

EINSATZ VON MULTILEVEL BATTERIESYSTEMARCHITEKTUREN IN ELEKTRISCH ANGETRIEBENEN FLUGZEUGEN

Stephan Diecke*, Nina Sorokina†, Wolfgang Blimetsrieder†, Purav Panchal‡, Dr. Manuel Kuder§

* Ingenieurbüro Stephan Diecke, Carl-von-Linde-Straße 30a, 85716 Unterschleißheim, Deutschland

† Universität der Bundeswehr in München, Institut für elektrische Energieerzeugung und Verteilung, Werner-Heisenberg-Weg 39, 85579 Neubiberg, Deutschland

‡ Universität der Bundeswehr in München, Institut für Aeronautical Engineering, Werner-Heisenberg-Weg 39, 85579 Neubiberg, Deutschland

§ Bavertis GmbH, Marienwerderstraße 6, 81929 München, Deutschland

Zusammenfassung

Im Rahmen des Projekts ELAPSED werden neuartige Komponenten für elektrisch angetriebene Luftfahrzeuge erforscht. Hierfür wurde ein Batteriesystem entwickelt und erforscht, welches in der Lage ist, die Ausgangsspannung mit der Auflösung einer individuellen Zellspannung beliebig anzupassen. Maßgeblich ist hierbei die Effizienz des Motorcontrollers im Teillastbetrieb durch gezieltes absenken der Eingangsspannung zu erhöhen. Des Weiteren kann auf ein dediziertes Ladegerät verzichtet werden, da sich die Batteriespannung auf eine externe Wechsel- oder Gleichstromquelle aufsynchonisieren und davon Ladeleistung abziehen kann. Im übrigen liegt der Fokus auf maximaler Ausfallsicherheit und daraus folgend der Erforschung von Methoden um im Fehlerfall einzelne Zellen der Batterie abschalten und überbrücken zu können. Die nachfolgende Publikation fasst die Ergebnisse der Untersuchungen für Antriebsstränge in der Größenordnung 400V Nennbetriebsspannung und 80kW elektrische Antriebsleistung sowie die zugrundeliegende Systemarchitektur zusammen und stellt diese im Detail vor.

Keywords

Multilevel-Batteriespeicher; Hochzuverlässiger Batteriespeicher; Variable Batterieausgangsspannung; Ladegerät unabhängig

NOMENKLATUR

Abkürzungen

BCC	Battery Cell Controller
BCM	Battery Cell Module
BMC	Battery Main Controller
BMS	Battery Managment System
HV	High Voltage
HVLV	High Voltage Low Voltage
LV	Low Voltage

1. EINFÜHRUNG

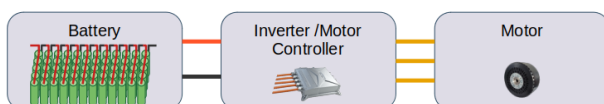


BILD 1. Komponenten des Antriebsstrangs eines Elektroflugzeugs bestehend aus Batteriespeicher, Motorcontroller mit Leistungsstufe und Motor

Gegenwärtig besteht der Antriebsstrang für einen Propeller eines rein elektrisch angetriebenen Flugzeugs, wie in Abbildung 1 dargestellt, im wesentlichen aus drei Komponenten. Mindestens einer Energiequelle welche häufig

in Form eines Batteriespeichers implementiert ist, mindestens einem Motorsteuergerät welches mit Hilfe einer darin integrierten Leistungsstufe aus der Gleichspannung der Batterie eine Wechselspannung erzeugt und damit die dritte Komponente einen Elektromotor ansteuert [1]. Der Ausfall einer dieser Komponenten hat den Ausfall des gesamten Antriebsstrangs zur Folge. Des weiteren muss der Antriebsstrang auf die beim Start erforderliche Maximalleistung ausgelegt sein. Dies kann im Motorcontroller während des im Reiseflug üblichen Teillastbetriebs zu einer Verringerung des Wirkungsgrads gegenüber Volllast führen [2]. Darüber hinaus ist für das Laden des Batteriespeichers ein in der Regel aus Gewichts- und Platzgründen stationär befindliches Ladegerät erforderlich welches die Eingangsspannung und Frequenz einer externen Energiequelle, zum Beispiel des öffentlichen Stromnetzes, gleichrichtet und das Spannungsniveau an das des Batteriespeichers anpasst. Eine einfache Erhöhung der Ausfallsicherheit einzelner Komponenten kann in dieser Konfiguration nur durch aufteilen des Antriebsstrangs in mehrere Stränge erzielt werden. Dies ist jedoch auf Grund des in der Regel dadurch höheren Gesamtgewichts, größeren Bauraumbedarfs und der höheren Komplexität nicht wünschenswert.

Wenn man sich den Antriebsstrang jedoch genauer betrachtet fällt auf, dass der Motor im Vergleich zu Motorcontroller mit Leistungsstufe und Batteriespeicher, auf Grund seines einfachen mechanischen Aufbaus sowie elektrisch rein passiven Komponenten in Form von Spulen eine deutlich geringere Ausfallwahrscheinlichkeit aufweist. Ein typischer Motor für Elektroflugzeugantriebe wie zum Beispiel ein EM-RAX 268 MV [3] besteht aus einem außen laufendem Rotor

mit Permanentmagneten, zwei Kugellagern und einem Stator, welcher die Wicklungen beherbergt. Der Propeller wird im Direktantrieb ohne Getriebe angebracht. Solange der Motor innerhalb seiner maximalen Betriebsparameter betrieben wird, insbesondere die spezifizierten Bereiche für Strom, Spannung und Temperatur nicht verlassen werden, kann davon ausgegangen werden, dass seine elektrische Ausfallwahrscheinlichkeit im Bereich von Spulen in beweglichen Objekten liegen muss. In jedem Fall aber deutlich geringer ist, als bei Motorcontroller und Batteriespeicher mit ihren vielen aktiven elektronischen Bauteilen [4]. Es bietet sich daher an, eben diese Komponenten genauer zu analysieren.

Insbesondere unter Beachtung von Multilevel Batteriespeicherarchitekturen könnten sich neue Ansätze ergeben, die nicht nur zu einer deutlichen Verbesserung der Ausfallsicherheit des Antriebsstrangs beitragen können, sondern gegebenenfalls auch andere Aspekte verbessern können. Hierzu werden zunächst der Aufbau als auch Schlüsseigenschaften eines konventionellen Batteriespeichers vorgestellt.

Ein solcher Batteriespeicher wie in Bild 3 dargestellt, besteht aus einzelnen Batteriezellen, welche elektrisch in Parallelschaltung verbunden werden und dadurch eine virtuelle Zelle bilden. Hierdurch erhöht sich die Kapazität dieser Zelle und der Lade- und Entladestrom pro Zelle verringert sich. Umgekehrt vervielfacht sich der zulässige Entladestrom mit der Anzahl der Zellen in Parallelschaltung. Um nun die gewünschte Gesamtspannung für den Batteriespeicher zu erzielen, werden entsprechend viele solcher virtuellen Zellen in Reihenschaltung verbunden. Häufig werden diese Batteriezellverbünde auf mehrere Zellmodule verteilt. Zum Beispiel um das Gewicht, die Größe oder auch die Ausgangsspannung klein zu halten und um die damit verbundenen Arbeitssicherheitsvorschriften für die Arbeit an einem einzelnen Modul einfach zu halten. Häufig spielt aber auch der Bauraum im Flugzeug und damit verbunden die Modulgröße und wie sie in den entsprechenden Bauraum transportiert werden können eine Rolle.



