

Aktuelle und zukünftige Funktionalitäten von Hochvolt- und Niedervolt-Batteriemanagementsystemen

Florian Fritz
Technische Hochschule Ingolstadt
Ingolstadt, Bayern
Email: flf8099@thi.de

Zusammenfassung—Das Paper stellt neben den Lithium-Ionen-Zellen auch andere gängige Zelltypen, wie Blei-, Nickel- und Natrium-Zellen, vor. Dazu werden ihr Aufbau, ihre Funktionsweise und ihre jeweiligen, spezifischen Eigenschaften vorgestellt. Im Anschluss daran werden die theoretisch möglichen technischen Eigenschaften von Lithium-Schwefel- und Lithium-Luft-Zellen thematisiert. Batteriemanagementsystem sind für einen langjährigen, sicheren und effizienten Betrieb von Batteriezellen unerlässlich. Die einzelnen Komponenten und deren Funktionalität im Batteriemanagementsystem wird ausführlich erläutert. Abschließend werden mögliche zukünftige Entwicklungen im Bereich der Sensorik, dem thermischen Management und der Softwareerstellung aufgezeigt.

Index Terms—Batteries, Battery management systems, Lithium batteries.

I. ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ADAC	Allgemeine Deutsche Automobil-Club
AGM-Akku	Absorbent Glass Mat Akku
AUTOSAR	Automotive Open System Architecture
BMS	Batteriemanagementsystem
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
CSC	Cell Supervisory Circuit
KBA	Kraftfahr-Bundesamt
LRI	life-reduction index
SEI	solid electrolyte interface
SoC	State of Charge
SoF	State of Function
SoH	State of Health

II. EINLEITUNG

Bereits seit 2007 fördert die Bundesregierung den Ausbau der Elektromobilität, um das Klima zu schützen. Bis 2020 sollte in Deutschland die eine Million-Marke erreicht werden. 2030 sollten bereits sechs Millionen Elektrofahrzeuge in der Bundesrepublik zugelassen sein. Als Elektrofahrzeuge bezeichnet das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) alle Fahrzeuge, die mehrheitlich mit Strom betrieben werden. Fahrzeuge, die ausschließlich elektrisch betrieben werden und solche, die einen elektrischen Hauptantrieb und kleinen Verbrennungsmotor, zur Reichweiterhöhung, besitzen werden demnach zu den Elektrofahrzeugen gezählt. Des Weiteren werden Hybridfahrzeuge, Fahrzeuge

die sowohl über einen elektrischen Antrieb als auch über einen Verbrennungsantrieb verfügen, dieser Fahrzeugklasse zugeordnet [14].

Um die Ziele, in Hinsicht auf die Elektromobilität, zu erreichen, fördert die Bundesregierung Modellprojekte und Forschungsvorhaben in diesem Bereich. Kaufprämien und Steuervergünstigungen sollten den Bürger zum Kauf eines E-Fahrzeugs motivieren und Zuschüsse zum Ausbau der Ladeinfrastruktur diese flächendeckend verbessern. Mit dem Elektromobilitätsgesetz, das 2015 verabschiedet wurde, ermöglichte die Bundesregierung den Städten und Kommunen E-Fahrzeugen besondere Privilegien im Straßenverkehr einzuräumen. So besteht die Möglichkeit, spezielle Parkplätze mit Ladeinfrastruktur nur für E-Fahrzeuge einzurichten. Des Weiteren können Parkgebühren verringert oder komplett gestrichen werden. Elektrisch betriebene Fahrzeuge können zudem von Zufahrtsbeschränkungen ausgenommen werden. Bereits 2018 nutzten über 100 Städte und Kommunen deutschlandweit die Möglichkeit E-Fahrzeuge im Straßenverkehr zu Privilegieren [14]. Trotz all diesen Bemühungen, Elektromobilität anzutreiben waren am 01.01.2020 laut Kraftfahr-Bundesamt (KBA) lediglich ca. 200.000 E-Fahrzeuge zugelassen [10].

Woran liegt diese, im Vergleich zu den Zielen des Ministeriums, geringe Anzahl an zugelassenen E-Fahrzeugen in Deutschland? Der Allgemeine Deutsche Automobil-Club (ADAC) liefert einige mögliche Ursachen für diese Entwicklung. Zum einen liegt die Reichweite von Elektrofahrzeugen deutlich unter der von Autos mit Verbrennungsmotor. Ein Tesla Model 3 RL AWD besitzt laut Hersteller eine Reichweite von 560 km. Des Weiteren nennt der ADAC den höheren Planungsaufwand bei Reisen mit E-Fahrzeugen, aufgrund der schlecht ausgebauten Ladeinfrastruktur, als weiteres Kaufhemmnis. Da die Produktion von Elektrofahrzeugen wesentlich mehr CO₂-Emissionen erzeugt und der Strom nicht immer aus erneuerbaren Energien kommt, ist die Umweltfreundlichkeit dieser Fahrzeuge ebenfalls umstritten. Der herstellungsbedingte Umweltnachteil von Elektroautos sollte laut ADAC nach 50.000 km bis 100.000 km, abhängig vom Modell und Sauberkeit des getankten Stroms, wieder aufgeholt sein. Die vergleichsweise hohen Anschaffungskosten werden ebenfalls als mögliche Ursache genannt [1].

Als teuerste Komponente hat die Batterie, meist Lithium-

Ionen-Batterie, einen bedeutenden Einfluss auf den Kaufpreis aktueller Elektroautos. Zwar konnten die Batteriekosten von über 1.000 €/kWh im Jahr 2007 auf 230 €/kWh (Stand 2019) reduziert werden. Dennoch liegen alleine die Batteriekosten eines smart fortwo electric drive (17,6 kWh) bei über 4000 € [2]. Bei Fahrzeugen mit mehreren 100 kWh liegen die Batteriekosten dementsprechend höher. Kosten können nicht nur bei der Herstellung von Batteriezellen eingespart werden. Moderne Batteriemanagementsysteme (BMS) können die Lebensdauer von Batterien erhöhen und dadurch die Wirtschaftlichkeit verbessern. Dies wird erreicht, indem die einzelnen Batteriezellen überwacht und ausschließlich innerhalb ihres Arbeitsbereichs betrieben werden [6].

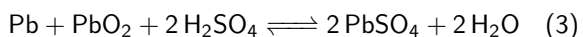
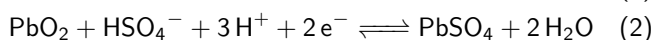
III. BATTERIETYPEN

Batterien lassen sich prinzipiell in zwei Kategorien einteilen. Primärzellen sind Energiespeicher, bei denen die elektrische Energie durch irreversible Reaktionen entsteht. Das bedeutet, dass sie nur einmal verwendet werden können und nicht wieder aufgeladen werden können. Bei Sekundärzellen hingegen wird die elektrische Energie durch reversible Reaktionen bereitgestellt. Dies ermöglicht es entladene Zellen durch Umkehren der Reaktion wieder zu laden und erneut zu verwenden [11]. In den folgenden Abschnitten werden verschiedene Arten von Sekundärzellen hinsichtlich ihres Aufbaus und ihrer Funktionsweise betrachtet.

A. Bleibatterien

Bleibatterien sind die älteste und bisher erfolgreichste Technologie für Sekundärzellen. Wie aus Abbildung 1 ersichtlich, besteht eine Bleizelle aus einer negativen Bleielektrode (Pb) und einer, mit Blei(IV)-oxid (PbO_2) beschichteten, positiven Elektrode. Als Elektrolyt wird 37%-ige Schwefelsäure (H_2SO_4) verwendet. Um ein Auslaufen zu verhindern verwenden wartungsfreie Bleiakkus fixierten Elektrolyt. Bei Blei-Gel-Akkus wird zur wässrigen Schwefelsäure Kieselsäure (SiO_2) hinzugegeben, was zum Gelieren führt. Mit Glasvliesmatten wird der Elektrolyt bei Absorbent Glass Mat Akku (AGM-Akku) fixiert [9].

