



Schlussbericht vom 10 Dezember 2018

Stromspeichersystem mit Second-Life Akkumulatoren (SL-Speicher)





(SL-Speicher)



Datum: 10 Dezember 2018

Ort: Bern

Subventionsgeberin:

Schweizerische Eidgenossenschaft, handelnd durch das
Bundesamt für Energie BFE
Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprogramm
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger:

Stiftung für Angepasste Technologie und Sozialökologie (Ökozentrum)
Schwengiweg 12
4438 Langenbruck

Post CH AG
Wankdorffallee 4
3030 Bern

W. Schmid Projekte AG (Umweltarna Schweiz)
Rohrstrasse 36
8125 Glattbrugg

Kyburz Switzerland AG
Solarweg
8427 Freienstein

Helion AG
Allmendweg 8
4528 Zuchwil

Batteriewerk Schweiz AG
Gewerbstrasse 3
5037 Muhen

Empa
Überlandstrasse 129
8600 Dübendorf



Autoren:

Michael Sattler, Ökozentrum, michael.sattler@oekozentrum.ch

Brigitt Hausammann, Post CH AG, brigitt.hausammann@post.ch

Marcel Held, Empa, marcel.held@empa.ch

Max Chopard, Umweltarena Schweiz, max.chopard@umweltarena.ch

Andreas Jungo, Helion AG, andreas.jungo@helion.ch

Martin Kyburz, Kyburz Switzerland, martin.kyburz@kyburz-switzerland.ch

Ronny Gerhard, Batteriewerk, r.gerhard@batteriewerk.ch

BFE-Programmleitung: Yasmine Calisesi, yasmine.calisesi@bfe.admin.ch

BFE-Projektbegleitung: Marc Köhli, koehli@enerconom.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/501429-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die AutorInnen dieses Berichts verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch



Zusammenfassung

Aussortierte Akkumulatoren aus den elektrischen Zustellfahrzeugen der Post wurden als Second-Life-(SL)-Akkumulatoren für die stationäre Stromspeicherung eingesetzt. So können Stromspeicher mit bester Ressourceneffizienz und Ökobilanz gebaut werden.

Da die Zellen der SL-Akkumulatoren ein noch nicht prognostizierbares Alterungsverhalten aufweisen, muss das Konzept zur Bewirtschaftung dieser Zellen in einer SL-Anwendung angepasst werden. Für die Realisierung eines Stromspeichers mit SL-Zellen wurde ein Konzept aus angepasster Batteriemangagementsystem-Technologie (BMS-Technologie) mit entsprechender Zellenverschaltung und -paketierung entwickelt und umgesetzt. So ist der sichere Einsatz von Second-Life Akkumulatoren bei Ausnützung der pro Zelle individuell vorhandenen Kapazität in einem stationären Stromspeichersystem möglich.

Im Projekt wurden 5 SL-Stromspeicher gebaut. 4 SL-Speicher wurden während eines Jahres zu Testzwecken betrieben, ein SL-Speicher wurde auf Ausstellungen präsentiert.

Die im Projekt entwickelte Zellenverschaltung mit entsprechender BMS-Technologie hat bezüglich Funktionalität und Effizienz die Erwartungen erfüllt und es ermöglicht, ein intensives Monitoring der SL-Zellen durchzuführen. Die nutzbare Kapazität des SL-Speichers war jedoch unter der Summe der Kapazitäten der einzelnen SL-Zellen. Dies unter anderem auf Grund von noch nicht optimierter Algorithmen zur Bewirtschaftung und ungenügend definierter Zellkapazitäten durch die BMS-Technologie.

Das Zellenmonitoring zeigt, dass die SL-Zellen der Postroller nach einer künstlichen Alterung durch Zyklisierung auch nach 1000 Zyklen noch ca. 80 % der Kapazität, welche zum Einbaupunkt vorhanden war, aufweisen.

Die Erkenntnisse aus dem Projekt helfen mit, bei der Industrialisierung von SL-Speicher die notwendige Überwachungs- und Leistungselektronik auf ein Minimum zu reduzieren und Wartungsintervalle zu definieren. Diese Erfahrungen erhöhen die Wirtschaftlichkeit zukünftiger SL-Speicher.

Take-home messages

- Die Nutzung von gebrauchten Akkumulatoren aus der Mobilität als Second-Life Stromspeicher ist technisch möglich und bietet ein sehr grosses Potenzial an ökologischer Speicherkapazität. Die Realisierung von zuverlässigen SL-Speichern bedeutet in Abhängigkeit vom Zellenzustand einen deutlichen technischen Mehraufwand im Vergleich zu Speichersystemen mit neuen Zellen.
- Wirtschaftlich besteht heute kaum Anreiz, gebrauchte Akkumulatoren als Second-Life Speicher zu nutzen. Dies, weil in der Schweiz Stromspeicher bei den aktuellen Stromtarifen grundsätzlich kaum rentabel sind und der ökologische Mehrwert eines Second-Life Speichers, der technisch aufwändiger und somit teurer zu realisieren ist, kaum verkauft werden kann.
- Die spätere Nutzung als Second-Life Stromspeicher muss bereits bei der Konzeption des Akkus für den Ersteinsatz berücksichtigt werden. Nur so können Second-Life Speicher in Zukunft günstig realisiert werden. Zumindest in grossen öffentlichen Ausschreibungen sollte diese Second-Life-Tauglichkeit verlangt werden.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
Take-home messages	4
Inhaltsverzeichnis	5
Ausgangslage	7
Ziele des Projektes	7
Grundlagen – Randbedingungen	8
Technische Grundlagen	8
Wirtschaftliche Grundlagen	8
Konzept – Anlagenbeschrieb	10
Systemdefinition	10
Batteriemanagementsystem (BMS)	10
Zelluntersuchungen	13
Vorgehen / Methode	13
Aufbau SL-Speicher	13
BMS-Prints	14
Steuerung	15
Wechselrichter	16
Auswahl des Gehäuses.....	16
Aufstellort SL-Speicher.....	16
Ergebnisse	17
Allgemeine Funktionalität	17
Effizienz	17
Speicherkapazität	18
Zelluntersuchungen	20
<i>Zusammenfassung</i>	20
<i>Initialmessungen</i>	21
<i>Laborversuche</i>	22
<i>Betrieb in Energiespeichern</i>	24
Ausbreitungstests	24
<i>Hintergrund</i>	24
<i>Vorgehen</i>	25
<i>Resultate</i>	25
Brandschutz / Handling SL-Zellen.....	26
Wirtschaftlichkeit / Business-Case SL-Speicher	27
Übertragbarkeit auf andere Zellen / Zellchemien	27
Ökobilanz.....	28



Kommunikation	29
Publikationen und Reportagen zum Projekt SL-Speicher.....	29
Ausstellungen und Führungen in der Umweltarena - vom Postroller zum Energiespeicher.....	29
Ausstellungen „Ein zweites Leben für Postrollerbatterien“	30
Ausblick, weitere Schritte	31
Diskussion	32
Schlussfolgerungen	33
Referenzen	33
Anhang A	35
A1 Initialmessung	35
A2 Betrieb in Energiespeichern.....	36
A3 Ausbreitungstest	38
Anhang B	40
Gefahrenanalyse	40



Ausgangslage

Die Speicherung von elektrischem Strom ist eine Schlüsseltechnologie für die Umstellung der Energieversorgung auf erneuerbare Energien. Die Produktionsschwankungen von Photovoltaik- oder Windkraftanlagen müssen in absehbarer Zeit mit Stromspeichern ausgeglichen werden, um eine zuverlässige Stromversorgung aufrecht zu erhalten.

Eine Möglichkeit der Stromspeicherung sind moderne Akkumulatoren die auf Lithium-Ionen-Technologie basieren. Diese Hochleistungsakkumulatoren sind noch relativ teuer und werden daher zurzeit vor allem im Bereich der Elektromobilität eingesetzt.

Die Akkumulatoren in Elektrofahrzeugen müssen eine hohe Speicherkapazität besitzen und dies bei tiefem Gewicht und geringem Platzbedarf. Sobald die Speicherkapazität auf unter 80% der Nennkapazität fällt, werden die Akkumulatoren in Elektrofahrzeugen in der Regel ausgetauscht, da die spezifische Kapazität zu klein wird. Für den Einsatz in einem Elektrofahrzeug ist der Akkumulator dann nicht mehr geeignet. Der Einsatz als stationärer Stromspeicher, wo Gewicht und Grösse des Speichers eine untergeordnete Rolle spielen, ist aber weiterhin möglich. Es kann davon ausgegangen werden, dass die stationäre Verwendung dieser Zellen bei optimalen Bedingungen in der Regel über einen längeren Zeitraum möglich und daher aus ökologischer und auch wirtschaftlicher Perspektive interessant ist.

Der Akkumulator im Elektrofahrzeug ist in der Regel bereits amortisiert, wenn er ausgetauscht werden muss. Die weitere Nutzung ist daher interessant: einerseits kann der Besitzer des Elektroautos den bereits amortisierten Akkumulator noch verkaufen, andererseits erhält der Käufer Akkuzellen für einen Stromspeicher zu einem günstigen Preis.

Neben den wirtschaftlichen Vorteilen einer Nutzung von aussortierten Akkumulatoren verbessert sich auch die Ökobilanz von Akkumulatoren durch diese Zweitnutzung massiv. Bei gleichem Ressourcenaufwand kann die Menge an gespeichertem Strom durch die Second-Life-Anwendung schätzungsweise verdoppelt werden.

Bisher waren in der Schweiz keine nennenswerten Mengen an aussortierten Akkus aus Elektrofahrzeugen verfügbar. Ab ca. 2018 wird die Post AG jedoch jährlich Akkumulatoren aus ihren Zustellfahrzeugen mit einer Speicherkapazität von ca. 2 MWh ersetzen. Wenn diese Zellen weiter genutzt werden könnten, könnten daraus jährlich etliche Grossspeicher oder ca. 200 Standardspeicher für Einfamilienhäuser (Typische Kapazität 10 kWh) gebaut werden. Die in den Zustellfahrzeugen verwendeten Akkuzellen gehören zu den weltweit meistverbauten Akkuzellen. Der im Projekt entwickelte Stromspeicher hat somit das Potenzial auch aussortierte Zellen aus anderen Elektromobilflotten zu verwenden.

Die im Projekt entwickelte Technologie ist nicht auf die Akkumulatoren der Zustellfahrzeuge der Post limitiert, sondern kann prinzipiell mit einer Anpassung der Paketierung und BMS-Parameter für Second-Life (SL) Akkumulatoren aus verschiedensten Bereichen genutzt werden.

Ziele des Projektes

Im Projekt werden 5 Stromspeicher aus aussortierten SL-Akkuzellen aus den elektrischen Zustellfahrzeugen der Post aufgebaut und in der Umwelt Arena in Spreitenbach, der Poststelle



Neuenburg und als Ausstellungsspeicher betrieben. Damit sollen die ökologischen Vorteile für die Elektromobilität und auch für die stationäre Stromspeicherung kommuniziert werden, die durch die weitere Verwendung von aussortierten Akkumulatoren entstehen. Gleichzeitig wird die technische und möglichst wirtschaftliche Umsetzung eines SL-Stromspeichers aus aussortierten SL-Zellen der Zustalfahrzeuge der Post angestrebt. Dabei soll das gewählte System grundsätzlich auch auf andere SL-Zellen übertragbar sein.

Grundlagen – Randbedingungen

Technische Grundlagen

Die Akkumulatoren aus Elektrofahrzeugen werden während dem Einsatz in der Elektromobilität Belastungen durch Leistungsspitzen, Temperaturschwankungen und Erschütterungen ausgesetzt. Dadurch sind die SL-Zellen weniger zuverlässig als neue Zellen und unterliegen einem nicht definierten Alterungsprozess. Daher muss für die weitere Verwendung der Akkuzellen in einem stationären Speicher ein angepasstes Batterie-Management-System (BMS) sowie eine angepasste Verschaltung und Paketierung entwickelt werden (siehe Kapitel „Batteriemanagementsystem“).

