziel-SOC-Bereich, Leistungslimits, Soll-Energiedurchsätze und Stufen-Aktivierungssignale je Batterieeinheit benötigt. Der Algorithmus in Version V.2023 hat fünf Stufen, die nacheinander durchlaufen werden. Dabei sind Stufen 2a bis 2c (blau markiert) optional und können je nach Batterieeinheit deaktiviert werden. Die Ausgabe des Algorithmus ist ein Array aller Soll-Batterieleistungen.

Die Stufen des Algorithmus werden nacheinander bearbeitet und sollen verschiedene Aspekte des Betriebs von M5BAT verbessern. In Stufe 1 wird die Gesamt-Solleistung auf eine Batterieeinheit verteilt, solange diese unter einem Schwellwert liegt. Dabei wird die Batterieeinheit gewählt, die zuletzt im aktiven Modus war. Damit wird sichergestellt, dass möglichst wenige Umschaltvorgänge zwischen den Umrichtern stattfinden und dass keine „kleinen“ Leistungen auf mehrere Umrichter verteilt werden und es zu sehr niedrigen Effizienzen kommt. Für Stufen 2a bis 2c gilt ein gemeinsames

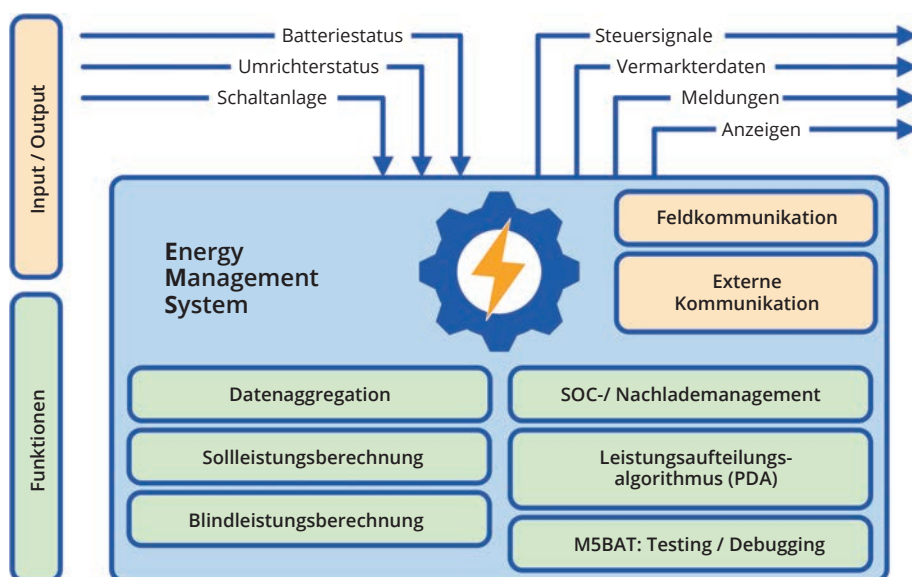


Bild 7. Funktionen eines Energiemanagementsystems eines BESS am Beispiel von M5BAT [4].

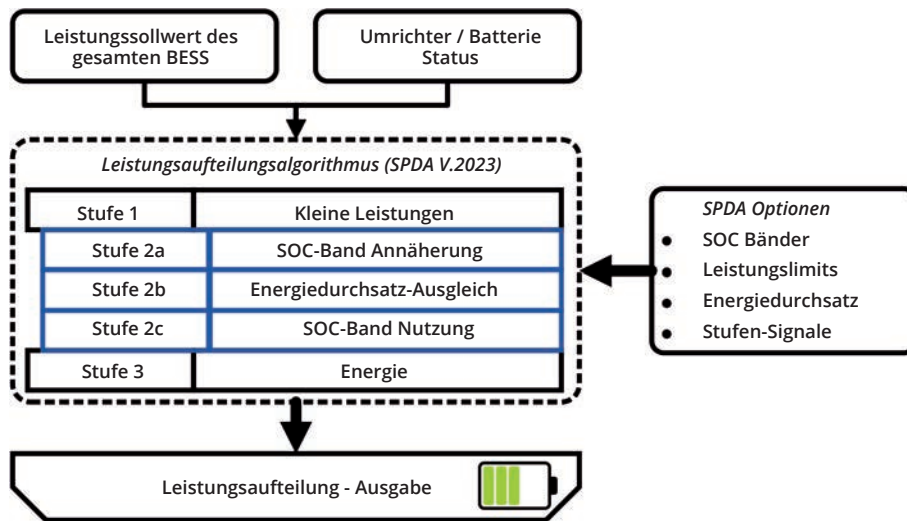


Bild 8. Stufen des Leistungsauflagealgorithmus inkl. Eingaben, Ausgaben und benutzerdefinierter Optionen [4].