Beim Entladen findet am Minuspol eine Oxidation statt. Blei reagiert mit ionisiertem Hydrosulfat unter Freisetzung zweier Elektronen zu Blei(II)-sulfat und einem Wasserstoffion (1). Am Pluspol wird Blei(IV)-oxid mit Hydrosulfat, Wasserstoff und Elektronen zu Blei(II)-sulfat und Wasser reduziert (2). Insgesamt reagieren somit Blei, Blei(IV)-oxid und Schwefelsäure zu Blei(II)-sulfat und Wasser (3). Beim Laden werden die angegebenen Oxidationen und Reduktionen umgekehrt [11].



Wird eine Bleibatterie Überladen, so kommt es zur elektrolytischen Gasabscheidung. Dabei entsteht ein explosives Gemisch aus Wasserstoff (H_2) und Sauerstoff (O_2).

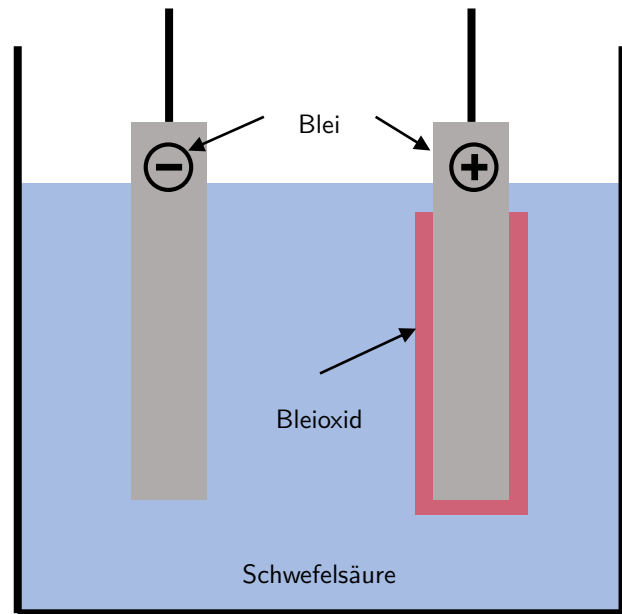


Abbildung 1. Aufbau Bleiakku nach [12]

Bei Überhitzung der Bleibatterie besteht die Gefahr des thermischen Durchgehens [11]. Überhöhte Zelltemperaturen begünstigen die thermische Zersetzung von Zellkomponenten. Dies hat einen weiteren Anstieg der Zelltemperatur zufolge und ermöglicht weitere Zersetzungsprozesse. Unkontrollierte Hitzeentwicklung kann bis zum Zellbrand führen [9].

Einen Vorteil dieser Technologie bietet die hohe Strombelastbarkeit, wodurch sie sich gut als Starterbatterien, beispielsweise in Fahrzeugen, eignet. Geringe Herstellungskosten und gute Recycelbarkeit tragen zusätzlich zur weiten Verbreitung der Bleibatterie bei [9]. Wie aus Tabelle I hervorgeht, unterliegt sie anderen Batterietypen jedoch in den meisten technischen Eigenschaften.

B. Nickel-Batterien

Im geladenen Zustand besteht die positive Elektrode, der Nickel-Cadmium-Batterie, aus Nickel(III)oxid-hydroxid ($\text{NiO}(\text{OH})$). Die negative Elektrode besteht aus metallischem Cadmium. Als Elektrolyt wird 21%-ige Kalilauge (KOH) eingesetzt. Der Separator muss alkalibeständig, stabil, ionenleitend und elektrisch isolierend sein. Polyolefin-Faservliese erfüllen diese Vorgaben und finden häufig Verwendung als Separator [11].

Beim Entladen oxidiert Cadmium, an der negativen Elektrode, mit zwei Hydroxidionen zu Cadmiumhydroxid unter Freisetzung von zwei Elektronen (4). An der positiven Elektrode wird Nickel(III)oxid-hydroxid mit Wasser und Elektronen zu Nickel(II)-hydroxid und Hydroxidionen reduziert (5). In der Nickel-Cadmium-Zelle läuft insgesamt die Red-Ox-Reaktion (6) ab. Cadmium und Nickel(III)oxid-hydroxid reagieren mit Wasser zu Nickel(II)-hydroxid und Cadmiumhydroxid [11].

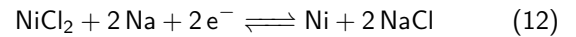
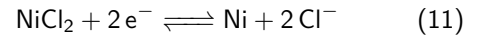
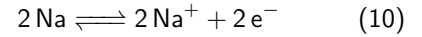
Tabelle I
EIGENSCHAFTEN AUSGEWÄHLTER BATTERIETYPEN [6]

Größe	Pb-Säure	NiCd	NiMH	NaNiCl	Li-Ionen
Gravimetrische Energiedichte ($\frac{Wh}{kg}$)	20-35	30-50	50-80	80-100	90-200
Leistungsdichte ($\frac{W}{kg}$)	100	600	1000	170	300-4000
Kalendarische Lebensdauer (Jahre)	3-5	5-15	<5	8-10	5-15
Zyklusfestigkeit (Zyklen)	1200	2000	1000	1500	500-4000
Sicherheit (+/0/-)	+	+	+	0	-
Umweltverträglichkeit (+/0/-)	0	-	0	+	0

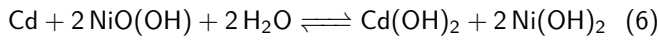
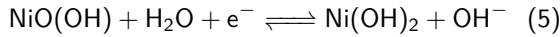
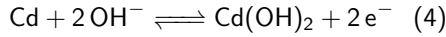
C. Hochtemperatur-Natrium-Batterien

Natrium-Nickelchlorid-Batterien auf ZEBRA-Batterien genannt, bestehen aus einer flüssigen, negativen Natriumelektrode (Na) und einer festen, positiven Nickelchlorid-Elektrode (NiCl₂). Hochtemperaturbatterien heißen sie, weil der Festelektrolyt β -Alumina (natriumhaltiges Al₂O₃), Natriumionen erst bei Temperaturen über 220 °C leitet. Auf einen Separator kann verzichtet werden, da der Elektrolyt als Feststoff vorliegt [11].

An der negativen Elektrode oxidiert Natrium zu Natriumionen unter Freisetzung von Elektronen (10). Nickelchlorid wird mit Elektronen an der positiven Elektrode zu Nickel und Chloridionen reduziert (11). Wie in Reaktion (12) zeigt, reagiert insgesamt Nickelchlorid mit Natrium zu Nickel und Natriumchlorid [11].



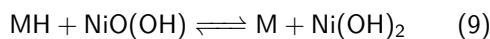
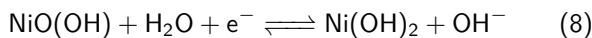
Wie in Tabelle I dargestellt, weist die Natrium-Nickelchlorid-Batterie eine hohe Zyklusfestigkeit, durchschnittliche kalendarische Lebensdauer und gute Umweltverträglichkeit auf. Die Stromausbeute liegt bei 100%, da keine Nebenreaktionen stattfinden. Unter Berücksichtigung der thermischen Verluste ergibt sich somit eine Energieeffizienz von bis zu 90% [11]. Weitere Vorteile der ZEBRA-Batterie liegen in der Über- und Tiefentladetoleranz und den niedrigen Materialkosten. Nachteilig ist, dass die Betriebstemperatur ständig gehalten werden muss. Im Betrieb hält sich die Temperatur aufgrund des hohen Innenwiderstands selbst. Werden die ca. 90 W Heizleistung nicht bereitgestellt, kühlt die Batterie ab und die Elektroden können fest werden. Feste Elektroden verlieren keine Ladung, benötigen jedoch bis zu 15 h zum Schmelzen [4]. Risse im Elektrolyt werden durch metallisches Aluminium aufgefüllt. Bei zu großen Rissen kann das metallische Aluminium die Elektroden verbinden und so zum Kurzschluss führen. Der Ausfall einzelner Zellen im Zellmodul kann zum Kurzschluss führen. Um dies zu verhindern, werden BMS eingesetzt [11].