Der technische (und daraus resultierende finanzielle) Aufwand für einen zuverlässigen und sicheren SL-Speicher ist wesentlich von den Eigenschaften der eingesetzten SL-Zellen abhängig. Wenn das Alterungsverhalten der einzelnen Zellen sich stark unterscheidet, sind deutlich umfassendere Massnahmen notwendig als wenn die Alterung für alle Zellen gleichmässig verläuft. Mit vertieften Kenntnissen zu den eingesetzten Zellen kann somit das Konzept des SL-Speichers den Zellen angepasst werden, und im Idealfall deutlich einfacher gestaltet werden, als im Projekt umgesetzt. Im Projekt wurde eine Technologie entwickelt, die darauf ausgelegt ist, dass die Zellen stark unterschiedlich altern.

Um diese Unsicherheit bei der Konzeption zukünftiger SL-Speicher auf Basis von aussortierten SL-Zellen der Postroller zu minimieren, werden die Zellen im SL-Speicher Zyklentests unterzogen und es wird ein Monitoring aller Zellen der SL-Speicher durchgeführt. Damit sollen erste grundlegende Antworten bezüglich Zuverlässigkeit und Alterungsverhalten der SL-Zellen getroffen werden.

Die für den Betrieb eines SL-Speichers notwendigen Komponenten wie Wechselrichter, Steuerung und Paketierung/Gehäuse können aus Gründen der Wirtschaftlichkeit nicht neu entwickelt werden. Es muss daher in diesem Bereich auf bestehende technische Lösungen zurückgegriffen werden. Dadurch sind z.B. Spannungsniveaus und Leistungen der verfügbaren Wechselrichter begrenzt. Die auf dem Markt verfügbaren Gehäuse geben die Form vor und verfügbare Steuerungen definieren den Aufwand für die Programmierung und den Stromverbrauch im Betrieb oder Standby-Modus.

Wirtschaftliche Grundlagen

Stromspeicher mit einer Kapazität von ca. 10 kWh sind typisch für einen Einsatz in einem Einfamilienhaus. Diese Stromspeicher sind in den vergangenen 5 Jahren massiv im Preis gesunken. Bei Projektbeginn wurden für Stromspeicher Preise von über 2000 CHF/kWh verlangt. Durch die stark gestiegenen Stückzahlen an produzierten und verkauften Stromspeicher lagen die Preise bei Projektende mindestens 50 % tiefer (Abbildung 1). Diese Preisreduktion wurde einerseits durch eine Preissenkung der neuen Akkuzellen, andererseits aber auch durch eine Optimierung aller anderen Komponenten wie Wechselrichter, Gehäuse, Steuerung, etc. erreicht.



Abbildung 1: Preisentwicklung stationäre Stromspeicher in Deutschland seit 2013 in der Grössenklasse 10-30 kWh

Bei Projektstart bedeutete die Verfügbarkeit von günstigen SL-Zellen einen massiven Preisvorteil gegenüber neuen Stromspeichern. Dies ermöglichte konkurrenzfähige Produkte auch ohne Optimierung der Elektronik und der Gehäuse. Inzwischen ist auch bei einem System mit sehr günstigen Second-Life Zellen die Optimierung aller anderen Komponenten notwendig, um am Markt einen Preisvorteil erzielen zu können.

Akkuzellen, wie sie im vorliegenden Projekt verbaut sind, können inzwischen zu einem Preis von ca. 200-300 CHF/kWh eingekauft werden. In einem SL-Speicher, der aus Zellen mit 100 Ah Nennkapazität und ca. 60 Ah Restkapazität nach 5 Betriebsjahren (Annahmen) aufgebaut ist, werden für eine Speicherkapazität von 1 kWh ca. 5 Zellen benötigt. Unter diesen Annahmen kann in einem preislich konkurrenzfähigen SL-Speicher maximal 40-60 CHF für eine 100 Ah-Zelle inkl. spezial-BMS aufgewendet werden. Diese Vorgabe ist eine grosse Herausforderung für eine Kleinserienproduktion von wenigen hundert SL-Speichern pro Jahr. Diese Vorgabe hat auch dazu geführt, dass im Projekt ein System entwickelt wurde, dass auf eine Vorselektion der Zellen verzichten kann. Dies in der Annahme, dass eine seriöse Vorselektion verhältnismässig teuer ist und nach heutigem Wissenstand dennoch keine sichere Prognose zum Alterungsverhalten liefert.

Auch die übrigen Komponenten wie Gehäuse, Wechselrichter und Steuerung müssen in einem preislich konkurrenzfähigen System optimiert werden. Es müssen für die angestrebte Seriengrösse von 100–200 Stück/Jahr Einkaufspreise ausgehandelt werden, die sich nur wenig von Grossserienpreise (10'000 Stück/Jahr) unterscheiden.

Die günstigen Einkaufspreise für Hersteller von Grossserien können teilweise mit einer intelligenten Komponentenwahl kompensiert werden. Durch den Einkauf von Komponenten, die auch einzeln in Grossserien verkauft werden, kann der Gesamtpreis gesenkt werden. Im Gegenzug erhöht sich aber in der Regel der Aufwand für technische Anpassungen oder Softwareentwicklung, da die Komponenten nicht exakt den gewünschten Anforderungen eines SL-Speichers entsprechen.



Konzept – Anlagenbeschreibung

Systemdefinition

Bei der Konzeptionierung des SL-Speichers hat sich das Projektteam an einem idealen Stromspeicher für Einfamilienhäuser orientiert. Die Leistungsdaten sollten sich nicht wesentlich von einem durchschnittlichen Stromspeicher auf dem Markt unterscheiden. In Tabelle 1 sind die wesentlichen Merkmale des definierten Speichers dargestellt. Dabei ist anzumerken, dass die technologischen Entwicklungen im Bereich Stromspeicher während der Projektdauer rasant fortgeschritten sind. So ist z.B. die Leistung in modernen Stromspeichern gegenüber der Kapazität während der Projektdauer stark gestiegen. Bei Projektbeginn waren Leistungen von ca. 3 kW üblich für Heimspeicher. Aktuell werden bereits Leistungen bis 10 kW angeboten.

Allgemein	
Phasenzahl	Dreiphasig, reiner Sinus
Speicherkapazität	7-10 kWh
Einspeiseleistung	Dauerleistung bei 25°C 3000 W
Betriebsarten	<ul style="list-style-type: none"> • Notstromfunktion • Netzparallelbetrieb • Inselbetrieb mit Generator (PV, WKK, etc.)
Bedienung	Tuchscreen und/oder Mobile App.
Akkumulator	
Zellen	20-40 Stück SL-Zellen (verschiedene Zelltypen möglich)
Akku-Nennspannung	48 V
Ladestrom	0 - 30A
Batteriemanagement	BMS auf SL-Zellen optimiert. Dezentrale Mikrocontroller-Struktur.
Gehäuse/Aufstellraum	
Betriebstemperatur	+5 bis +50°C
Abmessungen B x H x T (cm)	80 x 200 x 80 cm
Gewicht	350 kg (Zerlegbar)
Schutzart	IP24
Feuerschutz	Geprüft für Thermal Runaway einer einzelnen Zelle.
Unterhalt	
Wartungsintervall	36 Monate (Systemkontrolle, gleichzeitig mit Zellentausch)
Zellentauschintervall	36 Monate
Garantie	
Garantie Elektronik und Gehäuse	2 Jahre
Garantie Akkuzellen (Kapazitätsgarantie)	10 Jahre

Tabelle 1: Technische Daten Konzept SL-Speicher bei Projektstart

Batteriemanagementsystem (BMS)

Die zentrale Herausforderung im vorliegenden Projekt ist die Verwendung von SL-Zellen mit unbekanntem Alterungsverlauf. In heutigen Speichersystemen sind die einzelnen Zellen seriell verschaltet

und werden mit einem Balancer vor jedem Zyklus auf den gleichen Ladungszustand gebracht. Diese serielle Verschaltung hat den grossen Vorteil, dass die Zellen sehr günstig und verlustarm direkt mit Kupferleitern verbunden werden können. Der grosse Nachteil dieser Verschaltung ist die Begrenzung der Gesamtkapazität durch die schwächste Zelle. Bei der Verwendung von neuen Zellen sind die Kapazitäten der einzelnen Zellen praktisch identisch und eine Serienschaltung ist klar die beste Wahl für den Aufbau eines Stromspeichers. Bei der Verwendung von SL-Zellen ist die Verwendung einer Serienschaltung in der Regel mit nicht akzeptablen Risiken verbunden. Es ist zu erwarten, dass einzelne Zellen schnell an Kapazität verlieren, wodurch der gesamte SL-Speicher einen massiven Kapazitätsverlust erleidet. Den Autoren des Berichtes ist bis heute keine Möglichkeit bekannt, das Verhalten der SL-Zellen über einen für einen SL-Speicher relevanten Zeitraum von mehreren Jahren zu prognostizieren.

Die Systemarchitektur eines SL-Speichers unterscheidet sich daher in der Regel deutlich von einem aus neuen Zellen aufgebauten Stromspeicher. Für die Systemarchitektur muss berücksichtigt werden, dass diese SL-Zellen in sehr kurzer Zeit von voll funktionstüchtig zu völlig unbrauchbar degradieren können. Es muss damit gerechnet werden, dass die Zellen ihre Speicherkapazität komplett verlieren, einen Kurzschluss verursachen oder ihren Innenwiderstand stark erhöhen bis zum Unterbruch der Leitfähigkeit. Die im Projekt realisierte Zellenverschaltung ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt.

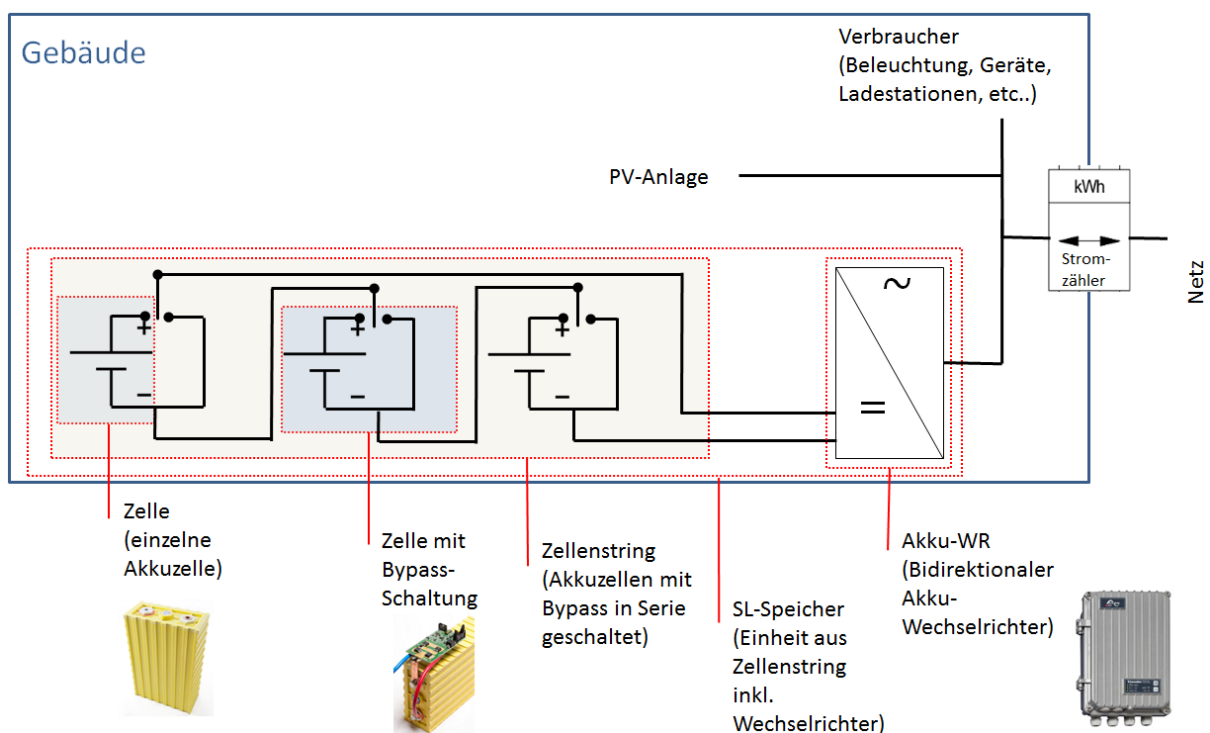


Abbildung 2: Vereinfachte schematische Darstellung der Zellenverschaltung im SL-Speicher inkl. Beschriftung der einzelnen Komponenten.