SOC-Band, das je Batterieeinheit definiert wird. In Stufe 2a werden Batterieeinheiten priorisiert, die sich außerhalb des Soll-SOC-Bandes befinden, sodass diese schnellstmöglich in das gewünschte SOC-Band eingeführt werden. Stufe 2c nutzt hingegen die Breite der SOC-Bänder aus und bevorzugt Batterieeinheiten mit großem Abstand zum Rand der SOC-Bereiche. Hierbei müssen die Ladezustände der Batterieeinheiten innerhalb der SOC-Bänder liegen. Batterieeinheiten mit breiteren SOC-Bändern erreichen durch diese Logik einen höheren Energiedurchsatz. Durch Stufe 2b lässt sich dies beheben, und es lassen sich benutzerdefinierte Energiedurchsätze erreichen. Die letzte Stufe des Algorithmus, Stufe 3, ist stets aktiv und verteilt die verbleibende Leistung nach energetischer Sortierung der Batterieeinheiten. Dies bedeutet, dass die Entladung oder Ladung möglichst lange ermöglicht wird und Dienstleistungen möglichst lange erbracht werden können.

Weitere Informationen, Beschreibungen und Auswertung zum Leistungsauflagealgorithmus sind in [11–13] veröffentlicht.

Datenauswertung

In Bild 9 wird der monatliche Energiedurchsatz auf die Batterieeinheiten bezogen dargestellt, während in Bild 10 die SOC-Verteilungen der Batterieeinheiten über das gesamte Jahr gezeigt werden. Sowohl der Energiedurchsatz als auch die SOC-Verteilungen können direkt vom EMS und dessen Einstellungen beeinflusst werden und haben ihrerseits wiederum Einfluss auf die Batteriealterung.

Der Energiedurchsatz in Bild 9 ist als prozentualer Anteil je Batterieeinheit gestapelt dargestellt. Die vier Bleibatterieeinheiten haben dabei in der Regel einen Anteil von zusammen weniger als 10 %. In Monaten, in denen Batterietests mit diesen Batterieeinheiten durchgeführt wurden, ist der Energiedurchsatz vereinzelt höher. Dieses Verhalten ist durch das Energiemanagement-

system und die gewählten Einstellungen vorgesehen, da dadurch eine geringere zyklische Belastung erreicht wird. Im Gegensatz dazu erbringt die LTO-Batterieeinheit ca. 15-25 % des Gesamtenergiedurchsatzes,

obwohl diese nur knapp 3 % der nominal installierten Energiemenge bereitstellt. Da es sich bei der LTO-Batterieeinheit um eine sehr zyklenstabile Technologie handelt, kann dieser Vorteil im Gesamtsystem durch das EMS ausgenutzt werden. Alle anderen lithumbasierten Batterieeinheiten ordnen sich mit ca. 5 % bis 15 % des Gesamtenergiedurchsatzes dazwischen ein. Diese werden bei identischen Einstellungen des EMS betrieben.

Die in Bild 10 dargestellten SOC-Einstellungen und SOC-Verteilungen verdeutlichen, dass die Wahl der SOC-Fenster zu einem breiteren Energiedurchsatz der Batterie führt. Die roten Dreiecke markieren die Grenzen der SOC-Bänder der einzelnen Batterieeinheiten, während die Violinendiagramme die Verteilungen der SOC-Werte über das gesamte Jahr je Batterieeinheit darstellen. Insbesondere ist bei der LTO-Batterieeinheit ein deutlich breiteres SOC-Band erkennbar, wohingegen bei den Bleibatterien die SOC-Bänder deutlich schmaler gewählt wurden. Der überwiegende Anteil der SOC-Werte liegt zudem innerhalb