BILD 2. Vorderer Rumpf eines Elektroflugzeugs mit von Links: Zellmodulen, flüssiggekühltem Motorcontroller mit Leistungsstufe und flüssiggekühltem Motor

Bild 2 zeigt den Bauraum für Zellmodule in einem exemplarischen Elektroflugzeug. Abschließend werden für jede virtuelle Zelle Spannungssensoren und für jedes Zellmodul mehrere Temperatursensoren eingebaut. Diese werden häufig über ein Datensammelmodul im Zellmodul ausgewertet und über eine Datenverbindung mit dem BMS des Batteriespeichers verbunden. Das BMS wertet dann den Status der einzelnen virtuellen Zellen aus, stellt sicher,

das alle Spannungspegel im erlaubten Bereich liegen und idealerweise möglichst identisch sind. Zusätzlich können noch Sensoren für die Gesamtspannung des Batteriespeichers und des Batteriestroms installiert sein. In dem im Bild 3 dargestellten Batteriespeicher übernimmt das BMS zusätzlich auch die Steuerung der Leistungsschalter für Vorladen des HV Stromkreises, sowie schließen der HV-Bus-Leistungsschalter um den Batteriespeicher mit dem Antriebsstrang elektrisch zu verbinden. Ein solcher Batteriespeicher gibt immer die dem jeweiligen Ladezustand entsprechende Gesamtspannung aller virtuellen Zellen aus.

1.1. Eigenschaften konventioneller Batteriespeicher

1.1.1. Komplexität

Der Batterieaufbau ist elektrisch betrachtet sehr einfach. Es befinden sich mit Ausnahme der Überwachungskomponenten (Spannungs-, Strom- und Temperatursensoren sowie dem Batterieüberwachungssteuergerät) keine aktiven Komponenten innerhalb des Batteriespeichers.

1.1.2. Forschungsstand

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt gilt ein solcher Aufbau als der Standard in der Elektromobilität [1] und ist dementsprechend tiefgehend erforscht und dokumentiert. Verfahren zur Entwicklung und dem Aufbau einer solchen Architektur sind ebenfalls weitestgehend erschlossen und stellen daher in der Regel ein gut abschätzbares Risiko für den Erfolg eines Entwicklungsprojektes dar.

1.1.3. Ausfallsicherheit

Alle Zellen sind fest in elektrisch verbundene virtuelle Zellen verbaut. Durch die Reihenschaltung dieser Zellen führt der Ausfall einer einzelnen virtuellen Batteriezelle mit einer sehr hohen Wahrscheinlichkeit zu einem Ausfall des gesamten Batteriespeichers. Beim Ausfall einer einzelnen Zelle im Parallelverbund einer virtuellen Zelle hängt es von der Art der Verbindung und vom Ausfallszenario ab, ob es zu einem Ausfall des gesamten Batteriespeichers kommt. Insbesondere Ausfallszenarios, die zu starker Erwärmung der Zelle führen, können hier noch zusätzlich Probleme und Gefahren verursachen [5].

1.1.4. Zellüberwachung

Einzelne Zellen im Batteriespeicher können nur im Verbund überwacht werden. Eigenschaften insbesondere in Bezug auf den Zustand der internen Struktur einer einzelnen Zelle können nur bedingt abgeleitet, jedoch nicht direkt gemessen werden.

1.1.5. Lebenserwartung

Die Lebensdauer lässt sich nur bedingt beeinflussen, da man eine nutzungsbedingte Alterung nur verlangsamen, aber nicht gänzlich aufhalten kann. Zum Beispiel durch sehr schonende Lade- und Entladevorgänge.

1.1.6. Gesamtkapazität des Batteriespeichers

Die virtuelle Zelle mit der geringsten Kapazität bestimmt die Gesamtkapazität des Batteriespeichers, da sie als erstes während des Entladens die Entladeschlussspannung erreichen wird.

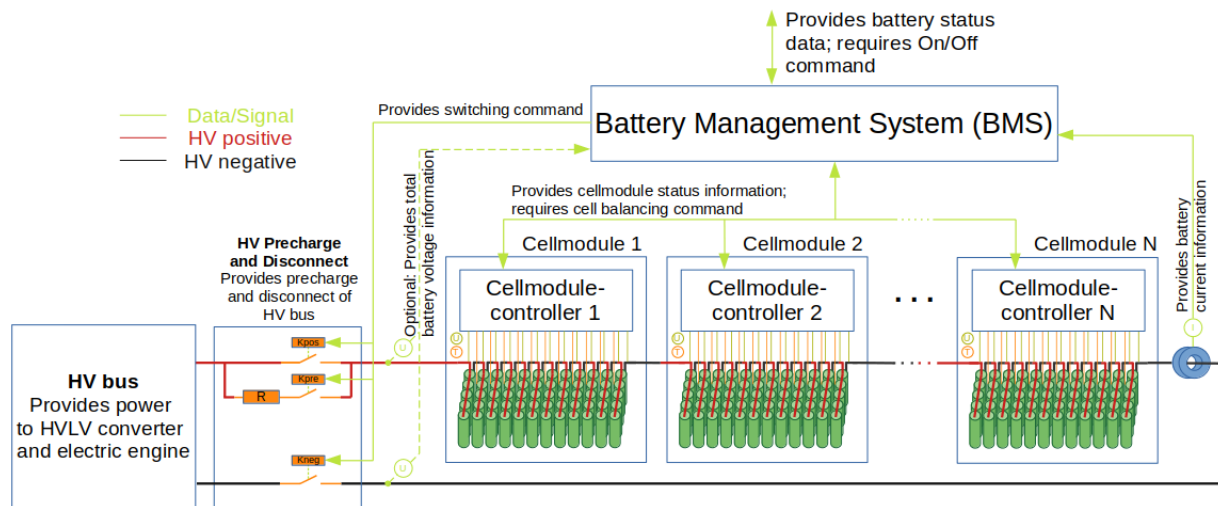


BILD 3. Schematischer Aufbau eines konventionellen Batteriespeichers mit BMS, Zellmodulen, Lasttrennschaltern, Vorladeschaltung, Kommunikations- und Sensorleitungen sowie Strom- und Spannungssensor

1.1.7. Ladegerät

Zum Laden wird ein dediziertes Ladegerät benötigt, welches in Bezug auf Spannung und Frequenz auf die externe Energieversorgung abgestimmt sein muss.

1.1.8. Kapazitäten im Stromkreis

Der Motorcontroller - insbesondere die Leistungsstufe - benötigt leistungsstarke Eingangskapazitäten um im Stromkreis zwischen Motor und Motorcontroller auftretende Stromspitzen zu glätten. Diese werden häufig in Form von Elektrolytkondensatoren implementiert, welche bauartbedingt keine hohe Lebenserwartung und Ausfallsicherheit aufweisen [4]. Des Weiteren sind sie im Vergleich zu anderen Elektronikbauteilen sehr Platz konsumierend.

1.1.9. Leistungsstufe

Eine Leistungsstufe ist notwendig um aus der Gleichspannung der Batterie die Wechselspannung für das Drehfeld des Motors zu erzeugen. Hierzu wird - geregelt durch den Motorcontroller - die Batteriespannung derartig an- und umgeschaltet, dass sich mit Hilfe der Spulen im Motor eine transformierte Wechselspannung einstellt, welche die Drehzahl und Leistung des Motors bestimmt.

1.1.10. Leistungsschalter

Die Leistungsschalter einer Leistungsstufe sind hierbei dauerhaft der gesamten Batteriespannung ausgesetzt. Insbesondere bezogen auf die notwendige Isolationsspannung dieser Bauteile bei maximaler Flughöhe, kann dies die Bauteilwahl erschweren. Üblicherweise sind solche Leistungsschalter für hohe Spannungen schwer und groß.

1.1.11. Abwärme

Des Weiteren benötigen derartige Leistungsschalter auf Grund der großen Leistung welche sie auf kleinem Raum schalten eine geeignete Kühlung, welche ebenfalls Platz beansprucht und dem Gesamtsystem Gewicht und Komplexität hinzufügt.

1.1.12. Trennung des Stromkreises

Um den Leistungsstromkreis der Batterie zu trennen sind schwere und große Leistungstrennschalter notwendig. Zu-

sätzlich sind Schmelzsicherungen oder Sicherungsautomaten notwendig um Kurzschlüsse im Stromkreis sicher trennen zu können.