Die gewählte Systemarchitektur erlaubt ein möglichst individuelles Bewirtschaften der einzelnen Zellen. Dadurch ist die Funktionalität des Systems auch dann noch gegeben, wenn einer der genannten Zellendefekte (Degradation, Kurzschluss, Unterbruch) auftritt, vorausgesetzt es entsteht beim Zelldefekt kein Brand mit Folgeschäden an den elektrischen Komponenten.



Für die Realisation dieser Einzelzellenüberwachung und Einzelbewirtschaftung werden die Zellen mit einer Schaltung bestückt, die es erlaubt einzelne Zellen zu überbrücken. So können Zellen im System zu- und weggeschaltet werden. Weiter ermöglicht die Einzelzellenüberwachung die Bestimmung des Ladezustandes jeder Zelle.

Die Schaltfunktion ist in Kombination mit einer intelligenten Steuerung gleichzeitig das BMS.

- Ladung: Eine Zelle wird bis zum Erreichen der Ladeschlussspannung in den String eingekoppelt (zugeschaltet). Beim Erreichen der Ladeschlussspannung wird die Zelle überbrückt.
- Entladung: Eine Zelle wird bis zum Erreichen der Entladeschlussspannung in den String eingekoppelt (zugeschaltet). Beim Erreichen der Entladeschlussspannung wird die Zelle überbrückt.

Dieses System erlaubt es, die Spannung des Zellenstrings durch Zu- und Wegschalten von Zellen zu verändern und innerhalb gewisser Grenzen an den Wechselrichter anzupassen. Auch können deutlich mehr Zellen in Serie geschaltet werden, als die Spannungsbegrenzung des Akku-WR dies zulassen würde. Dadurch können „Reservezellen“ bereits bei der Installation eingebaut werden. Dadurch erhöht sich die Verfügbarkeit des SL-Speichers, da auch beim Ausfall von mehreren Zellen die für den Wechselrichter notwendige Spannung durch Zuschalten der Reservezellen noch gehalten werden kann. Die maximal einsetzbare Anzahl von „Reservezellen“ ist jedoch begrenzt. So erhöht jede Schaltung einer Zelle den Verlust, da auch bei den nicht aktiven Zellen der gesamte Strom über die Schaltung fließen muss.

Im laufenden Betrieb und ohne Eingriff von aussen können bis zu 30% der eingesetzten Zellen ausfallen, ohne dass der Speicher in seiner Leistung eingeschränkt ist. Zusätzlich erlaubt die Einzelbewirtschaftung der Zellen die Speicherkapazität jeder einzelnen Zelle im Verlauf der Lebensdauer maximal (bis zum Zelldefekt) zu nutzen. Um auch die Kapazität des SL-Speichers zu optimieren, werden die einzelnen Zellen nach folgenden Regeln bewirtschaftet:

- Ladung: Zellen, die bis zum Erreichen der Ladeschlussspannung noch viel Strom aufnehmen können, werden zuerst geladen.
- Entladung: Zellen, die bis zum Erreichen der Entladeschlussspannung viel Strom abgeben können, werden zuerst entladen.

Diese einfache Regel wird im Lade- oder Entladebetrieb alle 2 Minuten überprüft. Entsprechend werden in Abhängigkeit der noch verfügbaren Lade- oder Entladekapazität Zellen dem System zu- oder weggeschaltet.

Diese innovative Kombination aus BMS-Technologie und entsprechender Zellenverschaltung erlaubt den sicheren Einsatz und die vollständige Nutzung der Restkapazität von verschiedenen SL- Zellen mit schlecht prognostizierbarer Lebensdauer in Stromspeichersystemen.

Da die eingesetzten Wechselrichter eine minimale Betriebsspannung benötigen, müssen im vorliegenden System immer mindestens 13 Zellen aktiv sein. Falls die Zellen eine sehr ungleiche Verteilung der Kapazität aufweisen, können einzelne Zellen mit grosser Kapazität theoretisch nicht vollständig geladen oder entladen werden, was die Gesamtkapazität des SL-Speichers reduziert.

Durch die gewählte Verschaltung werden die notwendigen Wartungsintervalle im Vergleich mit einer seriellen Verschaltung ohne Einzelbewirtschaftung massiv verlängert und das technische Risiko durch



den Einsatz von SL-Zellen wird reduziert, wodurch ein wirtschaftlicher Betrieb des Systems möglich wird.

Die Neuentwicklung kann durch entsprechende Parametrierung (Spannungsgrenzen) auch an andere SL-Zellen angepasst werden.

Zelluntersuchungen

Das beschriebene BMS ist nur notwendig, wenn die Zellen tatsächlich stark divergieren in der Alterung über mehrere Jahre. Um zu prüfen ob dies tatsächlich der Fall ist wurden Zellenuntersuchungen und ein Langzeit-Monitoring durchgeführt. Diese Untersuchungen liefern wertvolle Daten zum Alterungsprozess der untersuchten Akkuzellen. Diese Erkenntnisse können für die weitere Optimierung von SL-Speicher im Bereich Zellenverschaltung, Ladealgorithmen und Wartungsintervalle genutzt werden.

Vorgehen / Methode

Aufbau SL-Speicher

Basierend auf dem beschriebenen Konzept wurden die notwendigen Komponenten evaluiert und/oder entwickelt und der SL-Speicher wie in Abbildung 3 dargestellt aufgebaut. Im oberen Bereich des SL-Speichers sind die Akkuzellen mit BMS-Prints angeordnet, im unteren Bereich sind Wechselrichter, Sicherheitstechnik und Steuerung untergebracht.



Abbildung 3: SL-Speicher mit Akkuzellen im oberen DC-Bereich und Wechselrichter und Steuerungen im unteren AC-Bereich

Nachfolgende sind die wichtigsten Komponenten und ihre Eigenschaften aufgeführt.



BMS-Prints

Die BMS-Prints (Zellenprints) wie in Abbildung 4 dargestellt wurden komplett neu entwickelt und beinhalten folgende Funktionen:

- Kommunikationseinheit, Spannungsmessung, Temperaturmessung (Zelle, Halbleiter)
- Sicherheitsschaltung auf jedem Print (Hardware/Software security layer)
- Der Zellprint (Halbleiter-Schalter) kann jede Zelle dem String zu- und weggeschalten und den String unterbrechen

Die Evaluation der Schaltechnik war bei der Entwicklung des BMS-Prints ein zentrales Element. Zur Auswahl standen Relais sowie MOSFETs. Relais bieten ein hohes Schaltvermögen, galvanische Trennung und eine einfache Ansteuerung. Sie sind aber 30 – 50 Mal teurer als z.B. MOSFETs. Der hohe Preis in Verbindung mit weiteren Nachteilen wie hohe Ansteuerungsleistung, hoher Kontaktwiderstand und relativ lange Spannungsunterbrüche beim Schaltvorgang haben den Entschied zugunsten von MOSFETs unterstützt.

Weitere Varianten mit Halbleiterrelais, Thyristoren oder IGBTs haben wir grundsätzlich verworfen, da diese zwar für hohe Ströme verfügbar, aber vor allem für höhere Spannungen ausgelegt sind. Diese sind sehr teuer und erzeugen bei dieser Anwendung, gegeben durch eine relativ hohe Sättigungsspannung, entsprechend grosse Verluste.

Wir haben uns für die Variante mit MOSFETs entschieden, da die Kosten und die Verlustleistung einer Lösung mit Relais oder anderen Schaltern zu hoch und für eine Serienproduktion im vorgegebenen Kostenrahmen nicht tragbar wären.

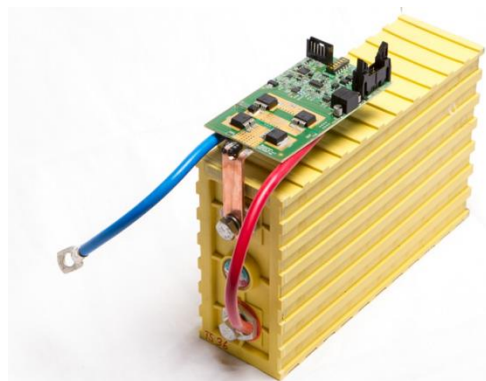


Abbildung 4: BMS-Print (Zellenprint) montiert auf einer Lithium-Eisenphosphat SL-Akkuzelle mit 100 Ah



Steuerung

Als Gesamtsteuerung wurde ein System von B&R Industrie-Automation AG verwendet. Dieses System wird in vielen Anwendungen am Ökozentrum verwendet und ermöglichte daher die rasche Umsetzung des Vorhabens inkl. Fernüberwachung und Visualisierung. Die gewählte Steuerung ist jedoch klar zu teuer für den Einsatz in der Serienfertigung von SL-Speichern.

Die Benutzeroberfläche zur Bedienung des SL-Speichers wurde über ein Tablett mit Android-Betriebssystem realisiert. Abbildung 5 zeigt einen Screenshot des Displays in dem die Zustände der Zellen dargestellt sind.

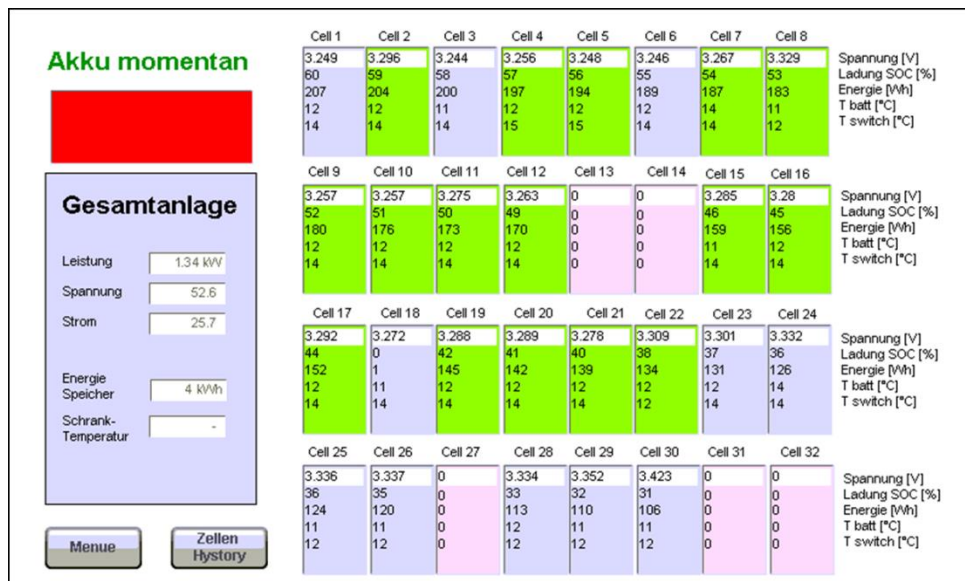


Abbildung 5: Screenshot des Displays des SL-Speichers. Auf der linken Seite sind allgemeine Betriebsdaten dargestellt. Zentral die Betriebswerte der 27 eingesetzten SL-Zellen. Grün hinterlegte Zellen sind im System zum Zeitpunkt des Screenshots aktiv, blau hinterlegte Zellen sind überbrückt. Freie Zellenplätze sind rosa hinterlegt.