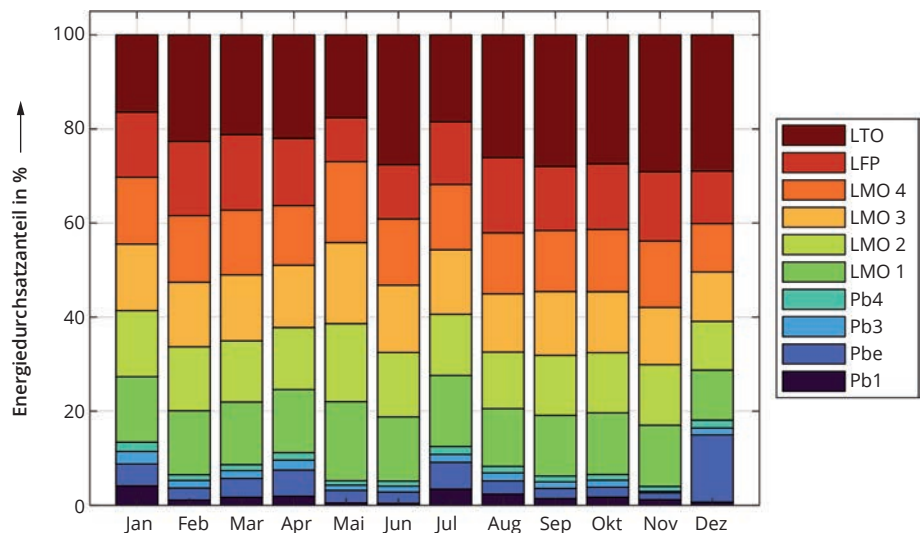


Bild 9. Monatlicher Energiedurchsatzanteil der jeweiligen Batterieeinheit des Jahres 2024.

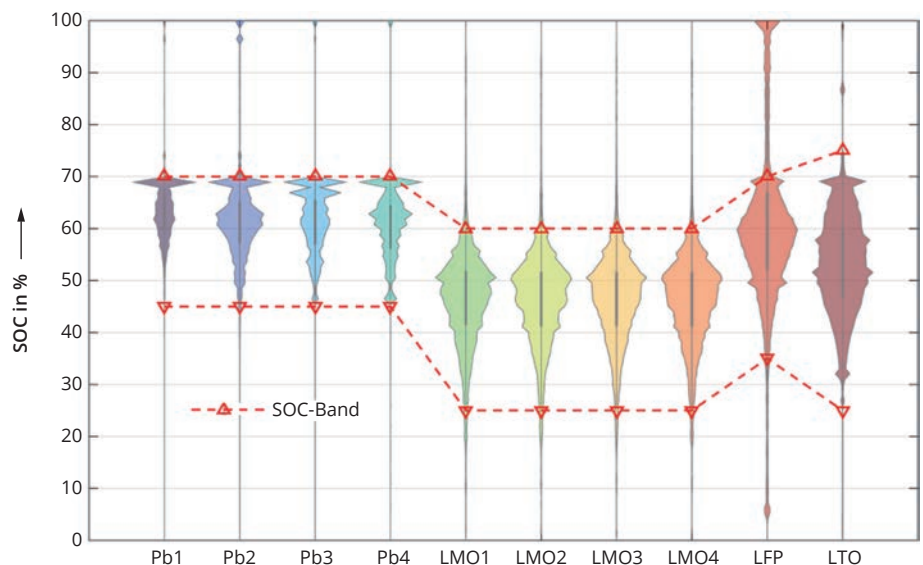


Bild 10. Verteilung der Ladezustände der jeweiligen Batterieeinheit im Jahr 2024.

der gewählten SOC-Grenzen. Durch Batterietests, Vollzyklen sowie insbesondere bei der LFP-Batterieeinheit auftretende Wartungsladungen zur Kalibrierung des SOC-Schätzers kommt es vereinzelt zu Ausreißern außerhalb der definierten SOC-Bänder. Diese Abweichungen sind jedoch in den meisten Fällen betrieblich vorgesehen und aufgrund der zuvor genannten Gründe erwünscht. Die Wahl der SOC-Bereiche soll die kalendarische Alterung minimieren, indem die Batterie möglichst lange in einem bevorzugten Bereich betrieben wird. Für die Bleibatterieeinheiten wurde daher ein SOC-Band im oberen SOC-Bereich gewählt, während für die Li-Batterieeinheiten das SOC-Band bis auf 25 % nach unten erweitert wurde.