Schnellladefähigkeit, Kältefestigkeit und geringe Herstellungskosten sind wichtige Vorteile der Nickel-Cadmium-Batterie [11]. Wie Tabelle I zeigt, punktet diese Batterietechnologie ebenfalls mit ihrer hohen kalendarischen Lebensdauer, ihrer Zyklusfestigkeit und der Sicherheit. Energie- und Leistungsdichte sind jedoch geringer als bei NiMH oder Li-Ionen Batterien. Zellen können aufgrund des Gasdrucks, der beim Umpolen in der Zelle entsteht, explodieren. Seit 2013 ist Cadmium auf der Liste der besorgniserregenden Substanzen der EU. Dadurch ist eine Verwendung der Nickel-Cadmium-Zellen nur noch in speziellen Fällen, wie Medizintechnik oder Notstromversorgung, erlaubt [11].

Neben der Nickel-Cadmium-Batterie existieren noch weitere nickelbasierte Batterietechnologien. Bei der Nickel-Metallhydrid-Batterie besteht die negative Elektrode aus Metallhydrid (MH) und als Elektrolyt wird 30%-ige Kalilauge verwendet. Die anderen Komponenten sind identisch zu den Nickel-Cadmium-Batterien [11].

An der negativen Elektrode oxidiert Metallhydrid mit Hydroxidionen zu Metall und Wasser unter Freisetzung eines Elektrons (7). Analog zu den gleichen Materialien der positiven Elektrode findet die gleiche Reduktion statt (8). Reaktion (9) zeigt die Gesamt-Red-Ox-Gleichung der Nickel-Metallhydrid-Zelle. Metallhydrid reagiert mit Nickel(III)oxid-hydrid zu Metall und Nickel(II)-hydrid [11].



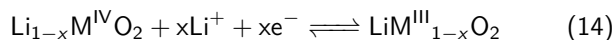
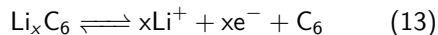
Im Gegensatz zur Nickel-Cadmium-Batterie ist die Nickel-Metallhydrid-Batterie weniger anfällig für Tiefentladung und Überspannung [5]. Aus Sicht der technischen Eigenschaften überzeugt die Nickel-Metallhydrid-Batterie mit einer hohen Leistungsdichte. Wie Tabelle I jedoch auch zeigt, besitzt sie eine sehr begrenzte Lebensdauer.

D. Lithium-Ionen-Batterien

Die Lithium-Ionen-Technologie verdrängt derzeit die meisten etablierten Batterietypen vom Markt. Lithium, der Feststoff mit der geringsten Dichte ($0,53 \text{ g/cm}^3$), besitzt ein sehr hohes Standardpotenzial von über -3 V und eignet sich somit Perfekt für die Anwendung in Batterien [9].

Abbildung 2 zeigt den Aufbau und die Funktionsweise von Lithium-Ionen-Batterien. Die negative Elektrode besteht aus Kupfer, als Stromableiter, und Graphit, als Aktivmaterial. Der Strom an der positiven Elektrode wird von Aluminiumfolie abgeleitet. Als Anodenmaterial finden Metalloxide Verwendung. Typische Elektrodenmetalle sind Kobalt (Co), Nickel (Ni) und Mangan (Mn). Zwischen den Elektroden befindet sich eine ionenleitende Elektrolytschicht. Neben den am meisten verbreiteten Flüssigelektrolyten existieren noch polymere und feste Varianten. Zwischen dem Elektrolyten und der negativen Elektrode bildet sich eine, solid electrolyte interface (SEI) genannte, Schutzschicht. Sie entsteht durch die Reaktion von Lithium mit dem Elektrolyten und ist ionendurchlässig. Bei flüssigen Elektrolyt wird ein Separator benötigt um die räumliche Trennung der beiden Elektroden sicherzustellen und einen Kurzschluss zu verhindern [11].

Reaktion (13) und (14) zeigen die Reaktionen beim Entladen einer Lithium-Ionen-Zelle an der negativen und positiven Elektrode. Beim Entladen werden aus der negativen Elektrode Lithiumionen ausgelagert. Die Ionen wandern durch den Elektrolyten und den Separator zur positiven Elektrode. Dort werden sie in das Metalloxid eingelagert. Umgekehrte Reaktionen laufen beim Ladevorgang ab [9][11]. Das Einlagern der Li-Ionen in das Kathoden- bzw. Anodenmaterial wird in Abbildung 2 mit den farbigen Pfeilen dargestellt.



Lithium-Ionen-Zellen können, im Gegensatz zu Bleibatterien, aus verschiedenen Materialien bestehen. Dadurch können Zellen mit anwendungsspezifischen Eigenschaften konfiguriert werden. Allgemein zeichnen sich Lithium-Ionen-Batterien jedoch durch hohe spezifische Energiedichten (bis 250 Wh/kg), hohe Zellspannungen (ca. $3,6 \text{ V}$) und Wirkungsgrade von über 95% aus [9]. Geringe Selbstentladung, geringer Memory-Effekt und hohe Lade- und Entladeströme tragen ebenfalls zur schnellen Verbreitung der Lithium-Ionen-Batterie bei [3].

Neben einer Vielzahl von Vorteilen besitzen Lithium-Ionen-Batterien auch Nachteile. Tiefentladung, unter die Entladeschlussspannung von $2,5 \text{ V}$, kann zu irreversiblen Zellschäden führen. Kapazitätsverlust und erhöhte Selbstentladung sind mögliche Folgen. Wird die Zelle über die Ladeschlussspannung von $4,2 \text{ V}$ geladen, kann es zur spontanen Selbstentzündung kommen. Zu hohe Zelltemperaturen können Kapazitätsverluste zur Folge haben [9]. Große Ladeströme bei niedrigen Temperaturen können zum Lithium-Plating führen. Dabei lagern sich Lithium-Ionen nicht zwischen den Graphitschichten, sondern direkt an der Anode ab. Dies geschieht auf

Kosten der Lebensdauer, Leistungsfähigkeit und Sicherheit [7]. Im Extremfall schließen Lithium Dentrade, die sich von der Anode bis zur Kathode erstrecken, die Zelle kurz [9]. Abbildung 3 zeigt grafisch die verschiedenen Beschränkungen beim Betrieb von Lithium-Ionen-Batterien. Beschränkt wird der Betriebsbereich durch Entladeschlussspannung, Ladeschlussspannung, Übertemperatur und Stromlimit. Um den sicheren Betrieb zu garantieren, ist ein BMS unerlässlich.

E. Zukünftige Entwicklung

Lithium-Ionen-Zellen werden kontinuierlich weiterentwickelt. Bei den Separatoren versprechen Keramik und Polyester-Vliesstoffe höhere mechanische, elektrochemische und thermische Stabilität. Dadurch kann die Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien weiter erhöht werden. Die spezifische Kapazität von Anoden aus Kohlenstoff-Silizium-Verbindungen ist rund doppelt so hoch wie die von herkömmlichen Graphit-Anoden. In Kathoden werden Nickel-Kobalt-Manganoxide und Hochvolt-Spinelle eingesetzt, um die maximale Zellspannung zu erhöhen. Um höhere Zellspannungen zu ermöglichen, sind Elektrolyte nötig, die sich dabei nicht zersetzen. Um Elektrolyte mit solchen Eigenschaften zu entwickeln, muss das Zusammenspiel zwischen Leitsalz, Lösungsmittel und Additiven optimiert werden. Des Weiteren sollte ihre Herstellung, auch bei größeren Mengen, möglichst wirtschaftlich und nachhaltig sein [9].