1.1.13. Vorladeschaltung

Bevor der Leistungsstromkreis geschlossen werden kann muss in der Regel durch eine sogenannte Vorladeschaltung die Spannung im Stromkreis außerhalb der Batterie strombegrenzt auf das Spannungsniveau des Batteriespeichers gebracht werden. Andernfalls könnten insbesondere die im Stromkreis verbundenen Kondensatoren durch den hohen Einschaltstrom beschädigt oder sogar zerstört werden [6].

2. MULTILEVEL BATTERIESPEICHER

Häufig unter der Bezeichnung Multilevel Batteriespeicher oder Multilevel Inverter zu finden, unterliegt die Batteriearchitektur einem Aufbau welcher es erlaubt jede einzelne virtuelle Zelle in den Serienverbund der Batterie einzukoppeln oder zu überbrücken. Dadurch ergibt sich die Fähigkeit die Ausgangsspannung beliebig mit der Auflösung einer einzelnen Zellspannung von 0V bis zur Maximalspannung¹ der Batterie zu konfigurieren [7–10]. Bild 4 stellt einen sinusförmigen Spannungsverlauf für einen einphasigen Batteriespeicher dar.

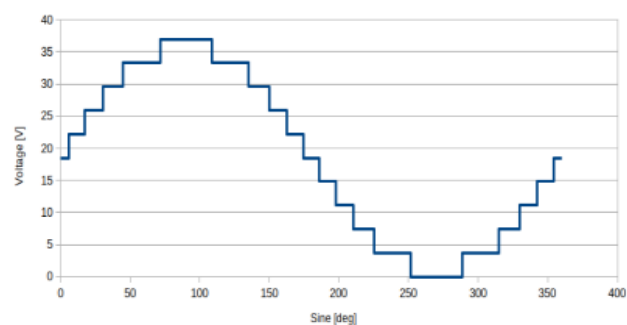


BILD 4. Darstellung eines sinusförmigen Spannungsverlaufs eines Multilevel Batteriespeichers für eine Phase mit zehn seriellen Zellen

¹basierend auf dem Ladezustand der Zellen und der maximal in Serie schaltbaren Zellenanzahl

Generell kann man diese Batteriespeicherarchitektur in zwei Kategorien, basierend auf ihrer Betriebsart, einteilen:

- A Architektur bei welcher eine variable Ausgangsgleichspannung eingestellt werden kann, jedoch weiterhin konventionelle Komponenten wie ein Motorcontroller mit Leistungsstufe zum Einsatz kommt um den Motor anzutreiben.
- B Architektur welche es erlaubt durch schnelles Schalten der Zellen in oder aus dem Verbund eine Wechselspannung zu erzeugen.

In letzterem Fall kann durch kombinieren von drei oder mehr solcher Batteriespeicher ein mehrphasiger Drehstrom erzeugt werden. Dieser wiederum kann direkt einen entsprechenden Motor antreiben, wodurch eine dedizierte Leistungsstufe überflüssig wird.

Bild 5 zeigt den Spannungsverlauf für drei Phasen in einem Multilevel Batteriespeicher welcher aus drei Strängen besteht und Drehstrom ausgibt.

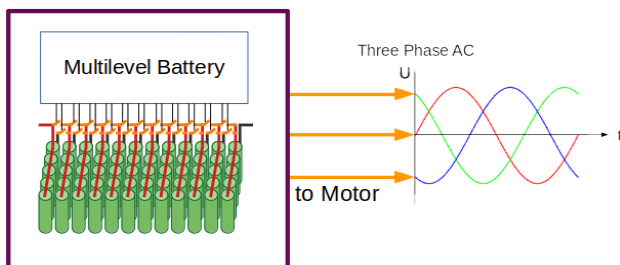


BILD 5. Darstellung eines sinusförmigen Spannungsverlaufs eines Multilevel Batteriespeichers für drei Phasen mit 100 seriellen Zellen

2.1. Eigenschaften Multilevel Batteriespeicher

2.1.1. Batterieaufbau

Zellen welche als fehlerhaft detektiert werden können dauerhaft aus dem Serienvverbund gesperrt werden. In einem solchen Fall würde sich beispielsweise die maximal konfigurierbare Batteriespannung um den Wert einer Zellspannung reduzieren. Bei einem typischen Antriebsbatteriespeicher mit zum Beispiel 100 virtuellen Zellen in Serie, würde das lediglich zu einem Verlust von einem Prozent der maximalen Gesamtspannung führen.

2.1.2. Gesamtkapazität des Batteriespeichers

Zellen mit geringerer Kapazität können gezielt weniger stark belastet werden, wodurch die Gesamtkapazität nicht durch die schlechteste virtuelle Zelle bestimmt wird.

2.1.3. Zellüberwachung

Jede einzelne virtuelle Zelle kann nicht nur auf Strom, Spannung und Temperatur überwacht werden, sondern zusätzlich auch, ähnlich wie auf einem Zellprüfstand, in Betrieb vermessen werden. Im Gegensatz zu einer Prüfstandmessung kann dies jedoch kontinuierlich während des Betriebs erfolgen.

2.1.4. Lebenserwartung

Erkenntnisse der Forschung zeigen, das sich durch ein gezieltes betreiben der Zelle in einem pulsartigen Betrieb - sowohl beim Laden als auch Entladen - eine Rückbildung

interner schädlicher Strukturen in der Zelle erzielen lässt [11–15]. Dies führt sowohl zu einer Erhöhung der Ausfallsicherheit als auch der Lebensdauer der Zelle. Wenn auch für Luftfahrzeuge nur bedingt von Interesse, könnten durch diesen Effekt auch Zellen mit geringerer Qualität eingesetzt werden, welche dadurch die Batteriespeicherkosten unter Umständen drastisch senken könnten. Des Weiteren ergeben sich interessante Möglichkeiten im Bereich der Verwertung gebrauchter Batteriespeicher in second and third life [16] Konzepten².

2.1.5. Ladegerät

Durch die Möglichkeit eine Wechselspannung erzeugen zu können, kann mit Hilfe eines einfachen Verbindungskabels eine Verbindung zu einer externen Energiequelle hergestellt werden. Das Batteriesteuergerät kann die Frequenz der beiden Wechselspannungen synchronisieren und dadurch gezielt Leistung zum Laden der Batterie von der externen Energiequelle abführen. Ein dediziertes Ladegerät entfällt hierbei³.

2.1.6. Leistungsschalter

Durch die Anordnung der Leistungsschalter für jede virtueller Batteriezelle im Serienvverbund muss nicht mehr die gesamte Batteriespannung geschaltet werden, sondern lediglich die Spannung einer Zelle. Hierdurch können elektronische Bauteile mit kleinen Spannungsobergrenzen und niedrigerer Isolationsspannung eingesetzt werden.

2.1.7. Leistungsstufe

Im Fall einer Integration des Motorcontrollers in das Batteriesteuergerät entfällt eine Leistungsstufe da die Wechselspannung für den Motor direkt vom Batteriespeicher kommt.

2.1.8. Kapazitäten im Stromkreis

Kapazitäten zum Glätten der Stromspitzen an der Leistungsstufe entfallen ebenfalls. Dadurch kann eine Erhöhung der Lebensdauer und Verringerung der Ausfallwahrscheinlichkeit erreicht werden.

2.2. Abwärme

Da alle Leistungsschalter nur kleine Spannungen schalten müssen sind Leistungsschalter mit Bruchteilen des Innenwiderstands von Leistungsschaltern für Spannungen einer gesamten Batterie erhältlich. Das bedeutet zwar nicht zwingend, dass die Wärmeverluste in den Leistungsschaltern in Summe sehr unterschiedlich ausfallen, aber die Fläche über welche die Wärme abgeführt werden muss vergrößert sich signifikant. Schwere Kühlkörper oder Flüssigkühler können dadurch gegebenenfalls entfallen.

