

# Zusammenspiel zwischen Lademanagement und Batteriealterung

Wie ein gutes LMS die Batterielebensdauer nachhaltig verlängern kann

Philipp Sinhuber, Aachen

**D**as Batteriesystem ist das „Herzstück“ eines jeden Elektrobusses: Es definiert nicht nur die technischen Eigenschaften, sondern beeinflusst auch maßgeblich die Kosten. So ist ein Batteriesystem mit einem Anteil von bis zu einem Drittel der Anschaffungskosten die mit Abstand teuerste Komponente im Elektrobuss. Zudem ist die Lebensdauer

aktueller Lösungen noch begrenzt, so dass Verkehrsunternehmen mindestens einen Batterietausch für die Nutzungsdauer eines Elektrobusses einplanen müssen.

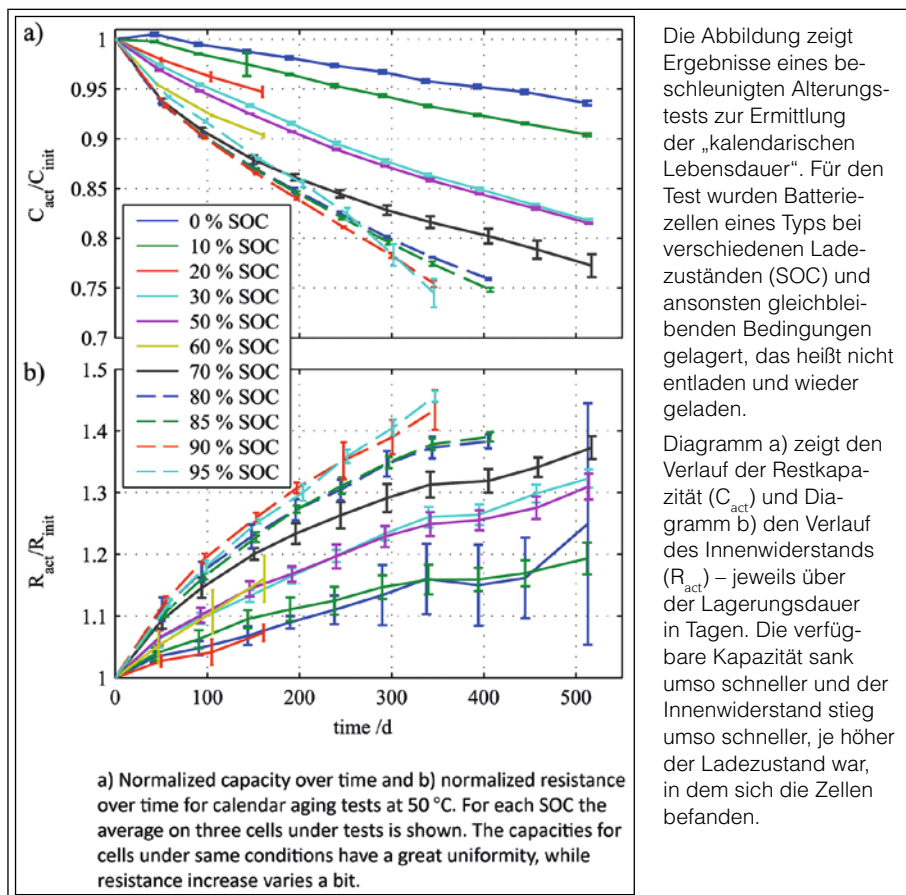
Daher ist es für Verkehrsbetriebe entscheidend, sowohl während der Fahrt als auch während der Ladung stets optimale Bedingungen zu schaffen und Batteriesysteme

so schonend wie möglich zu betreiben. Die Planung und Steuerung der Ladevorgänge obliegt dabei dem Lademanagementsystem (LMS), das die Lebensdauer unter korrekter Berücksichtigung der Batteriespezifika positiv beeinflussen kann. Auch das Zusammenspiel des LMS mit der Fahrzeugdisposition als Teil des Betriebsmanagementes (BMS) ist dabei von großer Bedeutung. So müssen die Ladedauern bei der Zuteilung der Fahrzeuge auf Umläufe und Ladestationen immer mitberücksichtigt werden, um optimale Ergebnisse erzielen zu können.