Nachdem die Energiedichte in den letzten Jahren rasant erhöht werden konnte, ist in Zukunft nicht mit vergleichbaren Quantensprüngen bei den Lithium-Ionen-Zellen zu rechnen. Stattdessen richtet die Forschung ihren Blick auf Lithium-Schwefel- und Lithium-Luft-Batterien. Diese neuen Technologien versprechen weitaus höhere gravimetrische Energiedichten. Gründe dafür sind,

- 1) die Gewichtseinsparung durch die Verwendung leichterer Kathodenmaterialien.
- 2) die erhöhte Lithium-Einlagerungskapazität von Schwefel bzw. Sauerstoff gegenüber herkömmlichen Kathodenmaterialien.
- 3) der Einsatz von metallischem Lithium als Anode. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass die Dendritenbildung verhindert werden kann.

Teilweise marktreife Lithium-Schwefel-Zellen wurden bereits entwickelt, sind auf dem freien Markt jedoch noch nicht verfügbar. Aktuelle Zellen erreichen gravimetrische Energiedichten bis ca. $350 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$. Zukünftig sollten bis zu $600 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$ möglich werden. Theoretisch könnten Lithium-Schwefel-Zellen gravimetrische Energiedichten von über $2600 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$ erreichen. Da jedoch weder Schwefel noch Lithiumsulfid elektrisch leitend ist, werden in der Kathode Kohlenstoffpartikel eingelagert, die für die nötige Leitfähigkeit sorgen. Dadurch kann die theoretisch mögliche Energiedichte nicht erreicht werden. Die Ausdehnung der Kathode beim Einlagern von Lithium stellt die Batterieentwicklung genauso vor Herausforderungen, wie die noch unzureichend erforschten Zwischenprodukte, die beim Laden und Entladen entstehen. Größtes Problem ist jedoch das

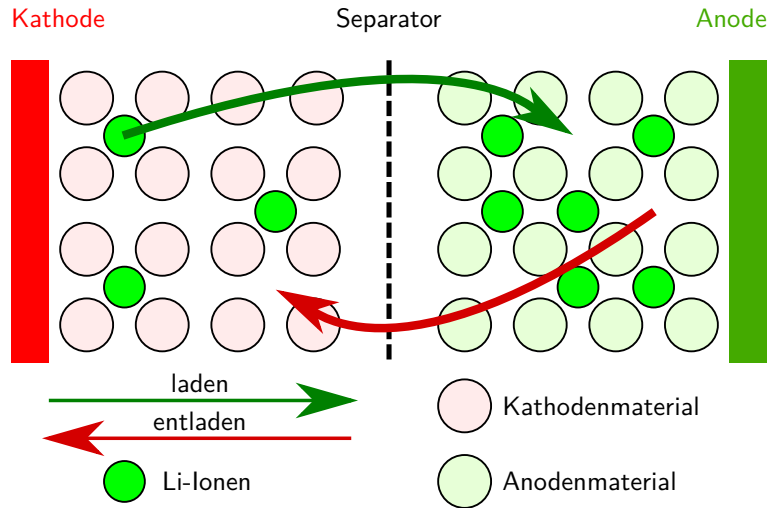


Abbildung 2. Aufbau Lithium-Ionen-Batterie nach [6]

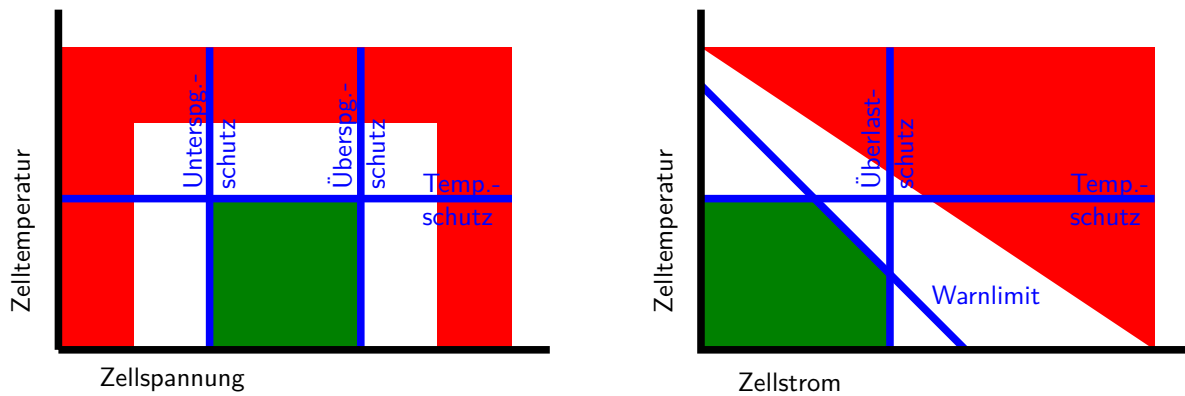


Abbildung 3. Funktionsbereich Lithium-Ionen-Batterien (rot: Verbotene Zone, weiß: Sicherheitszone, grün: Betriebsbereich) nach [9]

schlechte zyklische und dynamische Verhalten der neuartigen Zellen [9].

Im Gegensatz zu den Lithium-Schwefel-Zellen befindet sich die Wissenschaft bei den Lithium-Luft-Zellen noch in der Grundlagenforschung. Bei diesen Zellen handelt es sich um offene Systeme, da Sauerstoff aus der Umgebung verwendet wird, um Lithium einzulagern. Die Einlagerung des Lithiums kann in Lithiumoxid (Li_2O) oder Lithiumperoxid (Li_2O_2) erfolgen. Berücksichtigt man den benötigten Sauerstoff bei der Berechnung der theoretischen spezifischen Energiedichte, so erhält man $5220 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$ für Li_2O und $3458 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$ für Li_2O_2 . Bei herkömmlichen Verbrennungsmotoren wird der benötigte Sauerstoff jedoch nicht mit in die Berechnung der Energiedichte mit einbezogen. Vernachlässigt man den Sauerstoff auch bei den Lithium-Luft-Zellen, so ergeben sich theoretische Energiedichten von über $11000 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$. Dies entspricht nahezu der Energiedichte konventioneller Brennstoffe. Wie bei der Lithium-Schwefel-Zelle ergibt sich auch bei der Lithium-Luft-Zelle das Problem mit der Volumenausdehnung und den benötigten Kohlenstoffpartikeln. Zusätzlich muss verhindert werden, dass andere Luftbestandteile, abgesehen von Sauerstoff, in die Zelle gelangen und mit dem Lithium reagieren.

Voraussichtlich ist bei den Lithium-Luft-Zellen mit praktischen Energiedichten, um die $1700 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$ zu rechnen [9].

IV. BATTERIEMANAGEMENTSYSTEME

Um größere Spannungen und Kapazitäten zu erreichen, werden meist mehrere Batteriezellen zu einem Mehrzellenakku zusammengesetzt. In einem solchen Zellenverbund bestimmt stets die Zelle mit der geringsten Kapazität das Verhalten des gesamten Akkus. Fertigungsbedingte Unterschiede zwischen Batteriezellen führen zu ungleichen Alterungsgeschwindigkeiten. Dadurch driften die Kapazitäten einzelner Zellen im Mehrzellenakku im Laufe der Zeit auseinander. Beim Laden und Entladen erreichen Zellen mit geringerer Kapazität schneller die oberen bzw. untere Spannungsgrenze. Um eine Beschädigung dieser Zellen durch Tiefentladen oder Überladen zu verhindern muss die Spannung jeder einzelnen Zelle separat erfasst und überwacht werden [7]. Neben der Überwachung der Zellspannung sorgt ein BMS auch dafür, dass die Zellen den in Abbildung 3 dargestellten Betriebsbereich nicht verlassen. Dadurch steigert es die Leistungsfähigkeit und Lebensdauer von Mehrzellenakkus [6]. Im Folgenden wird zuerst auf die Komponenten und anschließend auf deren Funktion im BMS

eingegangen. Abschließend wird ein Ausblick auf mögliche zukünftige Entwicklungen gegeben.