2.2.1. Trennung des Stromkreises

Ein klassischer Leistungstrennschalter im Leistungsstromkreis des Batteriespeichers entfällt, da die Batterieausgangsspannung komplett abgeschaltet werden kann. Darüber hinaus kann der Stromkreis kurzgeschlossen wer-

² Als second and third life Konzepte werden Einsatzszenarios bezeichnet in welchen Batteriespeicher, welche für bestimmte Anwendungen qualitativ oder kapazitiv nicht mehr hochwertig genug sind, zur Anwendung kommen und dadurch dem Batteriespeicher ein "zweites und drittes Leben" ermöglichen, bevor er endgültig entsorgt oder idealerweise wiederaufbereitet werden muss.

³ Falls die Batteriearchitektur keine Umpolschaltung zur Konfiguration negativer Batteriespannungen aufweist, wird im Verbindungskabel zur externen Energiequelle ein Gleichrichter benötigt.

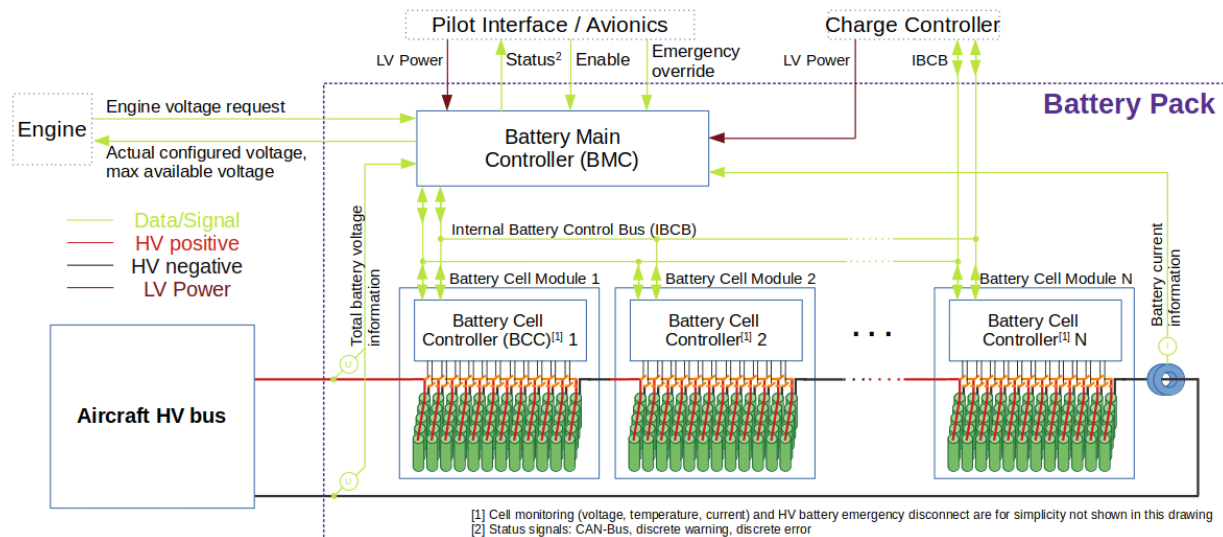


BILD 6. Systemübersicht eines Batteriespeichers mit adaptiv anpassbarer Ausgangsspannung

den was zu einer zusätzlichen Sicherheit des Stromkreises für Wartungs- und gegebenenfalls Rettungspersonal führt.

2.2.2. Vorladeschaltung

Eine Vorladeschaltung des Stromkreises außerhalb des Batteriespeichers entfällt, da die Spannung schrittweise mit der Auflösung einer Zellspannung hochgefahren werden kann.

2.2.3. Komplexität

Jede virtuelle Zelle benötigt jeweils elektronische Leistungsschalter und eine zugehörige Treiberschaltung für die Konfiguration in den Serienverbund des Batteriestrangs, als auch zum Überbrücken selbiger. Des Weiteren muss diese Schaltung gegenüber der Spannungspotentiale anderer Zellen galvanisch isoliert sein.

Das Batteriesteuergerät muss neben den Überwachungsfunktionen auch Steuerungs- und Regelungsfunktionen übernehmen, was zu einer deutlich erhöhten Komplexität dieser Komponente führt.

Für einen mehrphasigen Motor muss der Batteriespeicher in die Anzahl der benötigten Motorphasen aufgeteilt werden.

2.2.4. Spannungsbereich

Um den Spannungsbereich für einen Motor verdoppeln zu können ist eine Umpolschaltung notwendig da andernfalls nur positive Spannungen konfigurierbar sind. Dies würde jedoch zu einem einzelnen Ausfallpunkt an der Umpolschaltung führen, was die Vorteile der Ausfallsicherheit des Systems kompromittieren würde. Dies kann durch spezielle Architekturen wie zum Beispiel Cross-Switched-Architekturen [17] oder verdoppeln der Stranganzahl für jede Phase kompensiert werden, führt aber zu einer weiteren Erhöhung der Komplexität des Systems.

2.2.5. Trennung des Stromkreises

Für den Fall das Leistungsschalter im geschlossenen Zustand versagen, muss eine alternative Trennmethode - zum Beispiel durch Pyrofuses - im Stromkreises vorgesehen werden.

Für die Absicherung gegen Überstrom und Kurzschluss können zur Erhöhung der Ausfallsicherheit anstelle einer

konventionellen Schmelzsicherung oder eines Sicherungsautomaten die Erkenntnisse aus [18] angewandt werden.

3. LUFTFAHRTKONFORMER MULTILEVEL BATTERIESPEICHER

Im Rahmen des Projekts ELAPSED [19] der Universität der Bundeswehr in München, wurde ein Multilevel Batteriespeicher entwickelt und erforscht, welcher einerseits die Anforderungen gängiger Luftfahrtstandards wie zum Beispiel DO-311A [20], DO-160G [21], DO-254 [22] und DO-178C [23] erfüllt und andererseits die vorgenannten negativen Aspekte eines konventionellen Antriebsstrangs behebt oder zumindest deutlich verbessert. Die Systemarchitektur dieses Batteriespeichers ist in Abbildung 6 dargestellt.

Es handelt sich um eine Multilevel Architektur, welche im Flugbetrieb eine anpassbare Gleichspannung ausgibt für den Ladebetrieb jedoch direkt an eine Wechselspannungsquelle angeschlossen werden kann. Im Flugbetrieb kann der Motorcontroller - im Bild als "Engine" bezeichnet - eine Absenkung der Eingangsspannung anfordern.

4. AUSFALLSICHERHEIT

Um dieses System besonders ausfallsicher zu machen wurden zunächst, mit Hilfe von gängigen Methoden zur Analyse der Funktionssicherheit und Ausfallwahrscheinlichkeit [24] [25], die Anforderungen an das System ermittelt und mit gängigen Normen und Standards der Luftfahrt abgeglichen. Die sich daraus ergebenden Anforderungen für Hardware und Software wurden in ein Anforderungsverwaltungsprogramm eingepflegt und der nachfolgend ausführlich beschriebenen Implementierung zu Grunde gelegt.

Des weiteren wurden in einer separaten Studie Designkriterien untersucht, welche es erlauben auf Sicherungen und Sicherungsautomaten zu verzichten. Wie in dieser Studie [18] gezeigt, würde eine solche Über- und Kurzschlusschutzeinrichtung nur sehr bedingt in der Lage sein einen Schaden am System im Fehlerfall zu verhindern. Des Weiteren würden solche Komponenten einen einzelnen Ausfallpunkt im System bedeuten, welcher die Systemausfallwahrscheinlichkeit erhöhen würde.