In dem folgenden Artikel werden zunächst die Alterungsprozesse von Batterien erläutert sowie die Funktionen und Vorteile eines LMS in Bezug auf die Batteriealterung beschrieben.

## Mögliche Ursachen für das Altern von Elektrobuss-Batterien

In so gut wie allen Elektrobussen kommen Lithium-Batterien zum Einsatz. Auf die Alterung der Batterien gibt es verschiedene Einflüsse: Spannungen durch hohe Ladezustände und hohe Temperaturen führen meistens zu schnellerer Alterung als mittlere Spannungen beziehungsweise gemäßigte Temperaturen. Spannung und Temperatur sind physikalische Größen, die den Energieinhalt eines Systems beschreiben. Je höher der Energieinhalt ist, desto schneller laufen die damit im Zusammenhang stehenden, parasitären Reaktionen im System ab. Das kann beispielsweise dazu führen, dass Ladungsträger (Lithium-Ionen) gebunden werden und nicht mehr für die eigentliche elektrochemische Reaktion zur Verfügung stehen. Zudem können Deckschichten auf den Ak-



Die Abbildung zeigt Ergebnisse eines beschleunigten Alterungstests zur Ermittlung der „kalendrischen Lebensdauer“. Für den Test wurden Batteriezellen eines Typs bei verschiedenen Ladezuständen (SOC) und ansonsten gleichbleibenden Bedingungen gelagert, das heißt nicht entladen und wieder geladen.

Diagramm a) zeigt den Verlauf der Restkapazität ( $C_{act}$ ) und Diagramm b) den Verlauf des Innenwiderstands ( $R_{act}$ ) – jeweils über der Lagerungsdauer in Tagen. Die verfügbare Kapazität sank umso schneller und der Innenwiderstand stieg umso schneller, je höher der Ladezustand war, in dem sich die Zellen befanden.

Abb. 1: Ergebnisse eines typischen Alterungstests für Batteriezellen (Zelltyp: Sanyo UR18650E, Kathodenmaterial: NMC, Anodenmaterial: Grafit), durchgeführt am ISEA der RWTH Aachen.

Grafik: [1]

tivmaterialien wachsen. So verlieren die Batteriezellen an Kapazität, während ihr Innenwiderstand steigt – selbst wenn die Batterie gar nicht geladen oder entladen wird. Man spricht hier von „kalendarischer Lebensdauer“, weil die Dauer selbst dann begrenzt ist, wenn die Batterie gar nicht genutzt wird.

Altet die Batterie jedoch durch Laden und Entladen, spricht man von „Zyklusalterung“ oder „Zykluslebensdauer“. Die Ausdehnung der Aktivmaterialien ändert sich während des Ladens und Entladens, was zu mechanischer Beanspruchung und letztendlich zum Verschleiß der Aktivmaterialien führt. Dies ist im Ansatz mit einem Stück Metall vergleichbar, das oft hin und her gebogen wird: Je größer die Beugungen sind, desto schneller ermüdet das Material an der Beugungsstelle. Je nach Tiefe der Zyklisierung – und abhängig von der Zelltechnologie – kann man die Kapazität etwa 800 bis 5000mal entnehmen und wieder nachladen, bis die Batterie ihr Lebensende erreicht. Das wird auch „Vollzyklenäquivalenten“ genannt. Lithium-Titanat (LTO) hingegen, ein Aktivmaterial für die negative Elektrode, weist eine deutlich geringere Volumenarbeit auf als das „klassische“ Anodenmaterial Graphit. Die entsprechenden Zellen können daher zwei- bis fünfmal so viele Vollzyklenäquivalente erreichen.