A. Aufbau

Abbildung 4 zeigt den groben Aufbau eines BMS mit den benötigten elektrischen Komponenten. Das Zellmodul beinhaltet sowohl die Batteriezellen bzw. Ultrakondensatoren, als auch für das Thermomanagement benötigte Komponenten wie beispielsweise Lüftungskanäle für luftgekühlte Systeme. Verschiedene Batterietypen wurden bereits in Abschnitt III vorgestellt und bezüglich ihrer technischen Daten verglichen. Zellüberwachungsschaltungen, auch Cell Supervisory Circuit (CSC) genannt, erfassen direkt an den Zellen aktuelle Temperatur- und Spannungswerte. Wird die Batterieeinheit flüssiggekühlt, so sind Feuchtigkeitssensoren unerlässlich, um ein Austreten des Kühlmittels und dadurch eine Beschädigung der Batterie zu verhindern. Ein Bussystem überträgt die gemessenen Daten an das BMS. Bei Fahrzeugen wird häufig der CAN-Bus eingesetzt. Der CSC erhält über seine Busschnittstelle auch Informationen zum Cell-Balancing, auf das im Unterabschnitt IV-B genauer eingegangen wird. Es gibt auch Batteriesysteme, die auf einen CSC verzichten. Dabei übernimmt das BMS direkt das Auslesen der Sensoren und steuern des Balancing [9].

Die Steuereinheit, das eigentliche BMS, erfasst die Daten aller Sensoren und CSC des gesamten Mehrzellenakkus. Zusätzlich steuert sie die Last- und Laderelais und kommuniziert mit übergeordneten Systemen. Repräsentiert wird die Steuereinheit von einem Mikrocontroller. Schnittstellen ermöglichen den Austausch von Daten und die Leistungsübertragung. Sie werden unterteilt in Niederspannungs- (LV) und Hochspannungsschnittstellen (HV). Die LV-Schnittstelle versorgt das BMS, die CSC und die restliche Sensorik mit Spannung (meist 24 VDC). Diese Schnittstelle überträgt auch die Bussignale zwischen der Batterie und dem übergeordneten System. Des Weiteren finden sich zwei HV-Schnittstellen, eine zum Laden und eine zum Entladen. Kühlmittelschnittstelle und Servicekontakt sind in Abbildung 4 nicht dargestellt, sind jedoch fester Bestandteil aktueller Batterieeinheiten. Bei externen Kühlsystemen, näher in Unterabschnitt IV-B erläutert, wird das Kühlmittel über die zugehörige Schnittstelle ausgetauscht, um die Batterieeinheit zu temperieren. Der Servicekontakt unterbricht im Bedarfsfall die elektrischen Verbindungen zwischen den einzelnen Zellmodulen. Dadurch werden die Gefahren für das Servicepersonal und das Risiko einer Beschädigung der Batterie minimiert [9].

Wie Abbildung 4 zeigt, sind die Zellmodule nicht direkt mit den HV-Schnittstellen verbunden. Jeweils zwei Last- und Laderelais trennen Module und Schnittstellen voneinander. Die Laderelais steuern den Ladevorgang und verhindern ein Überladen, indem sie die Zellmodule von der Ladeeinheit trennen. Da die Leistungsinverter in Elektrofahrzeugen sehr hohe Filterkapazitäten aufweisen, ist ein Vorladekreis unerlässlich. Direkt über die Lastrelais geschaltet könnten die hohen Spitzenströme, zum Laden der Kapazitäten, die Relaiskontakte beschädigen oder gar verschweißen und somit

verhindern, dass diese sich anschließend wieder öffnen lassen. Ein Widerstand im Vorladekreis begrenzt den dort fließenden Strom auf max. 20 A. Nachdem Vorladerelais und Lastrelais des Rückleiters für wenige Zehntelsekunden den Hauptkreis vorgeladen haben, kann das zweite Lastrelais geschlossen werden. Die verbleibende Spannungsdifferenz kann von den Relais bedenkenlos geschaltet werden. Für den Abschaltvorgang wird der Vorladekreis nicht benötigt, da alle Kapazitäten bereits geladen sind. Spitzenströme, die Kontaktoren beschädigen können treten deshalb nicht auf [9].

Beschädigungen der Batteriezellen durch Überlast wird durch Sicherungstrennschalter (kurz Sicherung) verhindert. Man unterscheidet zwischen Schmelzsicherungen, Halbleiterschaltern und pyrotechnischen Trennern. Laut $P_v = R \cdot I^2$ steigt die Verlustleistung quadratisch zum fließenden Strom. Wird die Verlustleistung, verursacht durch den Strom, in einer Schmelzsicherung zu groß schmilzt der Draht und der Stromfluss wird unterbrochen. In Halbleiterschaltern wird der Stromfluss durch Leistungstransistoren unterbrochen. Gate-Treiber steuern die Transistoren. Bei pyrotechnischen Trennern wird eine Treibladung von einem stromdurchflossenen Heizdraht gezündet. Die Treibladung unterbricht die Leiterbahn an einer dafür vorgesehenen Sollbruchstelle. Schmelzsicherungen und pyrotechnische Trenner können nur einmal verwendet werden [8].

Der Stromsensor misst den aktuellen Lade- bzw. Entladestrom des gesamten Mehrzellenakkus und gibt den Messwert an das BMS 4. Für die Strommessung bieten sich verschiedene Verfahren an. Bei der Messung mit einem Shunt, einem niederohmigen Präzisionswiderstand, wird der Spannungsabfall über diesen gemessen und daraus mit $I = U/R$ der Strom berechnet [9]. Die Genauigkeit der Messung wird dabei von der Genauigkeit des Sensors und seiner Temperaturabhängigkeit beeinflusst. Mit einem Shunt kann eine große Bandbreite an Strömen gemessen werden. Die Kalibrierung des Messsystems ist verhältnismäßig einfach. Die Mindestgröße des Sensors werden durch die im Widerstand auftretende Verlustleistung beeinflusst. Da der Messkreis nicht galvanisch von der Lastseite getrennt ist, werden weitere Bauteile benötigt um, einen einwandfreien Betrieb sicherzustellen [8]. Hall-Sensoren messen das, durch den Stromfluss in einem Leiter verursachte, Magnetfeld und errechnen daraus den Strom. Magnetfeldsensoren eignen sich auch für den Einsatz im HV-Bereich, da sie, bedingt durch ihr Funktionsprinzip, über eine galvanische Trennung verfügen. Im Gegensatz zur Strommessung mit einem Shunt ist die Magnetfeldmessung nicht verlustbehaftet. Dadurch kann das Gehäuse kleiner dimensioniert werden, da weniger Verlustleistung abgeführt werden muss. Zudem ist die Messung weniger anfällig für Temperaturschwankungen. Um die Ausfallsicherheit zu erhöhen und Messfehler zu verringern, können Magnetfeldsensoren auch redundant ausgeführt werden. Da das Messprinzip nicht in den Lastkreis eingreift und rückwirkungsfrei ist, bleibt das System lauffähig, auch wenn einzelne Sensoren ausfallen [9].