Die Zellen werden mit einem Algorithmus automatisch angesteuert, dessen Konzept im Kapitel „Batteriemangementsystem“ erklärt ist. Gemäss diesem Konzept findet alle 2 Minuten eine Zustandserfassung jeder einzelnen Zelle statt. Dabei wird die Spannung gemessen und der aktuelle Energieinhalt berechnet. Anschliessend definiert der Algorithmus, welche Zellen im System aktiv sein müssen, und welche durch den BMS-Print überbrückt werden. Dabei werden die optimale Spannung für den Wechselrichter (50 V) und der Energieinhalt der einzelnen Zellen berücksichtigt. Für den Entladebetrieb werden jeweils diejenigen Zellen mit dem zum Zeitpunkt der Zustandserfassung grössten Energieinhalt aktiviert, bis die Systemspannung 48 V beträgt. Für den Ladebetrieb werden jeweils diejenigen Zellen aktiviert, die gemäss Berechnungen noch über die grösste Kapazität zum einspeichern von Energie verfügen. Nach Abschluss der Zustandserfassung und Definition der zu aktivierenden Zellen finden die Umschaltungen statt. Diese erfolgen innerhalb weniger Millisekunden und beeinflussen die Funktion des Wechselrichters nicht. Zellen können unter voller Systemleistung aktiviert und überbrückt werden. Da diese Überprüfung und anschliessende Umschaltung alle 2 Minuten stattfindet, ändert sich der in Abbildung 5 dargestellt Screenshot alle 2 Minuten. Aktive (grün hinterlegte) Zellen werden überbrückt (dann blau hinterlegt) und umgekehrt.



In der Regel sind ca. 16 Zellen aktiv. Wenn der Speicher entladen wird, sind kurz vor Entladeschluss nur noch 13 Zellen aktiv (minimale Anzahl, um den Wechselrichter zu versorgen). Vor Ladeschluss sind ebenfalls nur noch 13 Zellen aktiv (minimale Spannung, die vom Wechselrichter für den Ladebetrieb zur Verfügung gestellt werden kann).

Um das System zu optimieren muss der Wechselrichter einen möglichst grossen Spannungsbereich für den Lade- und Entladebetrieb aufweisen und die Steuerung muss den Zustand der Zellen regelmässig und möglichst präzise berechnen.

Wechselrichter

Als Wechselrichter wurde das Modell Xtender 1400 der Firma Studer gewählt. Diese Wechselrichter sind äusserst zuverlässig und der Firmensitz in der Schweiz ermöglichte einen schnellen Support zur Lösung von Problemen in der Kommunikation zwischen Wechselrichter und übergeordneter Steuerung. Im SL-Speicher wird der Wechselrichter permanent angesteuert, um den Betrieb des SL-Systems zu ermöglichen.

Bereits bei der Auswahl der Nennspannung des SL-Speichers wurde die Verfügbarkeit von Akku-Wechselrichter beachtet. Da viele Systeme mit einer Nennspannung von 48 V arbeiten, wurde diese Spannung als Nennspannung für die Systemauslegung verwendet. Im SL-Speicher wurde eine dreiphasige AC-Anbindung realisiert. Dies wäre nach den neuesten Vorgaben der Energieversorger nicht mehr zwingend.

Für eine Serienproduktion müssen auch die Wechselrichter als Kostenfaktor optimiert werden.

Auswahl des Gehäuses

Das Gehäuse wurde absichtlich gross gewählt, um den Einbau der Komponenten und allenfalls nachträgliche Änderungen einfach vornehmen zu können. Ein staubdichter Metallschrank war der ideale Kompromiss aus Preis, Sicherheit und Wartungsfreundlichkeit.

Aufstellort SL-Speicher

Die SL-Speicher wurden in der Umweltarena Schweiz in Spreitenbach und in der Poststelle „Espace 2“ in Neuenburg installiert.

In der Umweltarena wurde ein SL-Speicher mit einer nutzbaren Kapazität von 5.1 kWh installiert. Der Speicher wurde dabei tagsüber über 2 Solarblumen (2 x 2.3 kWp, Nachführsystem) geladen und in der Nacht wurde ein künstlicher Zyklus gefahren. Begleitet wird die Installation mit einer Ausstellung zum ganzen Kreislauf – vom Postroller, über die Produktion von Solarstrom bis zum Stromspeicher als Bestandteil der Gebäudetechnik.

In der Poststelle in Neuenburg wurden 3 SL-Speicher mit einer nutzbaren Kapazität von 18.3 kWh installiert. Die SL-Speicher wurden von der Photovoltaikanlage (PVA) auf dem Dach des Gebäudes geladen. Die Leistung der PVA beträgt ca. 55 kWp.

Beide Standorte wurden so bewirtschaftet, dass der Eigenverbrauch maximiert wurde. Sobald die PVA mehr Strom lieferte als die daran angeschlossenen Verbraucher, wurde der Speicher geladen. Sobald Strom vom Netz bezogen wurde, wurde der Speicher entladen.



Ergebnisse

Allgemeine Funktionalität

Die entwickelten SL-Speicher haben grundsätzlich sehr gut funktioniert. Bei den entwickelten Prints waren keine Ausfälle zu verzeichnen. Betriebsunterbrüche konnten fast immer kurzfristigen lokalen Über- oder Unterspannungen der Akkuzellen zugeordnet werden. Da die Programmierung aus Sicherheitsgründen bei Demonstrationsanlagen ein automatisches Wiederanfahren verhinderte, verlangte jeder kleine Fehler einen manuellen Neustart. Im Durchschnitt war alle 2 Monate ein Betriebsunterbruch pro Speicher zu verzeichnen. Ein Bauteil eines Steuerungssprints (Spannungswandler) musste ersetzt werden, eine Speicherkarte fiel aus und nach Abschluss der Messungen erfolgte ein Ausfall eines Wechselrichters.

Das gewählte Konzept aus Zellüberbrückung und BMS hat sich bezüglich der Funktionalität bewährt. In 3 von 4 SL-Speichern ist mindestens eine Zelle komplett ausgefallen oder die Kapazität einer Zelle hat sich auf weniger als 10 Ah reduziert. Bei einer seriellen Verschaltung hätte dies einen totalen Ausfall des Speichers (im Falle des Zelldefekts) oder eine Reduktion der Speicherkapazität auf ca. 0.5 kWh (im Falle der Kapazitätsreduktion) bedeutet. Durch das gewählte Konzept blieben die SL-Speicher voll funktionsfähig.

Im Verlauf der Projektdauer haben die 4 installierten SL-Speicher total 4.1 MWh Strom den entsprechenden Gebäuden zur Verfügung gestellt. Dabei wurden total 4800 Lade- oder Entladevorgänge registriert. Da die Bewirtschaftung der Speicher über den Gesamtenergiebedarf des Gebäudes und die PV-Leistung gesteuert wurde, gab es viele kurzzeitige Lade- und Entladevorgänge.

Die Anzahl der Zyklen eines Stromspeichers ist vom Betriebsregime abhängig. Dieses wiederum wird in vielen Fällen vom Gebäudeenergiebedarf und von der installierten Generatorleistung der Photovoltaikanlage beeinflusst. Auswertungen der Firma Helion zeigen, dass bei einer auf Wirtschaftlichkeit optimierten Speicherauslegung jährlich ca. 220 Vollzyklen gefahren werden. Bei einer durchschnittlichen Betriebsdauer von 413 Tagen und einer durchschnittlichen Kapazität von 4.2 kWh der im Projekt installierten SL-Speicher ergeben sich 216 Zyklen/Jahr. Diese Zahl ist sehr nahe beim von Helion beobachteten Durchschnittswert.

Effizienz

Die Effizienz der SL-Speicher wurde an einem System untersucht, welches unabhängig vom Energiefluss im Gebäude betrieben wurde. Dazu wurden 8 vollständigen Lade- und Entladevorgänge bei einer Systemleistung von ca. 1.5 kW durchgeführt (Tabelle 2). Dabei wurde eine Zykleneffizienz des Gesamtsystems von 71 % erreicht. Gemessen wurden dabei der Strombezug und die Stromeinspeisung AC-Seitig ausserhalb des SL-Speichers. Wird nur die von den Wechselrichtern gemessene Energie betrachtet (ohne Steuerung, Netzüberwachung, etc.) ergibt sich eine Zykleneffizienz von 79 %. Die Effizienz des Zellenstrings inkl. BMS-Prints liegt in diesem Versuch bei 93 %. Diese Werte sind nach Einschätzung des Projektteams nur leicht unter den Werten von Systemen mit neuen Zellen. In der herstellerunabhängigen Studie *Wissenschaftliches Mess- und Evaluierungsprogramm Solarstromspeicher 2.0* [1] wurden Effizienzwerte für den Zellenstring zwischen 85 – 96 % gemessen. Grundsätzlich sind Vergleiche von Effizienzangaben jedoch mit Vorsicht zu geniessen, da im realen Betrieb die Effizienz basierend auf den Betriebszuständen abweichen kann – dies insbesondere bei den Kennwerten, die die Wechselrichter und Steuerung mit einschliessen. So hat z. B. ein Stromspeicher der im Winter auf Grund von Schnee auf der PV-Anlage nicht in Betrieb ist, in dieser Zeit eine extrem schlechte Effizienz weil dennoch Strom für die Steuerung benötigt wird. Speziell im Bereich



des Energieverbrauchs der Steuerung war der im Projekt entwickelte SL-Speicher nicht auf eine möglichst hohe Effizienz optimiert. So besteht z.B. grundsätzlich die Möglichkeit, bei tiefen Leistungen einzelne Wechselrichter komplett abzuschalten – diese Möglichkeit zur Effizienzsteigerung wurde nicht genutzt.

Zyklus	Zyklusdauer	Ladeenergie extern	Entladeenergie extern	Leistung Wechselrichter pro Zyklus	Ladeenergie Wechselrichter	Entladeenergie Wechselrichter	Ladeenergie Zellenstring	Entladeenergie Zellenstring
[Nr.]	[h]	[kWh]	[kWh]	[kW]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]
D1	1.96	0.00	-2.90	-1.57		-3.08	0.00	-3.26
C1	2.35	4.20	0.00	1.72	4.04		3.61	0.00
D2	2.66	0.00	-3.00	-1.25		-3.31	0.00	-3.49
C2	2.39	4.20	0.00	1.67	3.99		3.59	0.00
D3	2.23	0.00	-3.00	-1.44		-3.20	0.00	-3.38
C3	3.04	4.40	0.00	1.39	4.22		3.78	0.00
D4	2.95	0.00	-3.30	-1.18		-3.47	0.00	-3.67
C4	2.78	4.60	0.00	1.56	4.34		3.92	0.00
D5	2.13	0.00	-3.10	-1.55		-3.30	0.00	-3.50
C5	2.48	4.30	0.00	1.65	4.09		3.69	0.00
D6	2.66	0.00	-3.10	-1.25		-3.33	0.00	-3.52
C6	2.75	4.50	0.00	1.57	4.31		3.91	0.00
D7	2.14	0.00	-3.20	-1.56		-3.33	0.00	-3.55
C7	2.65	4.50	0.00	1.62	4.28		3.85	0.00
D8	2.93	0.00	-3.30	-1.20		-3.51	0.00	-3.71
C8	2.47	4.40	0.00	1.67	4.13		3.71	0.00
Summe	40.55192	35.1	-24.9		33.39785275	-26.53820259	30.061	-28.068
Effizienz			0.71			0.79		0.93

Tabelle 2: Effizienz des SL-Speichers gemessen AC-Seitig ausserhalb des Speichers inkl. aller Verluste für Steuerung und Umwandlung, gemessen am Wechselrichter und gemessen nur am Zellenstring.

Speicherkapazität

Die verfügbare Speicherkapazität der SL-Speicher lag deutlich unter den Erwartungen (Tabelle 3). Total wurden SL-Zellen mit einer nominalen Kapazität (gemäss Datenblatt) von 42.4 kWh installiert. Diese Kapazität reduziert sich auf Grund des Zustandes der SL-Zellen beim Einbau ins System auf 35.5 kWh und reduzierte sich auf Grund der Zellenalterung innerhalb eines Betriebsjahres auf 29.1 kWh. Die theoretisch zur Verfügung stehende Speicherkapazität wurde durch den noch nicht optimierten Algorithmus zur Bewirtschaftung der SL-Zellen weiter reduziert. Auf Grund von Messungenauigkeiten wurden nicht alle Zellen optimal bewirtschaftet und das Ladeverfahren ist im Vergleich zu den Labormessungen weniger optimiert. Dadurch wurde die Speicherkapazität aller Systeme auf 21.5 kWh bei Projektstart und 16.8 kWh bei Projektende reduziert.