## Batterialterung beeinflussen

Um die Batterialterung so stark wie möglich zu verlangsamen, kann zunächst versucht werden, die oben genannten Parameter – also Temperatur, Spannung, Ladezustand und Zyklisierung – so gering wie möglich zu halten. Eine „Lagerung im Kühlschranks“ würde demnach die längste Lebensdauer versprechen. Da der Zweck der Batterie jedoch die Aufnahme und anschließende Bereitstellung von Energie für Antrieb und Nebenaggregate ist und der Betrieb stets Vorrang hat, ist eine solche „Lagerung im Kühlschranks“ nicht möglich. Dennoch gibt es Freiheitsgrade, die – insbesondere durch ein geeignetes Lademanagementsystem – dafür genutzt werden können, die Batterien möglichst schonend zu betreiben. Um die kalendarische Alterung zu minimieren, können die Busse beispielsweise so spät wie möglich und auch nur so weit geladen werden, dass sie ausreichend Ladezustand für den Folgeumlauf haben, was nicht zwingend 100 Prozent Ladung erfordert. Somit würden sich die Batterien nur möglichst kurz in hohen Ladezuständen befinden.



## Zum Autor

**Philipp Sinhuber**, einer der Geschäftsführer der EBS ebus solutions GmbH, verantwortet mit seinem Team aus Ingenieuren und Softwareentwicklern Algorithmen zur Energieverbrauchsprognose und zur Ladephasenplanung in der IVU.suite. Diese Algorithmen sorgen dafür, dass Elektrobusse schonend, zuverlässig und kosteneffizient geladen werden. In seiner Zeit an der RWTH Aachen hat er mehr als sechs Jahre im Bereich Batteriesystemtechnik für Elektrobusse geforscht. Seit 2015 berät er mit der ebusplan GmbH Verkehrsbetriebe bei der Umstellung auf Elektrobusse.

Die Ladeleistung hat dabei auch immer einen Einfluss auf die Batterialterung. Ein hoher Ladestrom führt zum Beispiel zu Erwärmung der Batterie. Ist das Kühlsystem nicht passend ausgelegt und kommt es insbesondere zu ungleichmäßiger Temperaturverteilung, altern Teile des Batteriepacks besonders schnell. Hier ist also die Qualität des Batteriepacks und des Kühlsystems entscheidend. Auf dem Markt gibt es unterschiedliche Kühlsysteme sowie unterschiedliche Qualitäten des Batteriesystems.

An den Endstellen wird oft mit hoher Ladeleistung nachgeladen. Die Ladedauern betragen dann circa fünf bis 15 Minuten. Wenn die Qualität des Batteriesystems ausreicht, hat es für solche Ladevorgänge wenig Auswirkung, die Ladeleistung zu drosseln. In diesem Fall sollte die Sicherstellung des Betriebs im Vordergrund stehen. Wenn aber über Nacht auf dem Betriebshof geladen wird, steht oft mehr Zeit und damit auch mehr Flexibilität zur Verfügung und der Ladestrom könnte entsprechend reduziert werden.

Die Zyklisierung der Batterie und damit die Zyklentiefe sollte sich also nach dem Bedarf des Busbetriebs richten. Bei solider Planung und Auslegung des Elektrobus-systems – das heißt die Batteriekapazität ist auf den Worst Case ausgelegt – ist die Zyklisierung im Normalfall ohnehin gemäßigt, da der Worst Case nur selten eintritt. Umläufe kürzer als möglich zu schneiden und damit einen höheren Fahrzeugbedarf oder sonstige betriebliche Ineffizienzen in Kauf zu nehmen, nur um die Zyklisierung der Batterie flacher zu gestalten, macht in der Regel keinen Sinn.

## Anforderungen an ein LMS für Elektrobusse

Ein LMS steuert zunächst einmal die Ladegeräte an – meistens entsprechend des Open Charge Point Protocol (OCPP) – und gibt ihnen Leistungsobergrenzen, inner-

halb derer die Ladegeräte die tatsächlichen Ladevorgänge mit dem Fahrzeug aushandeln und abwickeln. Dabei teilt das LMS die Leistung so zu, dass verschiedene harte und weiche Ziele erreicht werden. Alle Busse rechtzeitig für ihren nächsten Einsatz aufzuladen und keine Komponente oder den Stromnetzanschluss zu überlasten, sind beispielsweise harte Ziele. Ebenso ist das Einhalten eines Sperrzeitfensters, während dessen gar nicht oder nur mit geringer Leistung geladen werden darf, ein hartes Ziel. Ein weiches Ziel ist hingegen die Minimierung der Spitzenleistung zur Reduktion der vom Verkehrsunternehmen zu zahlenden Netzentgelte.