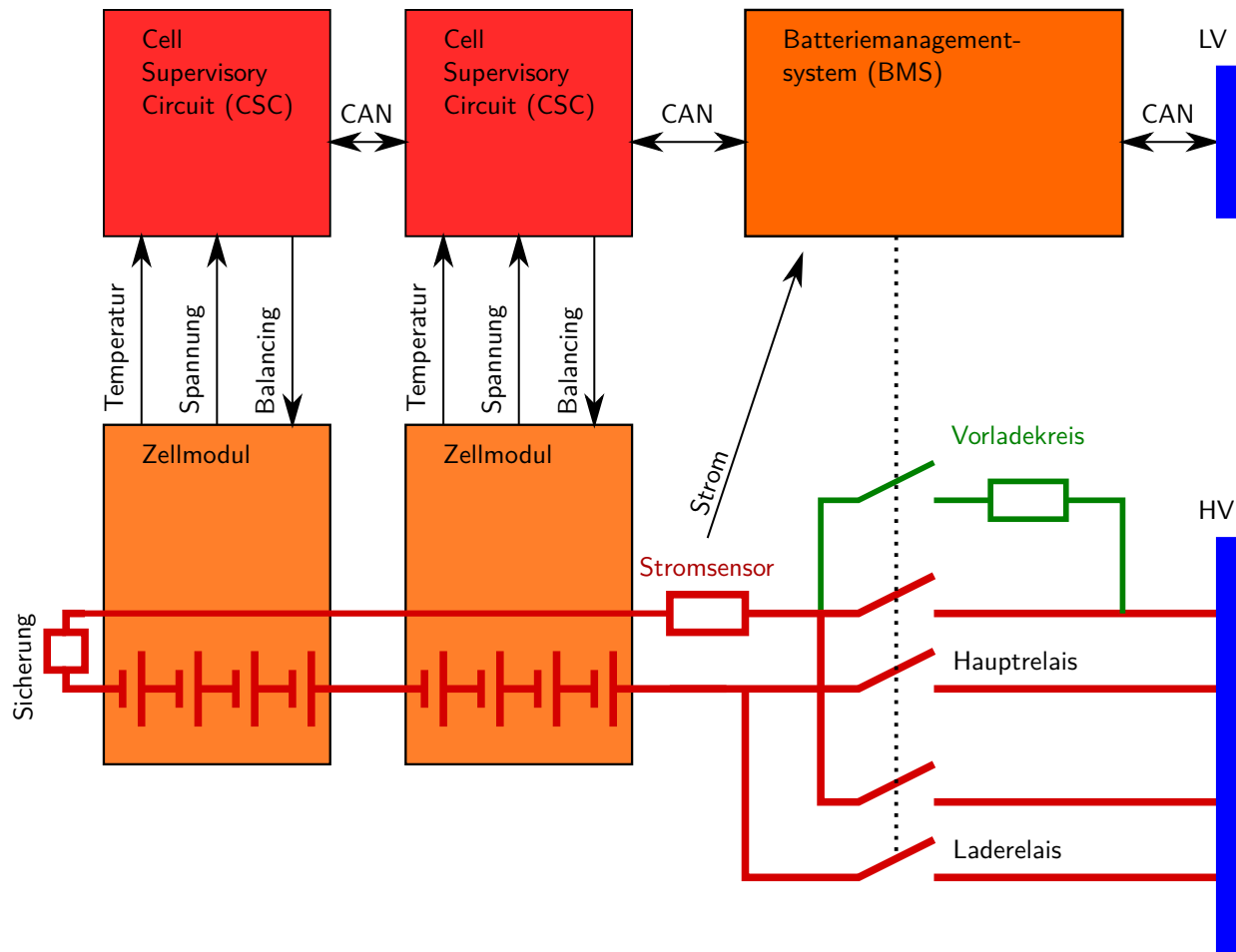


Abbildung 4. Grundarchitektur eines BMS nach [9]

B. Funktionen

Die Funktionen von BMS lassen sich prinzipiell in zwei Gruppen einteilen. Die Grundfunktionen sorgen für einen sicheren Betrieb der Batterieeinheit. Leistungsoptimierung, Performancesteigerung und Lebensdauererhöhung sind Zusatzfunktionen.

Zu den Grundfunktionen zählt der Überspannungsschutz. Er verhindert, dass einzelne Zellen durch Überladen beschädigt werden. Der Überlastschutz verhindert Lithium-Plating aufgrund von zu großen Strömen in den Batteriezellen. Zudem muss sichergestellt werden, dass die Batterie in Notsituationen abgekapselt werden kann und weitere Gefahren minimiert werden [6]. Werden Lithium-Ionen-Batterien außerhalb ihres optimalen Temperaturbereichs betrieben, ist mit erheblichen Leistungseinbußen zu rechnen. Wie in Unterabschnitt III-D beschrieben, können für die Elektroden von Lithium-Ionen-Batterien verschiedene Materialien verwendet werden. Der optimale Temperaturbereich kann durch die Materialzusammensetzung beeinflusst werden. Typischerweise liegt er jedoch zwischen 20 °C und 40 °C. Zu hohe Temperaturen beschleunigen die Zellalterung und können bis zum thermischen Durchgehen führen. Um die Leistungsfähigkeit einer Batterie

langfristig sicherzustellen ist ein thermisches Management unerlässlich. Eine möglichst geringe und gleichmäßige Alterung aller Zellen in einer Batterieeinheit wird erreicht, indem die Temperatur im optimalen Bereich gehalten wird und bei allen Zellen möglichst gleich ist. Bei größeren Batterien können die, am weitesten voneinander entfernten Zellen Abstände von über einem Meter aufweisen. Diese große räumliche Verteilung stellt hohe Ansprüche an das thermische Management, da die Temperaturdifferenz 5 K nicht übersteigen sollte [9].

Man unterscheidet zwischen luftgekühlten Systemen und Systemen, die flüssige Kühlmittel verwenden. Bei luftgekühlten Batterien werden die Zellen direkt von der Kühlluft umströmt. Diese Kühlmethode ist technisch einfach zu realisieren, benötigt jedoch wesentlich mehr Bauraum als andere Varianten. Zudem muss darauf geachtet werden, dass kein Schmutz und Feuchtigkeit in die Batterie gelangen. Da Umgebungsluft bei hohen Außentemperaturen, beispielsweise im Sommer, die Batterie nicht ausreichend kühlen kann, wird eine aktive Kühlung benötigt. Zur Einbindung der Batteriekühlung in den Kühlkreislauf des Fahrzeugs gibt es verschiedene Varianten. Sie reichen von der Verwendung der Kabinenluft bis hin zu einem eigenen Kühlgerät für die Batterie. Bei flüssiggekühlten

Systemen wird die Batteriekühlung in den Kältemittelkreislauf des Fahrzeugs integriert. Verdampfer, die direkt am Boden, den Seitenwänden oder den Ableitern der Batteriezellen angebracht sind, entziehen den Zellen thermische Energie und kühlen sie dadurch. Ein Kühlmittel, bestehend aus Wasser und Glysantin, das durch die Batterie zirkuliert, kann ebenfalls für die nötige Klimatisierung sorgen. Ein, an den Kältemittelkreislauf des Fahrzeugs angeschlossener, Chiller sorgt dafür, dass die Kühlmitteltemperatur zwischen 15 °C und 30 °C gehalten wird. Die Variante mit Verdampfer direkt an den Zellen weist den geringsten Platzbedarf auf. Der Einsatz eines Chillers hingegen führt zu einem sehr flexiblen System. Wird der Chiller mit einem Niedertemperaturkühler, für den Betrieb im Winter, kombiniert entsteht ein effizientes Batteriekühlsystem [9].

Da Lithium-Ionen-Zellen bereits bei 0 °C fast ein Drittel ihrer Leistung verlieren, ist eine Beheizung im Winter unverzichtbar. Das Heizsystem sollte einerseits die Batterie möglichst schnell auf ihren optimalen Betriebsbereich erwärmen, andererseits die Reichweite nicht unnötig verkürzen. Besonders stromsparend sind Heizelemente, die mit fossilen Brennstoffen betrieben werden. Zulassungsvorschriften stellen nur eine Hürde dieser Technologie dar. Die meisten Fahrzeugbatterien werden durch elektrische Heizungen auf Betriebstemperatur gebracht. Analog zur Batteriekühlung bieten sich auch zum Heizen luftbasierte Systeme an. Elektrische Heizelemente erwärmen die Luft, die anschließend die Zellen umströmt. Ebenso wie Luft kann auch das Kühlmittel zum Erwärmen der Batterie genutzt werden. Erwärmt wird das Kühlmittel von einem Hochvolt-Flüssigkeitsheizer. Thermofolien zwischen den Zellen können diese sehr schnell und effizient erwärmen. Jedoch muss sichergestellt werden, dass sie die Zellen aufgrund fehlerhafter Temperatursensoren nicht überhitzen und beschädigen. Folien, die einen PTC-Effekt aufweisen eignen sich besonders, da mit steigender Temperatur der Strom, und somit die Heizleistung begrenzt wird. Elektrische Heizelemente können auch indirekt zur Zellerwärmung eingesetzt werden. Wärmeleiter, die sich zwischen oder unter Zellen befinden werden dabei durch die Heizelemente erwärmt und geben die aufgenommene Energie dann wieder an die Zellen ab. Direkte Zellbeheizung ist, da sie auf ein weiteres Medium zur Wärmeleitung verzichtet, effizienter als indirekte [9].