Speicherkapazitäten		Umweltarena	Neuenburg 1	Neuenburg 2	Neuenburg 3
Nennkapazität der Zellen (gemäss Datenblatt)	[kWh]	10.5	10.6	11.4	10.0
Kapazität bei Einbau (gemäss Kapazitätsmessung Zellen)	[kWh]	8.9	8.6	9.6	8.3
Kapazität im Betrieb (nach Inbetriebnahme)	[kWh]	5.1	5.7	6.8	5.8
Kapazität nach 1 Betriebsjahr (gemäss Kapazitätsmessung Zellen)	[kWh]	7.4	6.5	8.3	6.9
Kapazität im Betrieb (nach 1 Betriebsjahr)	[kWh]	3.8	3.8	5.1	4.1
Nicht nutzbare Kapazität nach Inbetriebnahme	[kWh]	3.8	2.9	2.8	2.5
Nicht nutzbare Kapazität nach 1 Betriebsjahr	[kWh]	3.6	2.7	3.2	2.8

Tabelle 3: Stromspeicherkapazität der 4 in einem Gebäude verbauten SL-Speicher im Verlauf eines Betriebsjahres. Die Effektive Speicherkapazität wurde mit den Kapazitätsmessungen der einzelnen Zellen verglichen.

Die unerwartet hohe Reduktion der Speicherkapazität kann keinem einzelnen Problem zugeordnet werden.

Verschiedene Faktoren führen dazu, dass die vom System berechnete Kapazität pro Zelle ungenau ist. Wird eine Zelle in ihrer im Betrieb verfügbaren Kapazität nicht korrekt eingeschätzt, kann der Algorithmus nicht die notwendige Selektion der Zellen mit der grössten verfügbaren Kapazität vornehmen, was zur unvollständigen Nutzung der vorhandenen Speicherkapazität führt. Folgende Punkte können zu Ungenauigkeiten in der Bestimmung von Zellkapazitäten führen:

- Um eine Kapazitätsbestimmung im Betrieb durchzuführen, muss die einzelne Zelle bis zur Ladeschlussspannung geladen und anschliessend bis zur Entladeschlussspannung entladen werden. Da dieser Vorgang aber auf Grund der Verschaltung nicht für eine einzelne Zelle erfolgen kann (Spannungsuntergrenze des Wechselrichters), muss der Algorithmus diese Zellenprüfung im laufenden Betrieb initiieren. Die aktuelle Programmierung sieht vor, dass jede Zelle ca. 1 Mal pro Monat geprüft wird. Da aber einzelne Zellen einen sehr starken Kapazitätsverlust erfahren haben und selbst innerhalb eines Monats um über 10% ihrer Kapazität verlieren, könnte dieses Prüfintervall zu lange sein um die notwendige Präzision bei der berechneten Kapazität einer Zelle einzuhalten.
- Ein weiterer Punkt ist die Strommessung per Shunt. Im eingesetzten Bereich von 0-100 A ist speziell bei kleineren Strömen eine Messungenauigkeit zu erwarten, die sich negativ auf die Berechnung der Zellenkapazität auswirkt. Auch diese Messungenauigkeit kann daher die Kapazität des Gesamtsystems reduzieren.

Weiter sind durch die beschriebenen Massnahmen zur Bestimmung der Zellkapazität immer 2 Zellen im „Prüfmodus“ und stehen dem System nicht zur Verfügung.



Auch wendet die Zellprüfung im Labor ein CCCV-Verfahren an (konstanter Strom bis zur Ladeschlussspannung, danach konstante Spannung bei sinkendem Strom). Im SL-Speicher findet keine Phase mit konstanter Spannung und sinkendem Strom statt. Dadurch wird die Kapazität der Zellen im Labor 10-20 % höher gemessen als im realen Betrieb verfügbar ist.

In der Summe können die genannten Punkte die unerwartet hohe Reduktion der Speicherkapazität erklären. Alle beschriebenen Punkte können durch eine Verbesserung des Algorithmus und der Strommessung in Richtung höherer Speicherkapazität optimiert werden. Die Effektivität der Massnahmen ist aber auch von der Betriebsweise abhängig und muss für die Serienfertigung erneut kritisch überprüft werden.

Ein Grossteil der geschilderten Probleme in Bezug auf eine zu tiefe Kapazität der SL-Speicher ist mit Zellen verbunden, die eingebaut wurden, um das System in seiner Flexibilität zu testen. Diese Zellen hatten eine grössere Kapazität (200 Ah gegenüber 100 Ah) und wiesen eine deutlich schnellere Alterung in Form von Kapazitätsverlust auf. Es zeigt sich nun, dass das gewählte BMS den Speicher trotz dieser ungleichen Zellen funktionstüchtig hält. Gleichzeitig wird aber die Kapazität der SL-Speicher nicht optimal genutzt.

Zelluntersuchungen

Zusammenfassung

Die Initialmessungen haben gezeigt, dass die Zellen nach 5-8 Jahren im Fahrzeugbetrieb im Durchschnitt noch mehr als 80% der nominalen Kapazität aufweisen. Die Angabe der nominalen Kapazität ist bei einigen Zelltypen jedoch zu hinterfragen. Es wurde nur eine schwache Korrelation von gefahrenen Kilometern bzw. Einsatzdauer und dem Kapazitätsverlust festgestellt. Bei vergleichbarer Fahrleistung und Alter weisen Zellen aus Postfahrzeugen aber einen höheren Kapazitätsverlust auf als Zellen aus Privatfahrzeugen.

Der Betrieb der Zellen in vier Energiespeichern in der Umweltarena und im Postgebäude in Neuenburg während mehr als einem Jahr hat gezeigt, dass stabile und instabile Zellen gibt. Die stabilen Zellen wiesen einen Kapazitätsverlust von 10 bis 15% auf, die instabilen verloren hingegen 30 bis 50% oder fielen komplett aus. Für stabile Zellen kann somit mit einem Kapazitätsverlust von 0.5 bis 1.5% pro Monat gerechnet werden. Der Kapazitätsverlust von Zellen die nicht betrieben, sondern bei 20 bis 25°C gelagert wurden betrug weniger als 0.5% pro Monat.

Die vor und nach dem Betrieb in Energiespeichern sowie in Laborversuchen gemessenen DC-Widerstände bei verschiedenen Ladungszuständen zeigen keine kontinuierliche Entwicklung, d.h. sie nehmen zu oder ab und korrelieren nicht mit dem Verlust der Kapazität. Der DC-Widerstand ist somit kein zuverlässiger Indikator für die Zellkapazität und die Alterung. Die Messung des Gewichtes der Zellen zeigt ebenfalls nur eine schwache Korrelation von Kapazitätsverlust und Masseverlust.

In Laborversuchen wurden Zellen mit Vollzyklen bei drei verschiedenen Temperaturen gestresst. Das heisst, sie wurden mit den im Speicherbetrieb zu erwartenden maximalen Strömen voll auf- und entladen. Dabei zeigte sich, dass der Kapazitätsverlust in kalter (10°C) bzw. heisser (50°C) leicht höher war als in warmer (30°C) Umgebung. Es konnte gezeigt werden, dass mit diesen stabilen Zellen noch mindestens 1000 Vollzyklen gefahren werden können, wobei unabhängig von der Kapazität bei der Initialmessung ein Kapazitätsverlust von 20 bis 30% auftritt.



Initialmessungen

Für den Einbau in Speichern und für Laborversuche standen 148 Zellen zur Verfügung, die aus Postrollern und privaten DXP-Fahrzeugen ausgebaut waren. Die Lithium-Eisenphosphat-Zellen mit den Typbezeichnungen gemäss Tabelle 1 stammen von den Herstellern Winston /Thundersky und Sinopoly und weisen nominellen Kapazitäten von 90Ah bis 200Ah auf. Alle Zellen wurden einer initialen elektrischen Charakterisierung unterzogen wobei folgende Parameter gemessen wurden: Kapazität in Ah, Gleichstromwiderstand, Masse in kg.

Bezeichnung	Typ	Anzahl	Kapazität Cnom [Ah] bei 20°C	Alter [Jahre]	Mittelwert SOH [%]
AT, AW	LFP	101	100	5.6 – 8	84.1
B	LFP	7	100	5.6 -6	89.7
C	LFP	14	200	6	78.2
D	LFP	7	160	5.6	99.9
E	EU	13	160	3.6 - 4.3	84.1
F	LFP	4	90	6.7	85.7
G	LFP	2	160	6.1 - 6.7	103.3

Tabelle 4: Zelltypen und Mittelwert der SOH Initialmessung

Abbildung 6 zeigt den State of Health SOH in Prozent der nominalen Kapazität bei der Initialmessung. Auffallend sind die Zellen mit Bezeichnung D und G, die einen SOH von 100% oder mehr aufweisen. Es dürfte sich bei diesen zwei Typen um "umetikettierte " 200 Ah Zellen handeln. Mit 101 Stück ist mit den Zellen AT, AW eine gute Statistik machbar. Diese Zellen mit einem Alter zwischen 5.6 und 8 Jahren weisen einen SOH zwischen 70 und 95 % auf, mit einem Mittelwert von 84%.

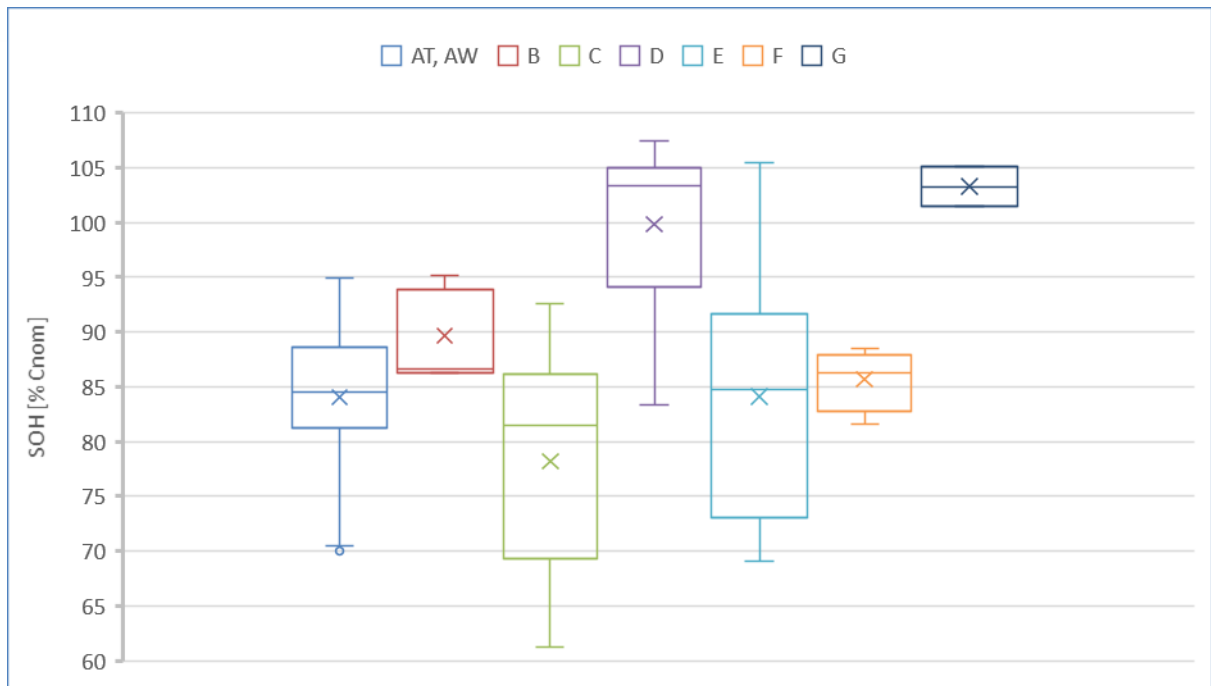


Abbildung 6: Box plot (Quartile, Median, Mittelwert) des initialen Zustandes der Second Life Zellen als SOH (State of Health) in Prozent der nominalen Kapazität C_{nom} , bei 20°C

Laborversuche

Aus der Gruppe der Zellen vom Typ AT wurden Zellen mit hoher (etwa 94 Ah, "beste"), mittlerer (83 Ah, "mittlere") und tiefer (73 Ah, "schlechteste") Kapazität ausgewählt und bei Umgebungstemperaturen von 10°C, 30°C und 50°C gestresst zu werden. Zudem wurden zwei Zellen kalendarisch, d.h. ohne elektrischen Stress, bei 50°C gealtert.