Ein gutes LMS kennt dabei die eingesetzten Fahrzeuge und ihre Batterien sowie die eingesetzte Ladeinfrastruktur. Es kann also die Ladedauern vorhersagen sowie die Ladephasen spezifisch zuschneiden und somit Optimierungspotenziale heben. Ladephasen können knapper angesetzt und Puffer sowie Redundanzen bewusster eingeplant werden – an den Stellen, wo es Sinn macht.

Darauf aufbauend bietet ein gutes LMS Verkehrsunternehmen die Möglichkeit, die Steuerung der Ladephasen spezifisch für den Busbetrieb einzustellen. An dieser Stelle gibt es große Unterschiede von Stadt zu Stadt und Landkreis zu Landkreis. Das eine Verkehrsunternehmen braucht aufgrund der Betriebsabläufe im Depot vielleicht mehr Puffer und Reserven als das andere Verkehrsunternehmen, bei dem die Lastspitzenreduktion eine deutlich wichtigere Rolle spielt. Ein gutes LMS bringt also die verschiedenen Einflüsse zusammen und optimiert die Ladepläne entsprechend den spezifischen lokalen Randbedingungen, die der Nutzer einstellen kann.

Im Sinne der Kosteneffizienz sind die Stromnetzanschlüsse in Betriebshöfen in der Regel nicht für die gleichzeitige Ladung aller Fahrzeuge dimensioniert. Die Ressource Ladeleistung ist daher begrenzt

und muss priorisiert vergeben werden. Zur Maximierung der betrieblichen Stabilität müssen der Ladebedarf und die Abfahrtszeit berücksichtigt werden. Das LMS erhält vom Betriebshofmanagementsystem (BMS) die Abfahrtszeiten der Busse und die jeweils nötigen Mindestladezustände und weiß somit, wie viel Energie nachgeladen werden muss und wie lange das Nachladen dauern würde. Das LMS muss zudem die Busse berücksichtigen, die sich noch auf der Strecke befinden, und dafür vom BMS eine Prognose für den zu erwartenden Ladezustand bei Einfahrt ins Depot erhalten. Außerdem muss das BMS wissen, wieviel Energie der Bus verbraucht und wieviel Energie eventuell an Endstellen („Gelegenheitsladung“) nachgeladen wird. Ein gutes LMS ist also voll in die Systemlandschaft integriert und vor allem anwendungsspezifisch – also für den Busbetrieb zugeschnitten, der sich beispielsweise vom Betrieb einer Autobahnraststätte oder dem eines Parkhauses deutlich unterscheidet.

**Für die Batterien relevante LMS-Funktionalität**

In dem oben beschriebenen Gesamtsystem spielt auch die Batterie eine wichtige Rolle. So muss beispielsweise nicht nur der Fahrgastinnenraum vor der Abfahrt vorkonditioniert werden, sondern zum Teil auch die Batterie selbst. Das wird ebenfalls vom LMS gesteuert und kann vom Disponenten

über das BMS eingeplant werden. Ferner muss das LMS aber auch Leistung für weitere Nebenverbraucher während des Ladens sowie für das „Balancing“ bereitstellen. Dieses Angleichen der Spannungen der verschiedenen Zellen im Batteriesystem ist bei sämtlichen Lithium-Batterien von Zeit zu Zeit nötig, um die Batterie in einem leistungsfähigen Zustand zu halten und unnötige Alterung zu vermeiden. Einige Batterien erfordern hierfür eine Stromversorgung durch das Ladegerät.

Die folgenden Abbildungen 2 und 3 zeigen ein schematisches Beispiel für drei Busse. Der Marker „AN“ stellt die Ankünfte an der jeweiligen Ladestation dar. Der Marker „AB“ symbolisiert hingegen die spätere erneute Betriebshofausfahrt. Die Höhe der farbigen Balken gibt die dem Fahrzeug (vom LMS) zugeteilte Ladeleistung an, während die Breite die Dauer dieser Leistungszuteilung angibt. Die Blöcke symbolisieren eine vereinfachte Form der „chargingSchedule-Period“ nach OCPP und die schwarzen Kurven geben den erwarteten Ladezustandsverlauf an.