Stattdessen wurden die Leistungsschalter für die einzel-

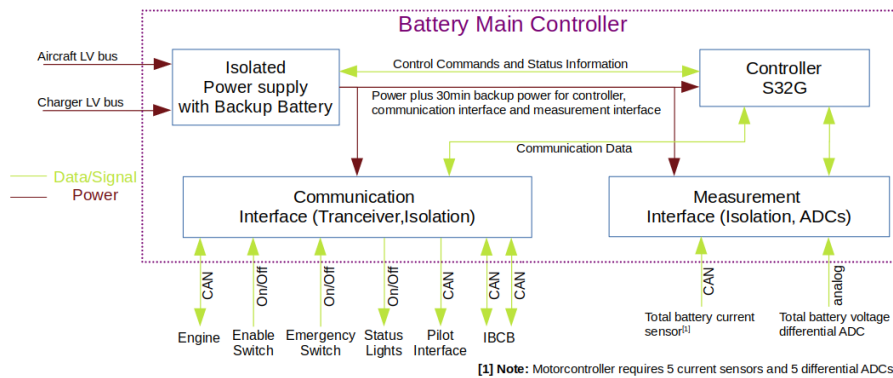


BILD 7. Darstellung des schematischen Aufbaus des Battery Main Controllers des Multilevel Batteriespeichers

nen Serien- und Überbrückungsschalter so ausgelegt und verbaut, dass es im Fehlerfall eines Leistungsschalters zu dessen kontrollierter Zerstörung kommt ohne weitere Bauteile zu beschädigen oder die Gesamtfunktion wesentlich einzuschränken. Hierzu sind die Überbrückungsschalter so ausgelegt, dass sie im Fehlerfall eines Serienschalters den Stromfluss solange ohne Schaden zu nehmen tragen können bis der Serienschalter durch Plasmabildung im Schalter weggebrannt ist und im jeweiligen Serienschalter kein leitender Pfad mehr existiert.

Um im Falle eines Fehlers, welcher ein Ausschalten der Leistungsschalter verhindern würde, trotzdem eine sichere Trennung und damit einhergehende Abschaltung des Stromkreises zu ermöglichen, sind im System Pyrofuses vorgesehen. Diese können durch einen verplombten Schalter im Cockpit durch den Piloten manuell ausgelöst werden. Der Stromkreis wird dadurch an mehreren Stellen galvanisch getrennt.

5. AUFBAU

Der Batteriespeicher besteht aus Zellmodulen - im Bild als "Battery Cell Modules (BCM)" bezeichnet - mit jeweils 12 in Serie schaltbaren virtuellen Zellen. Je nach Anforderung können mehrere Zellmodule elektrisch verbunden werden um eine höhere maximale Batterieausgangsspannung konfigurieren zu können. Jedes Zellmodul besitzt einen dediziertes Zellmodulsteuergerät - im Bild als "Battery Cell Controller (BCC)" bezeichnet - welches das ausgleichen der Zellspannungen regelt und die Zellmodul Ausgangsspannung einstellt.

Alle BCCs und der Ladekommunikationsanschluss - im Bild als "Charger" bezeichnet - sind durch einen im Bild als "Inter Battery Control Bus (IBCB)" bezeichneten redundanten Datenbus mit einem Batteriehauptsteuergerät - im Bild als "Battery Main Controller (BMC)" bezeichnet - verbunden. Der IBCB besteht aus zwei CAN-Bussen welche in Vollduplex-Konfiguration betrieben werden. Im Normalbetrieb werden auf einem Bus Nachrichten vom BMC zum BCC und auf dem anderen die Nachrichten der BCCs an den BMC übertragen. Im Fehlerfall eines Busses wird auf den verbleibenden Bus für beide Kommunikationsrichtungen in Halbduplex-Konfiguration umgeschaltet.

Das BMC bildet die Schnittstelle zum Piloten, der Avionik und dem Motorcontroller. Es überwacht einerseits die Betriebsparameter der BCCs sowie Eingabesignale des Piloten und steuert andererseits die vom Motorcontroller angeforderte Batterieausgangsspannung indem die hierfür notwendigen Befehle an die BCCs geschickt werden.

Für die Kommunikation des BMC mit dem Motorcontroller

- im Bild als "Engine" bezeichnet - als auch für die Ausgabe von Systemprotokollierungsdaten und für den Piloten relevante Systeminformationen wird jeweils ein einfacher CAN-Bus in Halbduplex-Konfiguration eingesetzt.

Um die Funktion der Spannungs- und Stromsensoren der BCCs überwachen zu können, sind zusätzliche Sensoren für die Gesamtspannung und den Strom des Batteriespeichers mit dem BMC verbunden.

Der BMC stellt insgesamt fünf Stromsensoren zur Verfügung, um damit einen auf bis zu fünf Phasen aufgeteilten Batteriespeicher betreiben zu können. Hierdurch kann ein entsprechender Motor direkt ohne Motorcontroller und Leistungsstufe durch den Batteriespeicher angetrieben werden. Diese Variante ist jedoch für einen späteren Teil des Projekts vorgesehen und wird hier nicht weiter vertieft.

5.1. Batteriehauptsteuergerät

Der Aufbau des Batteriehauptsteuergeräts ist in Bild 7 vereinfacht dargestellt und wurde im Rahmen einer weiteren Veröffentlichung ausführlich vorgestellt [26]. Es besteht aus einer hochverfügbaren Spannungsversorgung, einem Kommunikationsmodul, einem Modul für Messungen und einem leistungsstarken Mikrocontrollermodul.

5.2. Zellmodulsteuergerät

Der Aufbau eines Zellmodulsteuergeräts ist in Bild 8 dargestellt. Es besteht aus einem Controller, welcher über zwei CAN-Schnittstellen mit dem IBCB verbunden ist. Die Versorgungsspannung wird aus der ersten und letzten virtuellen Batteriezeile redundant entnommen. Zur Ansteuerung der Leistungsschalter für Serienschaltung und Überbrückung, sowie der Zellüberwachung ist für jede der zwölf Zellen ein "Cell Interface" implementiert, welches über Isolatoren und Treiberbausteine verfügt. Die interne Kommunikation wird für die Leistungsschalter über digitale High/Low Signale realisiert. Für die Spannungs- und Temperatursensoren ist ein SPI-Bus implementiert. Die Strommessung des BMCs erfolgt über einen Stromsensor, welcher über einen Analog-Eingang an den BCC angeschlossen ist.

6. FUNKTIONSBESCHREIBUNG

6.1. Batteriehauptsteuergerät

Bild 9 zeigt das Zustandsübergangsdiagramm für das Batteriehauptsteuergerät.

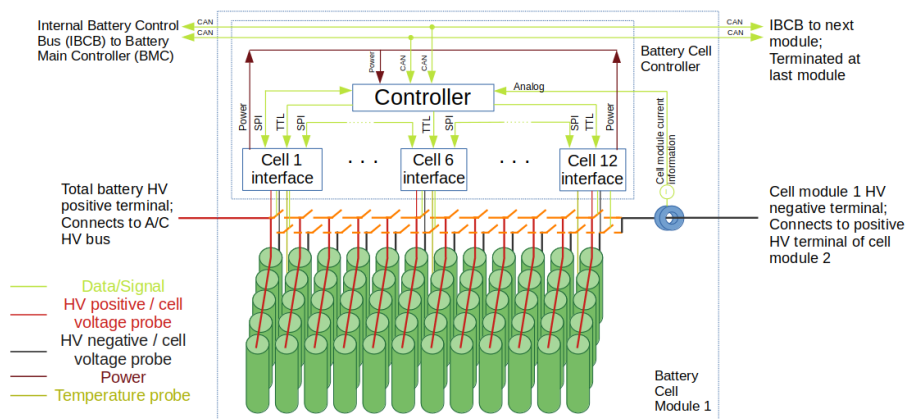


BILD 8. Darstellung des schematischen Aufbaus eines Battery Cell Modules des Multilevel Batteriespeichers

6.1.1. Steuersignale

Die generelle Funktion wird nach dem Aktivieren des Steuergeräts durch den Piloten mit Hilfe von zwei Steuerungssignalen in Form von zwei auf ordnungsgemäße Funktion überwachten Schaltern [26] im Cockpit kontrolliert. Ein Schalter steuert die Freigabe der Ausgangsspannung des Batteriespeichers. Dieses Signal ist in Bild 6 und 9 als "Enable" bezeichnet.