Die Wahl von Zellen mit unterschiedlichem Kapazitätsniveau soll dabei Aufschluss darüber geben, welchen Einfluss der im Fahrzeugbetrieb bereits aufgetretene Kapazitätsverlust auf die weitere Alterung im Speicherbetrieb hat, d.h. ob zum Beispiel Zellen mit bereits vergleichsweise hohem Kapazitätsverlust schneller altern oder ganz ausfallen. Dies kann einen wichtigen Hinweis geben, ob es sinnvoll oder nötig sein wird, eine Vorselektion von Zellen bezüglich Restkapazität durchzuführen.

Die Wahl von drei verschiedenen Umgebungstemperaturen erfolgt aus zwei Gründen. Zum einen ist unbekannt bei welchen Temperaturen die Zellen in den Speichern betrieben werden. Zwar ist in einem Keller eine Umgebungstemperatur von etwa 10°C möglich, durch die Eigenerwärmung und den Betrieb in einem geschlossenen Schrank wäre aber auch eine wärmere Umgebung denkbar. Zum anderen kann mit drei Temperaturniveaus eine allfällige thermisch bedingte Alterung erfasst und mittels Bestimmung der Aktivierungsenergie in einem Arrhenius-Ansatz modelliert werden.

Der Stresszyklus bestand aus Lade- und Entladezyklen mit maximalen Strömen und in einem Spannungsfenster, wie sie für eine Zelle im Speicherbetrieb erwartet werden. Das heisst konkret: Laden mit CCCV-Verfahren (Constant Current, Constant Voltage) bei 26 A, Ladeschlussspannung 3.6 V, Ladeschlussstrom 5A; Entladen mit 50 A bis Entladeschlussspannung 2.8 V. Die Zeit zur Absolvierung von 200 Zyklen lag dann bei 800 bis 1000 Stunden. Dabei wurden die Zellen wie in den Energiespeichern liegend und zusammengedrückt montiert. Nach jeweils 200 Zyklen wurden die Kapazitäten und



DC-Widerstände bei 20°C mit einem standardisierten Messzyklus erfasst. Die Resultate dieser Kapazitätsmessungen sind in Bild 2 dargestellt. Nach 600 Zyklen betragen die Verluste 14 bis 17% (kalt 10°C), 12 bis 15% (warm 30°C), 15 bis 19% (heiss 50°C), die besten Zellen verloren 15 bis 19%, die mittleren und schlechtesten 12 bis 17%. Nach 1000 Zyklen betragen die Verluste 18 bis 20% (kalt 10°C), 15 bis 19% (warm 30°C). Die besten verloren bis 1000 Zyklen 19% und 20%, die mittleren 16% und 18%, die schlechtesten 15% und 20%.

Aufgrund dieser Resultate kann nicht gesagt werden, dass Zellen mit bereits vergleichsweise hohem Kapazitätsverlust schneller altern als solche mit geringerem Kapazitätsverlust. Wie in Abbildung 7 ersichtlich weisen die Graphen der drei Gruppen eine sehr ähnliche Form auf. Ebenso kann keine beschleunigte Alterung durch höhere Umgebungstemperaturen festgestellt werden, womit (in diesem Temperaturbereich) kein Arrhenius-Modell aufgestellt werden kann. Es ist lediglich eine leichte Tendenz feststellbar, dass Zellen bei 30°C Umgebungstemperatur in allen drei Gruppen den geringsten Kapazitätsverlust aufweisen. Aufgrund des geringen Stichprobenumfangs kann dies aber nicht als statistisch signifikante Aussage gewertet werden.

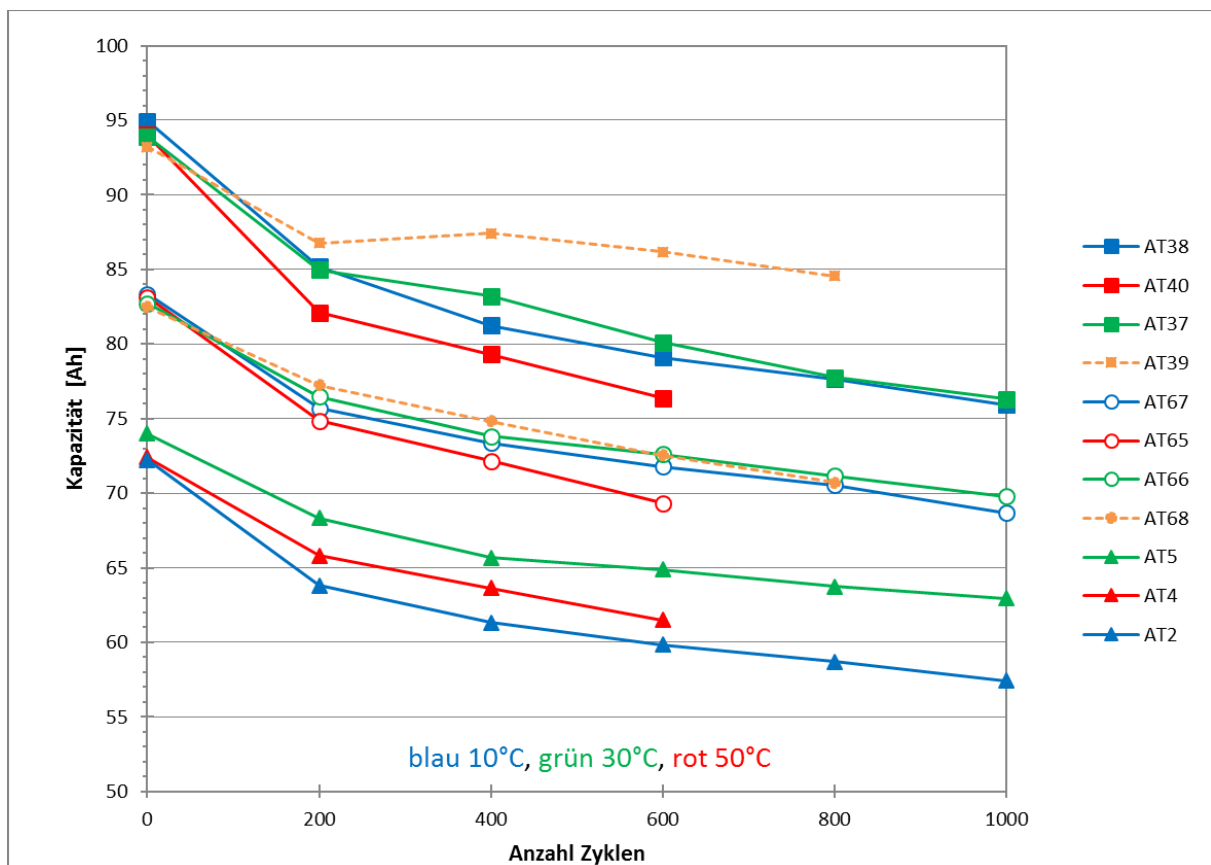


Abbildung 7: Kapazitätsverlust von AT-Zellen in Funktion der Vollzyklen bzw. bei kalendarischer Alterung bei 50°C (AT39, AT68)



Betrieb in Energiespeichern

Der grösste Teil der initial charakterisierten Zellen wurde in Energiespeichern in der Umweltarena (UWA) und in einem Postgebäude in Neuenburg (NE1, NE2, NE3) eingebaut und während mehr als einem Jahr betrieben. Die Zellen werden dabei in einem Spannungsfenster zwischen 2.9 V bis 3.6V mit maximalen Strömen von 30 A beim Laden bzw. 50 A beim Entladen betrieben. Nach dem Betrieb in den Energie-speichern wurden die Zellen ausgebaut und im Labor wieder mit dem standardisierten Messzyklus bei 20°C charakterisiert. 19 Zellen der Typen AW und AT wurden nicht verbaut, sondern bei Temperaturen von 20-25°C gelagert. Abbildung 8 zeigt den durchschnittlichen Kapazitätsverlust pro Monat von Zellen in Energiespeichern und den gelagerten Zellen. Detaillierte Messresultate zu den einzelnen Speichern sind im Anhang A dargestellt.

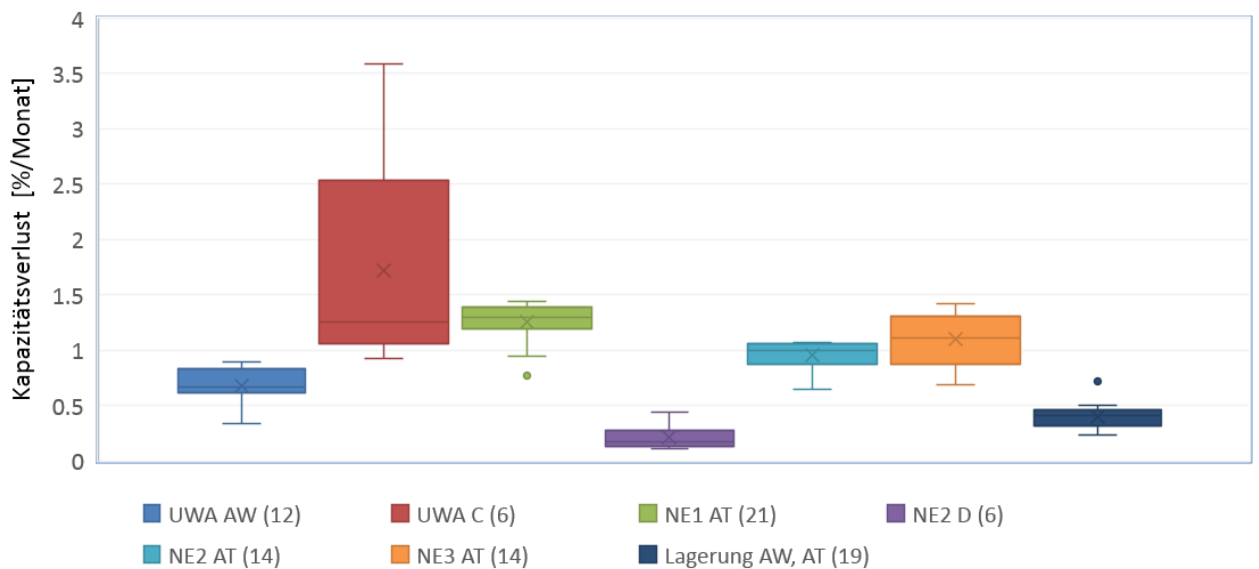


Abbildung 8: Box plot (Quartile, Median, Mittelwert) des durchschnittlichen Kapazitätsverlusts pro Monat von Zelltypen AW, AT, C, und D, in Klammern ist die Anzahl der Zellen

Ausbreitungstests

Hintergrund

Der sichere Betrieb eines Lithium-Ionen-Akkus wird in erster Linie durch das Batteriemanagementsystem BMS und konstruktive Massnahmen am Batteriesystem sichergestellt. Dennoch kann nicht ausgeschlossen werden, dass eine Zelle durch einen internen Kurzschluss - z.B. verursacht durch einen Produktionsmangel - in ein thermisches Durchgehen gebracht wird. In diesem Fall kann das BMS nicht eingreifen, das thermische Durchgehen kann nicht gestoppt werden. Deshalb ist es sinnvoll die Auswirkung des thermischen Durchgehens einer einzelnen Zelle auf das Batteriesystem mittels einer Ausbreitungsprüfung zu untersuchen um Risiken abzuschätzen und gegebenenfalls Gegenmassnahmen zu entwickeln.