Abbildung 2 zeigt den Fall des ungesteuerten Ladens. Alle Busse beginnen mit ihrer Ladung unmittelbar nach der Ankunft an der Ladestation. Dementsprechend ist in dem Zeitbereich, in dem sich der blaue und der grüne Ladeblock überlappen, eine hohe Spitzenleistung zu erwarten. Die Bat-

terien der oberen beiden Busse sind dabei sehr schnell vollgeladen (SOC 100 Prozent) und verweilen lange im vollgeladenen Zustand.

Abbildung 3 zeigt nun den Fall mit intelligenter Ladephasenplanung. Hier wird nicht nur die Gleichzeitigkeit zur Vermeidung von Lastspitzen geringgehalten und die Leistung aufgeteilt, sondern es erfolgt auch eine Priorisierung der Leistungszuteilung auf die Fahrzeuge entsprechend ihrer Abfahrtszeiten und ihres Ladebedarfs. Durch die bessere Nutzung der Standzeiten sind die Ladeleistungen geringer. Dies lässt sich an den flacheren Blöcken und den weniger schnell steigenden Ladezustandsverläufen erkennen. Das verringert die Verluste der Ladeinfrastruktur etwas, da die Verluste mit zunehmender Last überproportional steigen – zum Beispiel in den Transformatoren, Unterverteilungen und Zuleitungen. Es gibt aber auch Auswirkungen auf die Batterien: Beispielsweise bedeutet die Verringerung der Ladeleistung von 120 kW auf 60 kW überschlägig gerechnet eine Halbierung des Ladestroms. Für heutige Batteriepacks, die bei Solobussen in der Regel bei über 300 kWh liegen, ist aber selbst 120 kW eine geringe Ladeleistung. Eine Verringerung würde bei entsprechender Batteriesystemqualität wenig Einfluss haben. Für die Alterung der Batterie hingegen kann der Effekt, dass die Batterien erst deutlich später den Vollladezustand