Ein zweiter Schalter steuert die Aktivierung des Notfall-Betriebsmodus. Dieses Signal ist in Bild 6 als "Emergency Override" und in Bild 9 als "Emergency" bezeichnet.

6.1.2. Aktivierung

Das Batteriehauptsteuergerät befindet sich vor dem Aktivieren in einem Schlafmodus mit besonders niedrigem Leistungsverbrauch, welcher durch Anlegen einer Spannungsversorgung durch den Flugzeug- (Aircraft LV Power) oder den Ladegerät-Niederspannungsbus (Charger LV Power) verlassen wird und das Steuergerät aufweckt⁴. Nach dem Aufwachen wird, um unbeabsichtigte Aktivierung des Batteriespeichers zu erschweren, gewartet bis beide Schalter im Cockpit auf Position "Aus" stehen. Währenddessen leuchtet eine ebenfalls auf ordnungsgemäße Funktion überwachte rote "Error" Warnlampe im Cockpit auf. Die rote "Error" Warnlampe leuchtet auch auf, wenn beide Schalter in Position "Aus" stehen um anzuzeigen das keine Kommunikation mit den Zellmodulsteuergeräten aufgebaut ist.

6.1.3. Lademodus

Liegt allein oder zusätzlich eine Spannung am Ladegerät-Niederspannungsbus an, wird in den "Charge Wakeup / Selftest" Zustand gewechselt. Nun werden Steuerkommandos zum Aufwecken der Zellmodulsteuergeräte über den Kommunikationsbus gesendet und ein Selbsttest des Systems durchgeführt. Sobald alle Zellmodulsteuergeräte aktiv und einsatzbereit sind erlischt die rote "Error"-Warnlampe im Cockpit und zeigt an, dass sich das System bereit hält um eine Ladespannung zu detektieren und mit dem Ladevorgang zu beginnen. Bis zum Abschalten der Niederspannungsbusse bleibt das Batteriehauptsteuergerät in diesem Modus. Ein Wechsel einer oder beider

Schalter im Cockpit in die Position "An" sowie unabhängig davon auftretende Fehler, veranlassen das unverzügliche Anhalten des Ladevorgangs und einen Wechsel in den Zustand "Charge Error / Pause Error". Die rote "Error"- oder die gelbe "Warning"Warnlampe leuchtet je nach Auslösegrund und Fehlerbild auf. Verschwinden alle Signale die einen Wechsel in diesen Zustand auslösen, wechselt das System selbstständig zurück in den Ladevorgang und die rote "Error"-Warnlampe erlischt.

6.1.4. Entlademodus

Liegt keine Spannung am Ladegerät-Niederspannungsbus an wird gewartet bis sich der Schalter für das Freigabe-Signal in der "An"-Position befindet und darauf hin in den Entlademodus "Discharge Wakeup / Selftest" Zustand gewechselt. In diesem werden ebenfalls zunächst Steuerkommandos zum Aufwecken der Zellmodulsteuergeräte über den Kommunikationsbus gesendet und ein Selbsttest durchgeführt. Ist dieser erfolgreich erlischt die rote "Error"-Warnlampe und die gelbe "Warning"-Warnlampe leuchtet auf. Das System fährt nun schrittweise die Ausgangsspannung hoch auf die maximal Spannung. Ist auch dieser Test erfolgreich abgeschlossen, erlischt auch die gelbe "Warning"-Warnlampe und es wird in den "Discharge Run / Normal Discharge" Zustand gewechselt.

Da der Motorcontroller nun mit Spannung versorgt wird wartet das Batteriehauptsteuergerät nun auf Lebenszeichen des Motorcontrollers. Werden innerhalb einer definierten Zeit keine Daten empfangen, leuchtet die rote "Error"-Warnlampe auf und der Zustand wechselt in den "In-Flight Limp / Failure Discharge" Zustand. Werden wieder Daten empfangen, erlischt die rote "Error"-Warnlampe und die gelbe "Warning"-Warnlampe leuchtet auf. Der Zustand wechselt zurück in "Discharge Run / Normal Discharge". Handelte es sich um einen manuellen Reset des Motorcontrollers kann ein "Reset"-Statuskommando vom Motorcontroller dem Batteriehauptsteuergerät mitteilen, dass kein Kommunikationsfehler vorliegt und die gelbe "Warning"-Warnlampe erlischt ebenfalls. Ähnlich verhält sich das System wenn der Limp-Zustand durch einen Zellfehler wie zum Beispiel Zell-Über- oder Unterspannung oder Zell-Über- oder Untertemperatur ausgelöst wurde. Je nach Schwere des Fehlers wird im Limp-Zustand verblieben oder nach Verschwinden des Fehlers wieder in den "Normal Discharge"-Zustand zurückgekehrt. Die Warnlampen verhalten sich hierbei dementsprechend.

Im Falle einer Notsituation kann der Pilot einen Wechsel in den "Discharge Emergency"-Zustand veranlassen. In

⁴Zukünftig ist hier auf ein zeitgebundenes regelmäßiges Aufwecken zur Systemprotokollierung vorgesehen. Diese Daten werden daraufhin über ein gesichertes Verfahren an einen Webserver übertragen, welcher einen gesicherten Zugang bereitstellt um Piloten über eine App oder als Flugzeugmusterbetreiber zur Wartung Zugriff auf diese Daten zu ermöglichen.

diesem werden bestimmte Sicherheitslimitierungen zum Schutz des Systems wie zum Beispiel Zellunterspannung außer Kraft gesetzt, um dem Pilot zum Beispiel noch einen kleinen Rest Energie, unter dem Risiko Zellen zu beschädigen, aus den Zellen zur Verfügung zu stellen. Wird dieser Modus aktiviert und es kam zu einer Grenzwertüber- oder unterschreitung kann die aufleuchtende rote "Error"-Warnlampe nur noch nach vollzogener Wartung und Überprüfung des gesamten Systems deaktiviert werden. Sowohl im Limp-Zustand als auch im Emergency-Zustand versuchen alle Zellmodulsteuergeräte die maximale Batterieausgangsspannung zu konfigurieren. Spannungsverringerkommandos vom Motorcontroller werden in diesen Zuständen nicht verarbeitet.

6.1.5. Ausschalten

Zum Abschalten des Systems werden alle Schalter in die "Aus"-Stellung gebracht und sobald der Flugzeug- beziehungsweise der Ladegerät-Niederspannungsbuss ebenfalls abgeschaltet wird, fährt das Batteriehauptsteuergerät alle Zellmodulsteuergeräte gezielt herunter und befiehlt diesen in den Schlafmodus zu wechseln. Sobald alle Zellmodulsteuergeräte in den Schlafmodus gewechselt, haben wechselt das Batteriehauptsteuergerät ebenfalls in den Schlafmodus.

6.2. Zellmodulsteuergerät

6.2.1. Steuersignale

Die Zellmodulsteuergeräte werden durch zwei externe Signale gesteuert. Das "Timer Enable" Signal wird regelmäßig nach einer voreingestellten Zeit erzeugt und veranlasst das Steuergerät aufzuwecken, alle Systemdaten zu kontrollieren, zu protokollieren und wieder in den Schlafzustand zu wechseln. Das "CAN IRQ"-Signal wird erzeugt wenn eine CAN-Bus Nachricht empfangen wurde und veranlasst ebenfalls das Steuergerät aufzuwecken und einen Selbsttest durchzuführen.

Intern steht ein Signal zur Verfügung um einen gegebenenfalls durch den Piloten angeforderten "Emergency"-Zustand nach Empfang der zugehörigen Kommandonachricht auf dem CAN-Bus zu aktivieren. Des weiteren steht ein internes Signal zur Verfügung welches im Notfall, wenn beide CAN-Busse gestört, sind alle Zellmodulsteuergeräte dazu zu veranlassen in den "Loss of Communication"-Zustand zu wechseln. Das Batteriehauptsteuergerät wird in diesem Fall alle noch kommunizierenden Zellmodule ebenfalls durch ein Kommando in diesen Zustand überführen.