5 Zusammenfassung & Lessons Learned

Die Untersuchungen am BESS M5BAT liefern wesentliche Erkenntnisse für den Betrieb und die Optimierung stationärer Batteriespeicher. Ein zentrales Ergebnis betrifft das Zellbalancing: Die Analysen mittels qOCV-Messungen und Differential Voltage Analysis (DVA) zeigen, dass der Drift der Zellladezustände die nutzbare Kapazität signifikant einschränken kann. Regelmäßiges, automatisiertes oder manuelles Balancing ermöglicht die Wiederherstellung der Kapazität und reduziert ungleichmäßige Alterungseffekte. Dies unterstreicht die Bedeutung eines gezielten Balancing-Managements, insbesondere bei Lithium-Ionen-Technologien mit Zentralwechselrichter.

Die Effizienzbetrachtungen verdeutlichen, dass das Betriebsszenario entscheidend für die Round-Trip-Effizienz (RTE) ist. So liegen die RTE-Werte im Primärregelleistungsbetrieb bei etwa 78 %, während im Intraday-Handel mit selektiv eingesetzten Lithium-Ionen-Batterien Werte von knapp 85 % erreicht werden. Diese Ergebnisse zeigen, dass Multi-Use-Betriebsszenarien und intelligente Lastverteilung das Effizienzpotenzial von Batteriegroßspeichern deutlich erhöhen können.

Ein weiteres zentrales Ergebnis betrifft das Energiemanagement: Die gezielte Steuerung der SOC-Bänder und die Priorisierung von Batterieeinheiten nach Technologie und Energie sind entscheidend, um den Energieumsatz zu maximieren und gleichzeitig die Alterung zu minimieren. Differenzierte SOC-Fenster für verschiedene Batterietypen ermöglichen, sowohl kalendarische Alterung als auch zyklische Belastungen ohne Betriebseinschränkung zu reduzieren.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass der langfristige Betrieb von Batteriegroßspeichern nur durch die Kombination aus kontinuierlicher Datenerfassung, intelligentem SOC-Management, gezieltem Balancing und angepassten Betriebsszenarien nachhaltig optimiert werden kann. Für zu-

künftige Anwendungen ist insbesondere die Anpassung der Betriebsstrategien an die jeweilige Batterietechnologie entscheidend. Darüber hinaus eröffnen die Integration von Multi-Use-Betrieb und die kontinuierliche Weiterentwicklung des Energiemanagements erhebliche Potenziale für Effizienzsteigerung, Leistungsstabilität und Verlängerung der Lebensdauer von Großspeichern.

6 Acknowledgement

Teilweise wurden Inhalte dieses Artikels bereits im Rahmen der 23rd Wind & Solar Integration Workshop (WIW 2024) Konferenz im Beitrag „Lessons learned from operating a large-scale battery storage system – challenges and improvements“ [20] und der Dissertation „Analyse und Optimierung der Zuverlässigkeit und Effizienz von hybriden Batteriespeichern am Beispiel von M5BAT“ [4] veröffentlicht.

7 Literatur

- [1] Lehrstuhl für Elektrochemische Energiewandlung und Speichersystemtechnik, *Battery-Charts*. [Online]. Verfügbar unter: <https://battery-charts.de/> (Zugriff am: 11. Dezember 2025).
- [2] J. Figgner, C. Hecht, D. Haberschus, J. Bors, K. G. Spreuer, K.-P. Kairies, P. Stenzel und D. U. Sauer, „The development of battery storage systems in Germany: A market review (status 2023)“, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.06762>.
- [3] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, *Marktstammdatenregister*. Verfügbar unter: <https://www.marktstammdatenregister.de/MaStR>. Zugriff am: 7. Dezember 2023.
- [4] L. Koltermann, „Analyse und Optimierung der Zuverlässigkeit und Effizienz von hybriden Batteriespeichern am Beispiel von M5BAT“ Dissertation, Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen, 2025.
- [5] 50Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, TenneT TSO GmbH und Transnet-BW GmbH, „Präqualifizierte Leistung in Deutschland“, 1. Feb. 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.regelleistung.net/xsproxy/api/staticfiles/regelleistung/startseite/pq-leistung-in%20deutschland.pdf>. Zugriff am: 25. März 2024.
- [6] T. Thien, D. Schweer, D. vom Stein, A. Moser und D.U. Sauer, „Real-world operating strategy and sensitivity analysis of frequency containment reserve provision with battery energy storage systems in the german market“, *Journal of Energy Storage*, Jg. 13, S. 143–163, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.est.2017.06.012>.
- [7] K. Jacqué, L. Koltermann, J. Figgner, S. Zurmühlen und D.U. Sauer, „The influence of frequency containment reserve on the efficiency of a hybrid stationary large-scale storage system“, *Journal of Energy Storage*, Jg. 52, S. 104961, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104961>.
- [8] K. Jacqué, L. Koltermann, J. Figgner, S. Zurmühlen und D.U. Sauer, „The Influence of Frequency Containment Reserve on the Operational Data and the State of Health of