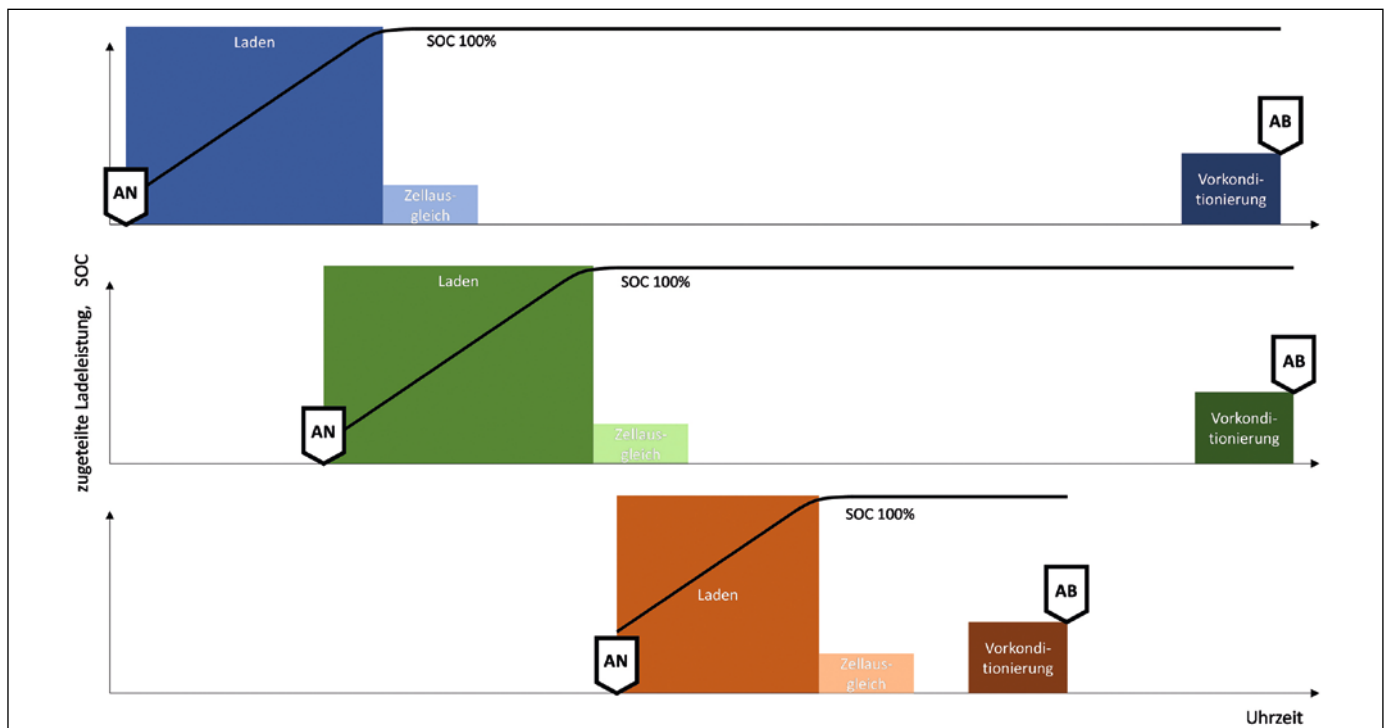


Abb. 2: Ungesteuertes Laden

Grafik: EBS ebus solutions GmbH

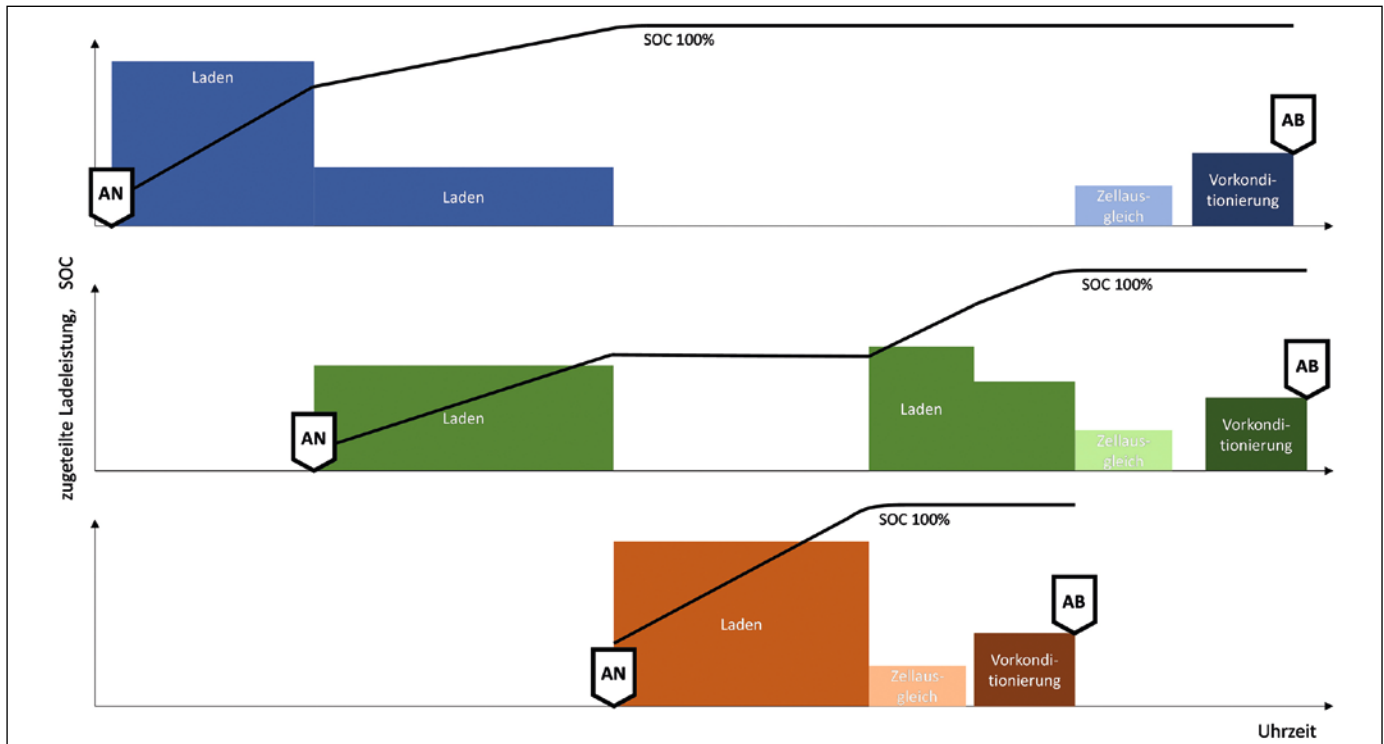


Abb. 3: Laden mit Lastglättung, bei dem auch die Batterien geschont werden

Grafik: EBS ebus solutions GmbH

erreichen und somit kürzer bei hohen Ladeständen verweilen, eine größere Rolle spielen (Abb. 1).

In den Abbildungen 2 und 3 wird vereinfachend angenommen, dass die Busse vollgeladen werden. Um eine weitere Schonung der Batterien zu bewirken, ist es möglich, nur bis zum für den Folgeumlauf mindestens nötigen Ladestand zu laden.

**Ausblick**

Mit dem Wissen um die Ladebedarfe, um das Ladeverhalten sowie mit den Vorgaben des Betriebs hinsichtlich nötiger Puffer und Optimierungsziele kann ein gutes

LMS auch die oben genannten Einflüsse der Batteriealterung berücksichtigen, die Batterien möglichst schonend laden und den Ladefortschritt überwachen.

Kommen weitere Zustandsinformationen des Fahrzeugs wie zum Beispiel die Batterietemperatur hinzu, lassen sich schließlich auch Sicherheits-Features implementieren. Vor dem Hintergrund der aktuellen Branchendiskussion über Ursachen und Vermeidungsstrategien über Bränden bei Elektrobussen könnte das LMS eine weitere Sicherheitsebene darstellen, weil es die Batterietemperatur während des Ladevorgangs überwacht – zusätzlich zu den Sicherheitsmechanismen des Fahrzeugs

und des Batteriemagementsystems. Sofern dem LMS die Batterietemperaturen sämtlicher Fahrzeuge über die Ladeschnittstelle bereitgestellt werden, wäre es sogar denkbar, die Batterietemperatur in die Ladephasenplanung einzubeziehen und frühzeitig Ladeleistung umzuverteilen. Bei entsprechender Integration in das BMS wäre sogar eine Berücksichtigung bei dispositiven Entscheidungen möglich.

**Literatur/Anmerkungen**

[1] J. Schmalstieg et al./Journal of Power Sources 257 (2014), 325–334.