6.2.2. Aktivierung

Sobald das "CAN IRQ Enable"-Signal empfangen wurde, wachen die Zellmodulsteuergeräte auf und führen einen Selbsttest durch. Sollte lediglich ein Timer Aufwachsignal empfangen worden sein, wird ein Protokollierungsdatum erstellt, welches alle verfügbaren Statusdaten, Zellspannungen und Temperaturen mit einem Zeitstempel abspeichert und beim nächsten Aufwachen durch das Batteriehauptsteuergerät an dieses sendet.

6.2.3. Normaler Modus

Ist der Selbsttest erfolgreich wechselt der Zustand zu "Normal". Hier können Spannungs-kommandos als auch schnelle Spannungsänderungen angefordert und umgesetzt werden.

6.2.4. Kommunikationsverlust

Sollte die Datenkommunikation über den IBCB gestört sein, wird versucht eine Halbduplex-Kommunikation auf einem der beiden Busse zu etablieren. Sollte dies auch fehlschlagen, wird die Zellspannung auf maximale Ausgangsspannung erhöht.

6.2.5. Ausschalten

Wird das Kommando zum Ausschalten empfangen, fährt das Zellmodulsteuergerät die Spannung des Zellmoduls herunter, erstellt ein Protokollierungsdatum und wechselt in den Schlafmodus.

Bild 10 zeigt die Betriebszustände für das Zellmodulsteuergerät.

7. ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen dieser Publikation wurden zunächst die Eigenschaften eines konventionellen "statischen" Batteriespeichers mit denen eines "modularen" Multilevel Batteriespeichers verglichen. Während die Komplexität des Systems bei Multilevel-Architekturen zunimmt stellen sich dennoch deutliche Vorteile dieser Technologie heraus. Insbesondere für Hochverfügbarkeitsanwendungen, wie sie unter anderem in der Luftfahrt vorzufinden sind, bieten Multilevel Batteriespeicher unschlagbare Vorteile durch die Möglichkeit, Zellen welche schadhaft sind oder nicht mehr die benötigte Leistung liefern, schlichtweg zu übergehen. Des Weiteren kann auf ein schweres Ladegerät an Bord des Luftfahrzeugs verzichtet werden ohne auf spezielle Ladeinfrastruktur am Zielort angewiesen zu sein. Der Wegfall von Komponenten mit kurzen Wartungsintervallen wie Kondensatoren am Motorcontroller, kann bei vollintegrierten Multilevel Batteriespeichern zu längeren Wartungsintervallen und dadurch reduzierten Betriebskosten führen. Darüber hinaus werden gleichzeitig einzelne Ausfallpunkte des Gesamtsystems wie den Motorcontroller mit Leistungsstufe und Leistungstrennschalter mit Vorladeschaltungen gänzlich eliminiert. In wie fern die Möglichkeit des schnellen pulsens von Zellen zu längeren Wartungsintervallen, reduzierten Betriebskosten und höherer Betriebssicherheit führt, wird Bestandteil weiterführender Forschung sein. Aktuelle Erkenntnisse lassen dahingehend große Erwartungen wachsen.

Im weiteren Verlauf dieser Veröffentlichung wurde eine Implementierung unter luftfahrtkonformen Anforderungen eines Batteriespeichers mit Multilevel-Architektur vorgestellt und in seiner Funktion beschrieben.

Abschließend bleibt zu erwähnen, dass das Ziel dieser Veröffentlichung ist Interesse an Multilevel-Batteriespeichern in der Luftfahrtforschung und Entwicklung zu wecken und ultimativ den Weg für den Einzug dieser wegweisenden Technologie zu ebnen.

Diese Forschungsarbeit im Projekt ELAPSED wird durch dtcc.bw – Zentrum für Digitalisierungs- und Technologieforschung der Bundeswehr gefördert. dtcc.bw wird von der Europäischen Union – NextGenerationEU finanziert.

Kontaktadresse:

stephan.diecke@ibsd.aero

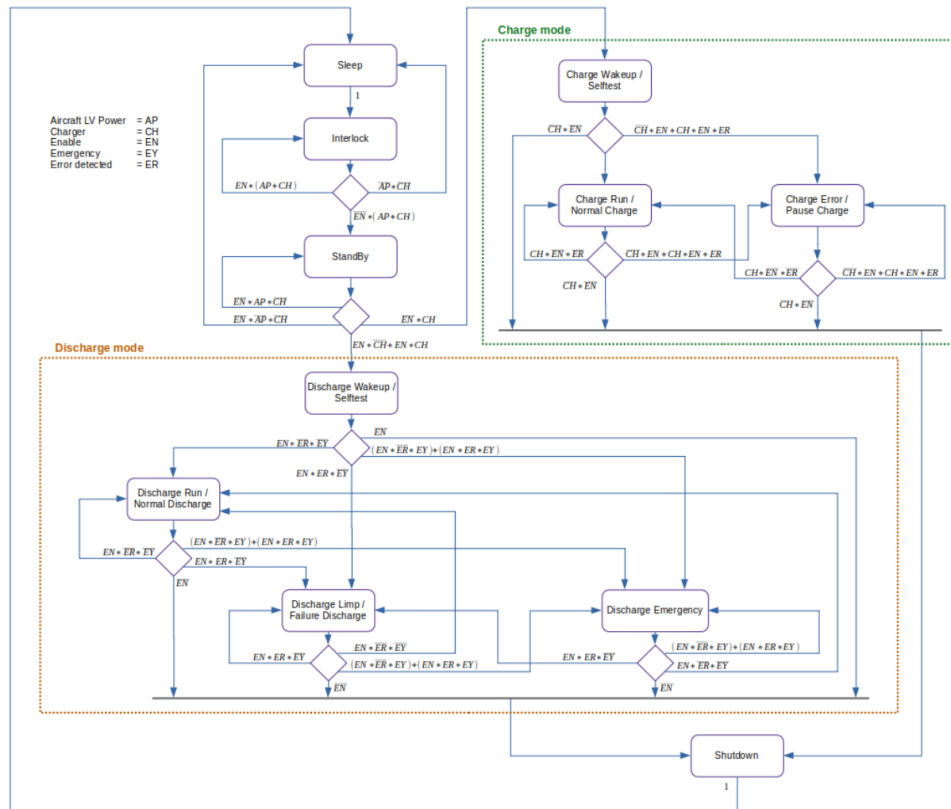


BILD 9. Zustandsübergangsdiagramm mit Zuständen des Batteriehauptsteuergeräts BMC