the Hybrid Stationary Large-Scale Storage System“, *Energies*, Jg. 15, Nr. 4, S. 1342, 2022, <https://doi.org/10.3390/en15041342>.

- [9] J. Muenderlein, M. Steinhoff, H. Axelsen und D.U. Sauer, „Planning, building, efficiency measurement and determination of forecast data of a grid-scale hybrid 5 MW / 5 MWh battery storage system“ in *Driving innovation in ICT energy infrastructure*: INTELEC 2017, Gold Coast, Australia: 22-26 October 2017, Goldcoast Convention & Exhibition Centre, Broadbeach, Queensland, Australia, 2017, S. 314–320, <https://doi.org/10.1109/INT-LEC.2017.8214155>.
- [10] Lehrstuhl für Elektrochemische Energiewandlung und Speichersystemtechnik, *M5BAT Live Übersicht*. [Online]. Verfügbar unter: <https://m5bat.isea.rwth-aachen.de/> (Zugriff am: 30. Dezember 2025).
- [11] L. Koltermann, M. Celi Cortés, J. Figgner, S. Zurmühlen und D.U. Sauer, „Improved rule-based power distribution algorithm for hybrid battery storage systems and real-world validation“, *Journal of Energy Storage*, Jg. 86, S. 111360, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111360>.
- [12] L. Koltermann, K. Jacqué, J. Figgner, S. Zurmühlen und D.U. Sauer, „Operational Validation of a Power Distribution Algorithm for a Modular Megawatt Battery Storage System“, *Batteries & Supercaps*, Jg. 6, Nr. 3, 2023, e202200414, <https://doi.org/10.1002/batt.202200414>.
- [13] L. Koltermann, M. C. Cortés, S. Zurmühlen und D.U. Sauer, „Energy Management of Large-Scale Battery Storage Systems: Field Evaluation of Battery Aging and System Efficiency“ in *2024 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT EUROPE)*, Dubrovnik, 2024, S. 1–5, <https://doi.org/10.1109/ISGTEUROPE62998.2024.10863752>.
- [14] I. Bloom, A. N. Jansen, D.P. Abraham, J. Knuth, S.A. Jones, V.S. Battaglia und G.L. Henriksen, „Differential voltage analyses of high-power, lithium-ion cells: 1. Technique and application“, *Journal of Power Sources*, Jg. 139, 1-2, S. 295–303, 2005, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.07.021>.
- [15] I. Bloom, J. Christophersen und K. Gering, „Differential voltage analyses of high-power lithium-ion cells: 2. Applications“, *Journal of Power Sources*, Jg. 139, 1-2, S. 304–313, 2005, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.07.022>.
- [16] J. Chen, M. N. Marlow, Q. Jiang und B. Wu, „Peak-tracking method to quantify degradation modes in lithium-ion batteries via differential voltage and incremental capacity“, *Journal of Energy Storage*, Jg. 45, S. 103669, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103669>.
- [17] M.C. Cortés, N. Nsir, L. Koltermann, S. Zurmühlen, J. van Ouwkerk und D. Uwe Sauer, „M5Use: An Optimization Framework for the Multi-Use Operation Scheduling of Large-Scale Battery Storage Systems“ in *2024 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT EUROPE)*, Dubrovnik, 2024, S. 1–5, <https://doi.org/10.1109/ISGTEUROPE62998.2024.10863143>.
- [18] L. Koltermann, M. Celi Cortés, N. Nsir, J. van Ouwkerk und D. U. Sauer, „Performance Testing of a Megawatt-Scale Battery

Storage for Energy Trading“ in 17th International Renewable Energy Storage Conference 2023 (IRES 2023), Aachen, 2024, S. 4-11, https://doi.org/10.2991/978-94-6463-455-6_2.