Die Ausbreitungsprüfung bewertet die Fähigkeit eines Batteriesystems, dem Auftreten eines Ereignisses von thermischem Durchgehen einer einzelnen Zelle zu widerstehen, so dass das Auftreten eines solchen Ereignisses keinen Brand im Batteriesystem verursacht.



Die Prüfung ist in einer neuen Norm IEC 62619 Sicherheitsanforderungen für Lithium-Akkumulatoren und – Batterien für die Verwendung in industriellen Anwendungen, Ausgabejahr 2017, beschrieben. In den Anwendungsbereich industrielle Anwendungen fallen explizit:

- Stationäre Anwendungen: Telekommunikation, unterbrechungsfreie Stromversorgungen (USV), elektrische Energiespeichersysteme, Schaltanlagen, Notstromanlagen.
- Mobile Anwendungen: Gabelstapler, Golfwagen, automatisch geführte Fahrzeuge, Eisenbahn, Schifffahrt und andere mobile Anwendungen mit Ausnahme von Strassenfahrzeugen.

Die im Projekt erstellten und untersuchten Batteriespeicher fallen somit in den Anwendungsbereich dieser Norm, welche in einem Streit- oder Schadenfall als Stand der Technik rechtlich relevant sein kann.

Aus der Literatur [2] ist bekannt, dass die in den Energiespeichern verbauten Lithium-Eisenphosphat-Zellen beim thermischen Durchgehen wesentlich tiefere Temperaturen ($< 400^{\circ}\text{C}$) entwickeln als Lithium-Nickel-Mangan-Cobaltoxid (ca. 650°C) oder Lithium-Cobaltoxid-Zellen ($> 800^{\circ}\text{C}$) und deshalb als vergleichsweise sicher betrachtet werden. Vorausgegangene Untersuchungen an Batterien von DXP Postrollern hatten aber auch gezeigt, dass vergleichsweise sichere Zellen noch nicht zu einer sicheren Batterie führen und Prüfungen zur Auswirkung eines internen Kurzschlusses einer Zelle sowie Ausbreitungstest stets mit dem Batteriesystem durchzuführen sind [3].

Vorgehen

Für den Test wurden Zellblöcke mit vollgeladenen Zellen in einem Originalschrank platziert. Die Zellen sind dabei wie in den Energiespeichern durch 3mm dicke Isoplan Brandschutzplatten voneinander getrennt. Das thermische Durchgehen wird durch einen internen Kurzschluss mittels Einschlagen eines Nagels in den Zellkörper provoziert. Insgesamt wurden 5 Zellen in zwei unterschiedlichen Zellblöcken zum thermischen Durchgehen gebracht.

Die Prüfung gilt nach IEC 62619 als bestanden, wenn kein äusserer Brand aus dem Batteriesystem entsteht und kein Bruch des Batteriegehäuses stattfindet.

Resultate

Bei allen Tests fand keine Ausbreitung des thermischen Durchgehens auf eine benachbarte Zelle statt. Die höchste an Zellen gemessene Temperatur betrug 190°C . Die höchste an der Innenseite der Türe gemessene Temperatur lag bei 43°C , d.h. 35° über der Umgebungstemperatur. Die in einem Versuch gemessene Temperatur in einem oben am Schrank angebrachten Abluftrohr lag maximal 15° über der Umgebungstemperatur. In allen Tests war der Schrank dicht, d.h. es trat keinerlei Rauch aus. Bilder und Messresultate des Ausbreitungstests sind im Anhang A3 gegeben.

Die Ausbreitungsprüfung hat gezeigt, dass die Second-Life-Speicher mit Lithium-Eisenphosphat-Zellen sicher sind, d.h.

- Keine Ausbreitung des thermischen Durchgehens einer Zelle auf Nachbarzellen
- kein Feuer
- keine Explosion oder Verpuffung



findet statt. Somit würde er eine Prüfung nach IEC 62619 bestehen. Zusätzliche Sicherheitsmassnahmen wie zum Beispiel eine Löscheinrichtung oder ein Rauchabzug sind nicht zwingend erforderlich. Allenfalls sollte überlegt werden, wie lange gewartet werden muss, bis der im Schrank gefangene (giftige) Rauch kondensiert ist und wie gelüftet und gereinigt werden müsste.

Brandschutz / Handling SL-Zellen

Grundsätzlich dürfen Stromspeicher nur von Inhabern einer entsprechenden Installationsbewilligung installiert werden. Darüber hinaus gibt es verschiedene Vorschriften wie Installationsnorm (NIN), Weisungen und Richtlinien des Eidgenössischen Starkstrominspektorats und der Verteilnetzbetreiber, Produktesicherheit, Elektromagnetische Verträglichkeit, etc. Diese Vorschriften müssen beim Verkauf eines Serienprodukts beachtet werden.

Bei allen im Projekt installierten Systemen wurde die elektrische Installation von Inhabern der entsprechenden Bewilligungen durchgeführt. Vor jeder Installation wurden die Brandschutzverantwortlichen über den geplanten Standort und die technischen Spezifikationen informiert. Für den SL-Speicher wurde eine Gefahrenanalyse erstellt (siehe Anhang B).

Für die im Projekt verbauten Speicher wurde von den Brandschutzverantwortlichen eine Angabe zur Brandlast verlangt. Diese durfte die für den entsprechenden Aufstellungsraum zugelassene Brandlast nicht überschreiten. Weiter wurde eine Montage auf nicht brennbarem Untergrund verlangt. Weitergehende Dokumentationen oder Nachweise waren für die Installation nicht notwendig.

Noch nicht abschliessend gelöst ist die Frage, wie SL-Zellen, wenn diese in einem SL-Speicher eingebaut sind, korrekt transportiert werden können. Da bei SL-Zellen nicht garantiert werden kann, dass diese in der Vergangenheit immer innerhalb der erlaubten Parameter betrieben wurden (Temperatur, Spannung, Leistung, etc.), ist die Freigabe für solche Zellen für den Transport noch nicht gelöst. Grundsätzlich dürfen Batterien in Ausrüstung(im Gehäuse, ohne elektrische Verbindungen) transportiert werden (nach UN3481 in der ADR 2019). Allerdings wird hier das Gewicht für das Handling zum Problem und es bleibt die Frage, ob diese Regelung auch für SL-Zellen zulässig ist, die vor vielen Jahren gemäss UN geprüft wurden. In einem Schutzcontainer dürften die einzelnen SL-Zellen transportiert werden – eingebaut im Schrank ist dies im Moment gemäss Informationen der Autoren noch unklar. Für die Installation von SL-Speichern bedeutet dies, dass Zellen und Gehäuse in demontierter Form transportiert werden müssen. Im Wissen, dass diese Zellen zuvor in für den Verkehr zugelassenen Fahrzeugen eingebaut waren, erscheinen die Restriktionen für den Transport schwer nachvollziehbar.



Wirtschaftlichkeit / Business-Case SL-Speicher

Die Herausforderungen bei der Kommerzialisierung von SL-Speicher wurden bereits im Kapitel „Wirtschaftliche Grundlagen“ erläutert. Im vorliegenden Projekt wurden für den Aufbau des SL-Speichers Standardkomponenten verwendet, die nicht für eine Serienproduktion geeignet sind. Im Projekt wurden auch die Herstellungskosten für eine Kleinserienproduktion abgeschätzt. Dazu wurden die günstigsten auf dem Markt verfügbaren Komponenten gewählt, ohne die Preise mit dem Hersteller zu verhandeln. Für die Berechnung der Herstellungskosten der Zellenprints wurde eine Seriengrösse von > 5000 Prints angenommen. In Tabelle 5 sind die Kosten für die Komponenten einer Kleinserie (100-200 Stück) eines Speichers mit 30 SL-Zellen zusammengefasst.

Komponente	Preis [CHF]
Akku-Wechselrichter	1200
Steuerung/Display	470
Zellenprints (30 Stk.)	1200
Elektromaterial	550
Gehäuse	420
Total	3840

Tabelle 5: Richtpreise für Komponenten für den Aufbau eines SL-Speichers in Kleinserie (noch ohne SL-Zellen).

Die nutzbare Kapazität eines SL-Speichers mit 30 SL-Zellen beträgt ca. 6-8 kWh (in Abhängigkeit der eingesetzten Zellen). Diese Kapazität kann mit der Optimierung des eingesetzten Algorithmus um ca. 2-3 kWh gesteigert werden (siehe Kapitel „Speicherkapazität“). Für die Montage eines SL-Speichers muss mit ca. 1500 – 2000 CHF gerechnet werden. Ohne Kosten für die SL-Zellen sind somit Herstellungskosten von knapp über 500 CHF/kWh möglich.

Im Vergleich dazu liegen die Preise für vergleichbare neue Systeme im Grosshandel bei 600 – 1200 CHF/kWh. Damit zeigt sich, dass auch mit einer weiteren Optimierung der Komponentenpreise und der Montagekosten die Preise von neuen Systemen nicht wesentlich unterboten werden können. Zumal bei den Grosshandelspreisen bereits die Zuschläge für Garantie etc. eingerechnet sind.

Als klares Verkaufsargument bleibt für kleine SL-Speicher primär die sehr vorteilhafte Ökobilanz.

Grundsätzlich ist der mögliche Preisvorteil für SL-Speicher bei grösseren Speicherkapazitäten (>100 kWh) deutlich grösser. Die Kosten für Installation, Gehäuse, Wechselrichter, Wartung und Unterhalt sind bei grösseren Stromspeichern im Vergleich zu den Akkukosten weniger relevant. Dadurch könnten grosse SL-Speicher wirtschaftlich attraktiver sein als kleine SL-Speicher.

Übertragbarkeit auf andere Zellen / Zellchemien

Die entwickelte Zellenverschaltung inkl. BMS ist grundsätzlich für alle Lithium-Ionen-Zellen verwendbar. In Abhängigkeit der Zellchemie müssen einzig die auf Hardwareebene verwendeten Sicherheitskreise angepasst werden. Auch für Bleiakkumulatoren ist die Zellenverschaltung grundsätzlich möglich. Um Bleiakkumulatoren korrekt zu laden, muss jedoch auch der Algorithmus angepasst werden, da gewisse Bleiakkumulatoren über Ladungsphasen verfügen, die bei Lithium-Ionen-Akkus nicht vorkommen (z.B. Gasungsladung).

Es ist jedoch sinnvoll, bei der Verwendung von SL-Zellen in SL-Speichern auf Grund der Wirtschaftlichkeit auf Zellen mit möglichst grosser Kapazität zu fokussieren. Dabei werden auf Grund der Erfah-



rungen im vorliegenden Projekt Zellen oder Akkus mit einer Kapazität von mindestens 1 kWh als sinnvolle Einheit zur weiteren Verwendung empfohlen.

Ökobilanz

Der in diesem Projekt entwickelte SL-Speicher war auch Grundlage für eine von der Firma Treeze erstellte Ökobilanz [4]. Die Autoren der Studie kommen zu folgendem Schluss: *„Die Umweltauswirkungen des Speichersystems mit wiederaufbereiteten Batterien sind gemäss den betrachteten Indikatoren rund 60 % tiefer als jene des Batteriesystems mit heute verfügbaren Lithium-Ionen Batterien“.*

Einflussfaktor in der Studie war unter anderem der monetäre Wert der eingesetzten SL-Zellen. Für die Studie wurde hier ein Wert von ca. 100 CHF/kWh eingesetzt. Wenn diese Zellen noch einen ökonomischen Wert haben, wird auch der dem ökonomischen Restwert entsprechende Anteil der Umweltbelastung dem SL-Speicher angerechnet. Würden die SL-Zellen gratis für eine Verwendung in einem SL-Speicher zur Verfügung gestellt, würde die Ökobilanz noch positiver ausfallen für den SL-Speicher.