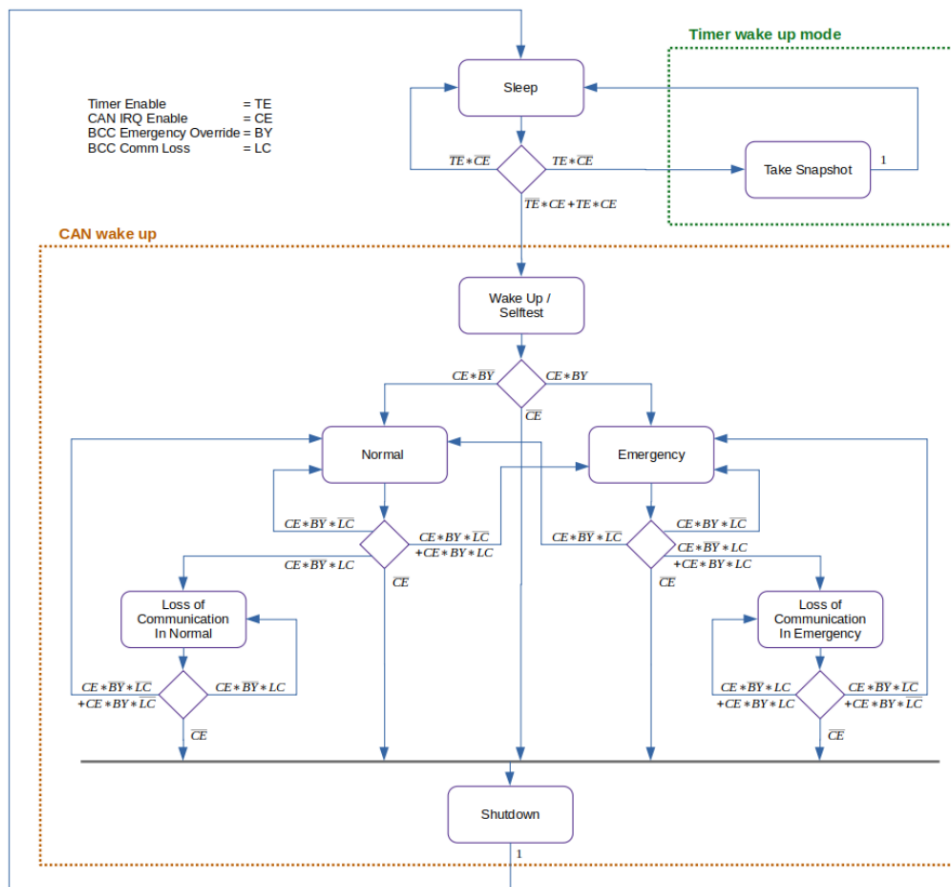


BILD 10. Zustandsübergangsdiagramm mit Zuständen des Zellmodulsteuergeräts BCC

Literatur

- [1] Dietrich J Roesler and Alois Louis Jokl. A rationale for electric drive trains for heavy-duty vehicles. Technical report, SAE Technical Paper, 1970.

- [2] Fengqi Chang, Olga Ilina, Leon Voss, and Markus Lienkamp. Improving the overall efficiency of au-

- tomotive inverters using a multilevel converter composed of low voltage si mosfets. *IEEE Transactions on Power Electronics*, PP:1–1, 07 2018. DOI: [10.1109/TPEL.2018.2854756](https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2854756).
- [3] EMRAX. Emrax 268 technical data table. Accessed: Online 08/2024, 2018.
 - [4] US Department of Defense. Reliability prediction of electronic equipment. Accessed: Online 08/2024, 1991.
 - [5] Florian Helling, Stefan Götz, and Thomas Weyh. A battery modular multilevel management system (bm3) for electric vehicles and stationary energy storage systems. In *2014 16th European Conference on Power Electronics and Applications*, pages 1–10, 2014. DOI: [10.1109/EPE.2014.6910821](https://doi.org/10.1109/EPE.2014.6910821).
 - [6] Claire Chang and Tilden Chen. Why pre-charge circuits are necessary in high-voltage systems. *TI*, Accessed: Online 08/2024, 2021.
 - [7] Ali Mashayekh, Anton Kersten, Manuel Kuder, Julian Estaller, Mahdiye Khorasani, Johannes Buberger, Richard Eckerle, and Thomas Weyh. Proactive soc balancing strategy for battery modular multilevel management (bm3) converter systems and reconfigurable batteries. 10 2021. DOI: [10.23919/EPE21ECCEurope50061.2021.9570543](https://doi.org/10.23919/EPE21ECCEurope50061.2021.9570543).
 - [8] Manuel Kuder, Anton Kersten, Lukas Bergmann, Richard Eckerle, Florian Helling, and Thomas Weyh. Exponential modular multilevel converter for low voltage applications. In *2019 21st European Conference on Power Electronics and Applications (EPE '19 ECCE Europe)*, 2019. DOI: [10.23919/EPE.2019.8915156](https://doi.org/10.23919/EPE.2019.8915156).
 - [9] Andreas Wiedenmann, Wolfgang Grupp, Tobias Högerl, Johannes Buberger, Florian Schwitzgebel, Manuel Kuder, Richard Eckerle, Thomas Weyh, and Antje Neve. Automation of modular multilevel converter topology evaluation including thermal monitoring. In *2022 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*, 09 2022. DOI: [10.1109/SEST53650.2022.9898447](https://doi.org/10.1109/SEST53650.2022.9898447).
 - [10] Dominic Karnehm, Nina Sorokina, Sebastian Pohlmann, Ali Mashayekh, Manuel Kuder, and Antje Neve. A high performance simulation framework for battery modular multilevel management converter. pages 1–6, 09 2022. DOI: [10.1109/SEST53650.2022.9898406](https://doi.org/10.1109/SEST53650.2022.9898406).
 - [11] Liang-Rui Chen, Jin-Jia Chen, Chun-Min Ho, Shing-Lih Wu, and Deng-Tswen Shieh. Improvement of li-ion battery discharging performance by pulse and sinusoidal current strategies. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 60:5620–5628, 12 2013. DOI: [10.1109/TIE.2012.2230599](https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2230599).
 - [12] Fengqi Chang, Felix Roemer, and Markus Lienkamp. Influence of current ripples in cascaded multilevel topologies on the aging of lithium batteries. *IEEE Transactions on Power Electronics*, PP:1–1, 04 2020. DOI: [10.1109/TPEL.2020.2989145](https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.2989145).
 - [13] Christian Campestrini, Peter Keil, Simon F. Schuster, and Andreas Jossen. Ageing of lithium-ion battery modules with dissipative balancing compared with single-cell ageing. *Journal of Energy Storage*, 6:142–152, 2016. ISSN: 2352-152X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2016.03.004>.
 - [14] Bliss Carkhuff, Plamen Demirev, and Rengaswamy Srinivasan. Impedance-based battery management system for safety monitoring of lithium-ion batteries. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, PP:1–1, 01 2018. DOI: [10.1109/TIE.2017.2786199](https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2786199).
 - [15] Ximing Cheng and Michael Pecht. In situ stress measurement techniques on li-ion battery electrodes: A review. *Energies*, 10:591, 04 2017. DOI: [10.3390/en10050591](https://doi.org/10.3390/en10050591).
 - [16] Juner Zhu, Ian Mathews, Dongsheng Ren, Wei Li, Daniel Cogswell, Bobin Xing, Tobias Sedlatschek, Sai Nithin R. Kantareddy, Mengchao Yi, Tao Gao, Yong Xia, Qing Zhou, Tomasz Wierzbicki, and Martin Z. Bazant. End-of-life or second-life options for retired electric vehicle batteries. *Cell Reports Physical Science*, 2(8):100537, 2021. ISSN: 2666-3864. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2021.100537>.
 - [17] Nina Sorokina, Wolfgang Bliemetsrieder, Julian Estaller, Dominic Karnehm, Thomas Weyh, and Manuel Kuder. Performance analysis of reconfigurable inverter battery systems for aircraft applications. In *2024 24th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, pages 1–6, 2024. DOI: [10.1109/EPE61521.2024.10559556](https://doi.org/10.1109/EPE61521.2024.10559556).
 - [18] Stephan Diecke and Tobias Högerl. Overcurrent protection and safe disconnect of high voltage circuits in electric vehicles without dedicated disconnects. 2025.
 - [19] dtec.bw. Electric aircraft propulsion – die zukunft der flugzeugantriebe. Online (accessed: March 30 2024), 2021.
 - [20] RTCA. Do-311a - minimum operational performance standards for rechargeable lithium batteries and battery systems. Online (accessed: March 30 2024), 2017.
 - [21] RTCA. Do-160g - environmental conditions and test procedures for airborne equipment. Online (accessed: March 30 2024), 2010.
 - [22] RTCA. Do-254 - design assurance guidance for airborne electronic hardware. Online (accessed: March 30 2024), 2000.
 - [23] RTCA. Do-178c - software considerations in airborne systems and equipment certification. Online (accessed: March 30 2024), 2011.
 - [24] SAE. Arp4754b guidelines for development of civil aircraft and systems. Online (accessed: March 30 2024), 2010.
 - [25] SAE. Arp4761a guidelines and methods of performing the safety assessment for certification of civil aircraft. Online (accessed: March 30 2024), 1996.
 - [26] Stephan Diecke. High reliability battery controller and motor controller platform for electric aircraft. 2025.