- [19] L. Koltermann, M. Celi Cortés, J. Figgner, S. Zurmühlen und D.U. Sauer, „Power curves of megawatt-scale battery storage technologies for frequency regulation and energy trading“, Applied Energy, Jg. 347, S. 121428, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121428>.
- [20] L. Koltermann, M. Celi Cortés, J. van Ouwkerk und D.U. Sauer, „Lessons learned from operating a large-scale battery storage system – challenges and improvements“ in 23rd Wind & Solar Integration Workshop (WIW 2024): 07-11 Oct. 2024, Helsinki, 07-11 October 2024, S. 16-24, <https://doi.org/10.1049/icp.2024.3764>.

Abstract

Challenges and Strategies in Operating Large-Scale Battery Storage Systems using M5BAT as an Example

The integration of renewable energy sources such as wind and photovoltaic systems increasingly requires flexible and reliable energy storage solutions. Battery energy storage systems (BESS) are key components for stabilizing power grids, providing ancillary services such as frequency containment reserve and automatic frequency restoration reserve, and helping manage fluctuating generation and consumption.

This article presents practical insights from the operation of the M5BAT research

BESS, which combines different battery technologies, including lead-acid and lithium-ion batteries, in single and hybrid operation. Focus is placed on state-of-charge management, cell balancing, system efficiency, and battery aging under real operational conditions. Results demonstrate that targeted SOC windows and active balancing strategies maximize usable capacity and minimize aging, while multi-use operational scenarios improve overall system efficiency.

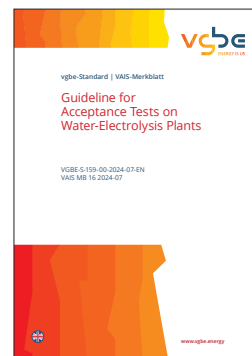
The findings provide a basis for improving existing BESS and planning future large-scale storage projects, supporting long-term reliability, performance, and grid integration of renewable energy sources.



vgbe-Standard VGBE-S-159-00-2024-07-EN

Guideline for Acceptance Tests on Water-Electrolysis Plants

VGBE-S-159-00-2024-07-EN / VAIS MB 16 2024-07. 42 p., 3 fig. (2025), DIN A4, e-book
ISBN 978-3-96284-381-6 (e-book, English)
Price for vgbe-members* 90,- €, non-members 135,- €, + packaging and shipping and VAT.
This vgbe-Standard is available in German and English.



To develop the full potential of water electrolysis, it is crucial that the systems work reliably and efficiently. This requires a standardised and binding basis for proof of guaranteed performance of water electrolysis plants as a milestone on the way to acceptance. We hope that these guidelines will help to further establish water electrolysis as an important element on the way to a CO₂ neutral future and contribute to a sustainable energy supply.

Water electrolysis is a key element on the road to a CO₂ neutral future. It will enable the production of hydrogen, which can be used as an energy source and raw material for industrial processes. In addition, water electrolysis can also help to store energy and stabilise the electricity grid.

To develop the full potential of water electrolysis, it is crucial that the systems work reliably and efficiently. This requires a standardised and binding basis for proof of guaranteed performance of water electrolysis plants as a milestone on the way to acceptance. These Acceptance Tests have long been established in energy technology and ensure that the guaranteed properties of a technical system can be verified. Experience from many projects shows that early and reliable agreements between the contractor and client ensure that the Acceptance Tests run efficiently and thus ensure the success of the project.

This document is the result of joint efforts by the VAIS and vgbe energy associations and the companies involved in the construction and operation of such plants.

Acceptance Tests on technical systems are a complex task that requires careful planning and implementation. These guidelines are intended to help make the Acceptance Tests as efficient and trouble-free as possible. They provide a standardised basis for the definition and determination of acceptance figures and agreed properties to ensure comparability between different systems. The aim is to develop a practical and easy-to-understand standard for Acceptance Tests of water electrolysis plants. Experience and findings from current and future projects will be incorporated into the further development of these Guidelines.

We hope that these guidelines will help to further establish water electrolysis as an important element on the way to a CO₂ neutral future and contribute to a sustainable energy supply. We would like to thank all those involved for their cooperation and commitment in the development of these guidelines.

* Für Ordentliche Mitglieder des vgbe energy e.V. ist der Bezug von ebooks im Mitgliedsbeitrag enthalten. ① pulse.vgbe.energy
Access for ebooks (PDF files) is included in the membership fees for Ordinary Members (operators, plant owners) of vgbe energy e.V.