Zu den Zusatzfunktionen gehört, die Auswertung der Messdaten, das Berechnen der Betriebsparameter, Kommunikation und die Steuerung des Energieflusses in der Batterie. Um Überladung und Tiefentladung verhindern zu können, berechnet das BMS aus den Sensordaten den Ladezustand. Dieser wird auch als State of Charge (SoC) bezeichnet. Er berechnet sich aus der Nennkapazität (C_N) und der, seit dem letzten Vollladen, entnommenen Ladungsmenge (Q_b) zu 15 [6].

$$SoC = \frac{C_N - Q_b}{C_N} * 100 \% \quad (15)$$

Bei der wissensbasierten Bestimmungsmethode wird, zur Berechnung des SoC, der Batteriestrom über die Zeit auf-

integriert und ins Verhältnis zur Nennkapazität gesetzt. Abschließend wird der Wert mit dem Anfangs-SoC verrechnet (Gleichung 16). Abweichungen bei der Strommessung sind zu vermeiden, da sie das Ergebnis dauerhaft verfälschen [6].

$$SoC(t) = \left(SoC(0) - \frac{1}{C_N} * \int I(t) dt \right) * 100 \% \quad (16)$$

Eine weitere Möglichkeit der SoC Bestimmung bietet die Messung der Leerlaufspannung. Beim Entladen verringert sich die Leerlaufspannung einer Lithium-Ionen-Zelle. Wertetabellen für verschiedene Zelltemperaturen ermöglichen eine exaktere Ermittlung des SoC. Nachteilig ist, dass die Leerlaufspannung nicht im Betriebsfall gemessen werden kann. Geringe Änderungen der Leerlaufspannung, bei $LiFePO_4$ -Batterien und $Li-S$ -Batterien, über weite Strecken des SoC beeinträchtigen die Genauigkeit dieser Messmethode. Diese Messmethode ist somit nicht für alle Batterietypen und Einsatzgebiete geeignet. Bei der Impedanzspektroskopie wird die Impedanz, auch Wechselstromwiderstand, der Batterie für verschiedene Frequenzen gemessen. Aus diesen Werten kann auf den SoC geschlossen werden. Im Gegensatz zur Messung der Leerlaufspannung, kann die Impedanzspektroskopie auch im Betrieb der Batterie durchgeführt werden. Temperaturabhängigkeit und Komplexität begrenzen den Einsatz dieser Methode. Höhere Genauigkeit versprechen modellbasierte Ermittlungsverfahren bei der Bestimmung des SoC. Parallel zur Batterie wird ein Modell betrieben. Die vom Modell vorhergesagten Werte für beispielsweise Leerlaufspannung oder Innenwiderstand werden mit den aktuell an der Batterie gemessenen verglichen. Modellparameter können durch diesen Vergleich angepasst werden und stellen somit stets ein möglichst genaues Abbild der Batterie dar [13].

Der Gesundheitszustand einer Batterie, auch State of Health (SoH) genannt, stellt ein Maß für die verbleibende Leistungsfähigkeit einer Batterie dar. Angeben wird der SoH in Prozent bezogen auf die Eigenschaften einer neuen Zelle [6]. Eine Möglichkeit der SoH-Ermittlung bietet die lineare Schadensakkumulation. In Batterietests wird die Anzahl an Zyklen $N(L_i)$ gemessen, die eine neue Zelle, unter identischen Lastbedingungen L_i , aushält. Das BMS summiert über die gesamte Lebensdauer einer Batterie die Anzahl der Zyklen n_i auf, die eine Zelle unter festgelegten Bedingungen (L_i) bereits hinter sich hat. Anschließend wird nach Gleichung 17 der life-reduction index (LRI) berechnet. Der Quotient aus bereits gefahrenen Zyklen n_i und maximal möglichen Zyklen $N(L_i)$ ergibt den LRI für jede einzelne Belastungsstufe L_i . Summiert man den LRI für alle Belastungsstufen $L_i (i = 1 \dots s)$ auf erhält man den gesamt-LRI. Bei einer neuen Batterie liegt der LRI nahezu bei null. Mit fortschreitender Zellalterung wächst der Index an und erreicht zum Lebensende der Batterie den Wert eins [13]. Es gibt weitere Bestimmungsmethoden, die hier jedoch nicht weiter erläutert werden sollten.

$$SoH = \sum_{i=1}^s \frac{n_i}{N(L_i)} \quad (17)$$

Aus dem SoC, dem SoH und der Zelltemperatur kann der Funktionszustand, State of Function (SoF) ermittelt werden. Er gibt an, ob eine Batterie in der Lage ist gewisse Anforderungen zu erfüllen. Bei einem Elektrofahrzeug kann der SoF aufschluss darüber geben, ob ein gewisses Ziel mit dem vorhandenen SoC erreicht werden kann [6].

Eine weitere Funktion des BMS ist die Aufzeichnung von Betriebsdaten. Dazu gehören Anzahl der Ladezyklen, Verlauf des SoC und SoH und besondere Ereignisse. Ein Betrieb der Batterie in den in Abbildung 3 dargestellten Sicherheitszonen und verbotenen Bereichen könnte als besonderes Ereignis abgespeichert werden. Da Hersteller häufig eine Mindestzyklenzahl garantieren, können die Daten dabei helfen Garantieansprüche zu klären. Zudem können sie dem Hersteller dabei helfen, zukünftige Batterien an die gegebenen Herausforderungen besser anzupassen. Die gesammelten Daten werden auch übergeordneten Systemen zur Verfügung gestellt [6].

Wie bereits zu Beginn in Abschnitt IV erwähnt altern nicht alle Zellen in einer Batterie gleich schnell. Um trotz unterschiedlicher Kapazitäten möglichst alle Zellen voll auszulasten ist Cell-Balancing unerlässlich. Beim Balancing werden Ladungsungleichgewichte ausgeglichen. Es gibt eine Vielzahl verschiedener Balancing-Methoden, die sich in drei Hauptgruppen einteilen lassen [6].

- a Shuntingmethoden
 - Resistives Shunting
 - Analoges Shunting
 - PWM Shunting
 - Boost Shunting
 - Vollständiges Shunting
- b Shuttlingmethoden
 - Geschachtelter Kondensator
 - Geschachtelter Einzelkondensator
- c Konvertermethoden
 - Step-up Konverter
 - Geteilter Transformator
 - Geschachtelter Transformator
 - Vielfachtransformator
 - Resonanzkonverter

Wird der Strom teilweise oder vollständig um einzelne Zellen herumgeleitet, so handelt es sich um eine Shuntingmethode. Speicherelemente entziehen, bei der Shuttlingmethode, voller geladenen Zellen Ladung und geben diese an Zellen mit geringerer Ladung ab. Transformatoren sorgen bei den Konvertermethoden für den nötigen Ladungsausgleich. Einige Konvertermethoden können auch den Shuttlingmethoden zugeordnet werden [6]. Ausführliche Erklärungen zum Funktionsprinzip der gelisteten Methoden finden sich in [6] wieder.