**Zusammenfassung/Summary**

**Zusammenspiel zwischen Lademanagement und Batteriealterung**

Es gibt verschiedene Einflüsse auf das Alterungsverhalten moderner Lithium-Batterien. Das Lademanagementsystem (LMS) steuert das Nachladen der Batterien der Busflotte, indem es Ladepläne für die an den Ladesäulen angeschlossenen Busse erstellt. Dabei hat es – je nach Busbetrieb – verschiedene Freiheitsgrade, die unter anderem auch zum Zweck der Verlängerung der Batterielebensdauer ausgenutzt werden können. Wichtig hierfür ist zum einen, dass das LMS Fahrzeuge, Batterien und Ladestationen kennt und detailliert abbilden kann. Zum anderen ist eine enge Verzahnung und tiefe Integration des LMS in die Betriebsabläufe, in das Betriebsmanagement und in die Fahrzeugdisposition entscheidend. Die mit dem Ladeplanungsmodul EBS.charge ausgestattete IVU.suite ermöglicht all diese Vorgänge integriert innerhalb eines Standardsystems.

**Interplay between charge management and battery ageing**

There are various influences on the aging behavior of modern lithium batteries. The charging management system (CMS) controls the recharging of the bus fleet batteries by creating charging schedules for the buses connected to the charging stations. In doing so, it has various degrees of freedom – depending on operations – which can also be exploited for the purpose of extending the service life of the batteries, among others. To achieve this, it is important that the CMS knows and models vehicles, batteries and charging stations in detail. Also, the CMS needs to be closely interlinked and deeply integrated into the operational processes, depot management and vehicle dispatching. The IVU.suite, equipped with the charge planning module EBS.charge, enables all these processes to be integrated within one standard system solution.