C. Zukünftige Entwicklungen

Da sich wie in Unterabschnitt III-E beschrieben die Batterietechnologie unaufhaltsam weiterentwickelt werden auch an die BMS laufend neue Anforderungen gestellt. Um zukünftig SoC und SoH genauer bestimmen zu können, werden genauere Stromwerte benötigt. Dies kann hardwareseitig durch präzisere

Widerstände oder besser geführte Magnetfelder erreicht werden. Softwareseitig können verbesserte Korrekturalgorithmen und leistungstärkere Mikrocontroller zur Minimierung von Messfehlern beitragen. Da es sich bei der Strommessung um einen sicherheitsrelevanten Systembaustein handelt, muss neben der Genauigkeit, auch die Ausfallsicherheit verbessert werden. Dies kann durch Redundanz und die Kombination verschiedener Messprinzipien erreicht werden [9].

Auch das thermische Management muss an die neuen Anforderungen, bedingt durch veränderte Zellchemie und neue Batterietypen, angepasst werden. Ein verringerter Innenwiderstand und eine erhöhte maximale Zelltemperatur könnten eine Batteriekühlung in Zukunft überflüssig machen. Dieser Vorteil könnte jedoch durch erhöhte Energie- und Leistungsdichten wieder aufgezehrt werden. Auch die Notwendigkeit einer Zellheizung bei zukünftigen Zellen ist ungewiss. Hohe Leistungsanforderungen setzen voraus, dass die Batterie im optimalen Temperaturbereich betrieben wird. Dieser könnte sich jedoch aufgrund der veränderten Zellchemie in niedrigere Bereiche verschieben. Bei der Temperierung muss immer ein Kompromiss zwischen Kosten, Platzbedarf, Gewicht, Sicherheit und Effizienz getroffen werden. Wärmepumpen stellen einen sehr guten Kompromiss dar und eignen sich deshalb bestens für den Einsatz in zukünftigen Batteriesystemen [9].

Auch die Softwareentwicklung für BMS kann noch optimiert werden, um Kosten und Zeitaufwand zu reduzieren. Durch modellbasierte Entwicklung und automatische Codegenerierung kann Software sowohl schneller, als auch übersichtlicher produziert werden. Hersteller und Zulieferer sind kontinuierlich darum bemüht, die Automotive Open System Architecture (AUTOSAR) weiterzuentwickeln und zu verbessern. AUTOSAR bietet die Möglichkeit, plattformabhängige Software zu entwickeln und diese möglichst wiederverwendbar zu gestalten [9].

V. FAZIT

Dieses Paper stellt den Aufbau und die Funktionsweise von Batteriemanagementsystem dar. Um ihre Notwendigkeit zu verdeutlichen, wurden aktuelle Batterietypen vorgestellt und ihre jeweiligen Arbeitsbereiche, sowie technischen Eigenschaften dargestellt.

Zu den gängigen Batterietypen zählen Bleiakkus, Nickel-Batterien, Hochtemperatur-Natrium-Batterien und Lithium-Ionen-Batterien. Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften ist jede Zelle für gewisse Anwendungsfälle besonders geeignet, für andere hingegen ungeeignet. Zelltechnologien, die sich noch in der Erforschung und Entwicklung befinden, wie Lithium-Schwefel- und Lithium-Luft-Zellen, versprechen neue Maßstäbe bei der Energiedichte zu setzen. Jedoch müssen, vor allem bei den Lithium-Luft-Zellen, noch viele Hürden überwunden werden, bis sie andere Zelltechnologien komplett ersetzen.

Gesteuert werden Batterien vom Batteriemanagementsystem. Es schaltet die Relais des Laststromkreises und steuert die Zellmodule, indem es mit den Cell Supervisory Circuit kommuniziert. Verschiedene Typen von Strommessverfahren

und Sicherungen begrenzen den Strom und stellen dem BMS den aktuellen Wert zur Verfügung. Die Grundfunktionen des BMS sorgen dafür, dass jede Zelle stets innerhalb ihres vorgegebenen Betriebsbereichs geladen und entladen wird. Dadurch können Beschädigungen der Zellen verhindert und die Sicherheit erhöht werden. Die Zusatzfunktionen werten die von den verschiedenen Sensoren gemessenen Daten aus. Daraus können Werte wie State of Charge, State of Health und State of Function berechnet werden. Das Zell-Balancing nutzt die Messdaten der Sensoren und sorgt für eine gleichmäßige Verteilung der Ladungen auf die Zellen einer Batterie.

Im Zeitalter der Elektromobilität und Photovoltaikanlagen steigt die Nachfrage nach effizienten, kostengünstigen, leichten und langlebigen Speichermöglichkeiten für elektrische Energie. Um diese Nachfrage zu decken, werden nicht nur neue Zelltechnologien entwickelt, sondern auch Batteriemanagementsysteme. Zwar können Letztere die Energiedichte oder Wirtschaftlichkeit von Batteriezellen nicht verbessern, dennoch erhöhen sie die Lebensdauer und könnten dadurch den Bedarf an neuen Batterien reduzieren.

LITERATUR

- [1] ADAC. *Pro & Contra: Fakten zur Elektromobilität*. 29. Mai 2019. URL: <https://www.adac.de/rundums-fahrzeug/elektromobilitaet/info/elektroauto-pro-und-contra/> (besucht am 20.03.2020).
- [2] AutoScout24. *E-Auto Batterie: Funktion, Kosten, Pflege*. 26. März 2019. URL: <https://www.autoscout24.de/informieren/ratgeber/e-mobilitaet/batterie/> (besucht am 20.03.2020).
- [3] Batterieforum Deutschland. *Lithium-Ionen-Batterien*. 2018. URL: <https://www.batterieforum-deutschland.de/infoportal/lexikon/lithium-ionen-batterien/> (besucht am 15.04.2020).
- [4] Batterieforum Deutschland. *Natrium-Nickelchlorid-Batterie*. 2018. URL: <https://www.batterieforum-deutschland.de/infoportal/lexikon/natrium-nickelchlorid-batterie/> (besucht am 07.04.2020).
- [5] Batterieforum Deutschland. *Nickel-Metallhydrid-Batterien*. 2016. URL: <https://www.batterieforum-deutschland.de/infoportal/lexikon/nickel-metallhydrid-batterien/> (besucht am 07.04.2020).
- [6] Jonathan Brix. „Entwicklung eines verteilten Energiemanagementsystems“. Diss. Universität Stuttgart, 2015.
- [7] Alfred Goldbacher. *Balance-Akt bei Mehrzellen-Akkus*. 7. Juni 2018. URL: <https://www.elektroniknet.de/elektronik/e-mechanik-passive/balance-akt-bei-mehrzellen-akkus-154276.html> (besucht am 20.03.2020).
- [8] Ralf Hickl. *Welche Bauelemente benötigt ein Batteriemanagementsystem?* 5. Dez. 2018. URL: <https://www.next-mobility.news/welche-bauelemente-benoetigt-ein-batteriemanagementsystem-a-781884/> (besucht am 20.03.2020).
- [9] Reiner Korthauer. *Handbuch lithium-ionen-batterien*. Springer, 2013.
- [10] Kraftfahr-Bundesamt. *Jahresbilanz des Fahrzeugbestandes am 1. Januar 2020*. 2020. URL: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/b_jahresbilanz.html;jsessionid=67A57E3300F7F8B161EB38CFE9A9D186.live11292?nn=644526 (besucht am 20.03.2020).
- [11] Peter Kurzweil und Otto K Dietlmeier. *Elektrochemische Speicher : Superkondensatoren, Lithium-Ionen-Batterien, Rechtliche Grundlagen*. Springer, 2015. ISBN: 978-3-658-10899-1.
- [12] Henry Mühlpfordt. *Schema eines Bleiakkus*. 9. Feb. 2009. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Schema_eines_Bleiakkus_2009-02-09.svg?uselang=de-formal#file (besucht am 05.04.2020).
- [13] Gianfranco Pistoia und Boryann Liaw. *Behaviour of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles: Battery Health, Performance, Safety, and Cost*. Springer, 2018. ISBN: 978-3-319-69950-9.
- [14] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. *Kurzinfo Elektromobilität*. 26. Juli 2018. URL: <https://www.bmu.de/themen/luft-laerm-verkehr/verkehr/elektromobilitaet/> (besucht am 20.03.2020).