Im vorliegenden Projekt ist noch nicht geklärt, welchen Preis die aussortierten Zellen haben oder ob diese gratis abgegeben werden.



Kommunikation

Im Projekt wurden verschiedenste Kommunikationsmassnahmen durchgeführt. Neben den in Tabelle 6 aufgeführten Publikationen und Reportagen sind vor allem die Dauerausstellung in der Umweltarena Schweiz und die 10 Ausstellungen der Post CH AG mit dem mobilen SL-Speicher im Rahmen der Ausstellungsserie „Elektromobilität und Solarstrom“, durchgeführt von Electrosuisse, zu nennen.

Publikationen und Reportagen zum Projekt SL-Speicher

Art	Ort	Datum
Kurzartikel	Beobachter	Mai 17
Artikel	Energie-Vorbild Bund Jahresbericht 2017	Jul 18
Fachartikel	Webseite BFE	Nov 17
Fachartikel	Bundesrundschau	Apr 18
Fachartikel	eco2friendly	Apr 18
Fachartikel	Energeia	Mrz 18
Fachartikel	Efficiency21	Jan 18
Fachartikel	Empa Quarterly	Sep 17
Fachartikel	NZZ am Sonntag	Nov 17
Radiobeitrag	SRF	Jan 17
Fernsehbeitrag	RTS	Mrz 18
Internetseite	Post	Jan 17
Internetseite / Medienmitteilung	Post	Jan 17
Internetseite / Medienmitteilung	Ökozentrum	Jan 17
Internetseite / Medienmitteilung	EMPA	Sep 17
Internetseite / Medienmitteilung	Helion Solar AG	Jan 17
Internetseite / Medienmitteilung	Kyburz AG	Nov 17
Ausstellung / Führungen	Umwelt Arena Schweiz	permanent
Ausstellung	e'mobile, 8 Ausstellungen	Sommer 17
Artikel	Personalzeitung Post	Mai 17
Diverse Hinweise in Newslettern		
Diverse Vorträge	Post intern	Mai 17
	brenet Status-Seminar	Sep 18
	Energie-Modell Zürich	Sep 18

Tabelle 6: Publikationen und Reportagen zum Projekt SL-Speicher

Ausstellungen und Führungen in der Umweltarena - vom Postroller zum Energiespeicher

Die Umwelt Arena Schweiz wurde am 2012 eröffnet und ist eine Ausstellungsplattform für Themen der Nachhaltigkeit in den Bereichen Natur und Leben, Energie und Mobilität, Bauen und Modernisieren sowie Erneuerbare Energie.

Durch Erleben, Begreifen und Vergleichen komplexer Fragestellungen werden in der familienfreundlichen Umwelt Arena allen Bildungsschichten Zusammenhänge von umweltschonenden Produkten und ihrer Technik auf gut verständliche Art näher gebracht. Die Umwelt Arena hat zum Ziel, die Bevölke-



rung zu sensibilisieren und über moderne Umwelttechniken und den nachhaltigen Umgang mit unseren Ressourcen zu informieren und zum Handeln zu motivieren.

Seit 2017 erzählt die Umwelt Arena wir mit dem Ausstellungspartner Post AG auch die Geschichte des Second-Life-Speichers. Und zwar von der Batterie im Postroller bis zur Zweitnutzung als Speicherbatterie. Als wichtige Elemente zur Geschichte des SL-Batteriespeichers sind die folgenden Stationen in der Umwelt Arena sichtbar:

- Der Ausstellungsbereich der Post AG, mit einer interaktiv gestalteten Themenvitrine zur SL-Batterie im Ausstellungsbereich „Recycling City“. Diese Ausstellung ist im offenen Besucher teil der Umwelt Arena und wird situativ von den Guides der Umwelt Arena auch in die „Allgemeine Führung“ integriert.
- Zwei elektrifizierte Post-Zustellfahrzeuge stehen den Besuchenden zur Probefahrtnutzung im Indoorparcour der Umwelt Arena zur Verfügung.
- Der aktive Pilot-SL-Batteriespeicher ist im Untergeschoss der Umwelt Arena installiert. Er kann im Rahmen einer gebuchten Sonderführung „Blick hinter die Kulissen“ ebenfalls besichtigt werden.
- Auch die Solarblumen im Aussenbereich Umwelt Arena sind miteinbezogen. Ernten diese Sonnenlicht, wird der SL-Speicher im gleichen Umfang geladen.

Alle diese Stationen (Ausstellungsvitrine, Postroller, Solarblumen, Pilotspeicher) sind mit dem gleichen Icon gekennzeichnet, so dass die Besuchenden der Umwelt Arena die Zusammenhänge erkennen können.

Die Ausstellung stösst auf gute Resonanz und bietet eine ausgezeichnete Möglichkeit, auf kritische Rückfragen zum Batterie-Ressourcenverbrauch im Zusammenhang mit der Elektromobilität anhand dieses konkreten Beispiels einzugehen.

Oft kommt auch die Rückfrage, wo dann ein solcher industriell gefertigter SL-Speicher erhältlich wäre und was dieser Kosten würde. Diese Rückfragen zeigen einen Bedarf für einen SL-Speicher zu konkurrenzfähigen Preisen.

Ausstellungen „Ein zweites Leben für Postrollerbatterien“

Im Sommer 2017 wurden 10 Anlässe in der Deutschschweiz zum Thema Elektromobilität und Solarstrom durchgeführt. Die Post CH AG und Helion haben sich an dieser Ausstellungsserie beteiligt. Die Post hat dabei explizit das Thema SL-Speicher unter dem Motto „Ein zweites Leben für Postrollerbatterien“ gezeigt.



Abbildung 9: Messestand „Ein zweites Leben für Postrollerbatterien“ an den Anlässen von e'mobile/Electrosuisse zum Thema „Elektromobilität und Solarstrom“

Ausblick, weitere Schritte

Die im Projekt beteiligten Industriepartner haben noch nicht entschieden, in welcher Form das Projekt weiter verfolgt werden soll. Die für die Serienfertigung notwendigen Investitionen sind nicht unerheblich und bergen entsprechende Risiken. Vor allem die sehr rasch voranschreitende Entwicklung im Bereich Akkuentwicklung mit entsprechenden Preissenkungen machen eine zuverlässige Prognose der Wirtschaftlichkeit, insbesondere für die kleinen SL-Speicher, schwierig.

Verschiedene grössere Firmen in der Schweiz suchen ökologisch sinnvolle Lösungen für ihre aussortierten Akkumulatoren. Daher können die Erkenntnisse aus dem vorliegenden Projekt wichtige Inputs für diese in naher Zukunft stattfindenden Entwicklungen geben.

Die Ergebnisse zu den Zellenuntersuchungen werden in einer wissenschaftlichen Publikation veröffentlicht.

Da sich in der Schweiz aktuell verschiedene Forschungs- und Entwicklungsinstitute mit dem Thema SL-Speicher befassen, soll im 2019 eine Tagung zu diesem Thema organisiert werden.



Diskussion

Das vorliegende Projekt zeigt die technischen und wirtschaftlichen Herausforderungen beim Einsatz von Second-Life Zellen als Stationäre Stromspeicher. Das Projekt ist ein Pionierprojekt. Vergleichbare Projekte, die auf dem Einsatz einzelner Zellen aufbauen und von einem entsprechenden Monitoring begleitet sind, sind nicht bekannt. Die in diesem Projekt gewonnen Erkenntnisse lassen sich daher nur schwer vergleichend mit anderen Projekten diskutieren.

Die Zelluntersuchungen der Empa zeigen deutlich, dass die SL-Zellen noch eine beachtliche Kapazität aufweisen, und daher aus Gründen der Ressourceneffizienz weiter genutzt werden sollten. Selbst nach 1000 Zyklen ist der Kapazitätsverlust im Durchschnitt bei nur 20 %. Dies entspricht an der Zyklenanzahl gemessen einer Einsatzdauer von ca. 5 Jahren. Gleichzeitig werden kalendarische Kapazitätsverluste von etwa 0.5 % pro Jahr gemessen. Bei einer Einsatzdauer von 5 Jahren ist daher mit einem Kapazitätsverlust von ca. 25 % durch kalendarische Alterung zu rechnen. Bei 10 Jahren Einsatzdauer beträgt der Kapazitätsverlust bereits 45 % alleine durch die kalendarische Alterung. Dieser Kapazitätsverlust von 45 % ist noch akzeptabel über 10 Jahre Betriebsdauer – unter der Voraussetzung dass genügend Reservekapazität verbaut wurde. Die gemessenen Kapazitätsverluste im Betrieb liegen aber bei einigen Zellen über 1 % pro Monat. Daraus resultiert eine Kapazitätseinbusse der Zellen von ca. 70 % über 10 Jahre. Dies verunmöglicht trotz intelligenter Zellenverschaltung den Bau eines kleinen SL-Speichers mit Kapazitätsgarantie zu konkurrenzfähigen Preisen. Es zeigt sich, dass die Art der gewählten Zellen für den Bau eines kleinen SL-Speichers entscheidend ist.

Leider zeigen die Zellenuntersuchungen an der Empa keine Korrelationen zwischen den gemessenen Parametern und dem Kapazitätsverlust. Eine Prognose zum Kapazitätsverlust bleibt daher weiter unmöglich. Dadurch ist auch eine Vorselektion der Zellen von begrenztem Nutzen.

Auch die Tatsache, dass in den Untersuchungen der Kapazitätsverlust nicht bei allen Zellen gleichmässig verläuft, zeigt die Notwendigkeit einer regelmässigen Überwachung des SL-Speichers. Diese kann in Form der im Projekt implementierten Zellenverschaltung erfolgen oder bei einem Grossspeicher möglicherweise auch halbautomatisch realisiert werden.

Die Ausbreitungsversuche zeigen, dass ein SL-Speicher so aufgebaut werden kann, dass nur einzelne Zellen „thermisch durchgehen“. In einem Serienprodukt ist jedoch mit einer veränderten Anordnung der Zellen zu Rechnen. Daher müssen diese Versuche für abgeänderte Systeme wiederholt werden.

Bei allen genannten technischen und wirtschaftlichen Herausforderungen, ist ein grosses vor allem ökologisches Potenzial für SL-Zellen vorhanden, das nach Möglichkeiten genutzt werden soll. Daher sollte der Einsatz in den potenziell wirtschaftlicheren grossen Speichersystemen weiter intensiv geprüft werden. Auch weitere Untersuchungen an SL-Zellen sind wenn möglich zu fördern, da eine Prognose zum Alterungsprozess von SL-Zellen der Schlüssel zu wirtschaftlichen Systemen ist. Könnte die Alterung von SL-Zellen relativ genau prognostiziert werden, wären SL-Speicher denkbar, die den aktuellen Preis nochmals um 30-40 % unterbieten.

Bei grossen SL-Speichern ist es auch denkbar, dass die Anforderung an Wartungsintervalle von untergeordneter Bedeutung ist. So könnte z.B. auf eine Zellenüberbrückung verzichtet werden, wenn die Zellen permanent überwacht würden und wöchentlich ein manueller Austausch der alten Zellen vorgesehen ist. Für kleine Heimspeicher im Bereich von 10 kWh ist dies aus Kostengründen nicht denkbar. Für Grossspeicher von 1 MWh (ca. 3000 SL-Zellen) könnte diese Variante günstiger sein als eine automatische Zellenüberbrückung, falls entsprechendes Servicepersonal im Betrieb zur Verfügung steht. Speziell in Betrieben mit eigenem technischem Personal ist diese Variante zu Prüfen.



Die bisherigen Ausführungen betreffen SL-Zellen mit einer Nominalen Kapazität von 320 – 640 Wh. Dies ist nach Einschätzung der Autoren die untere Grenze an sinnvoll zu bewirtschaftenden Einzelzellen. Bei Zellen mit noch kleinerer Kapazität gelten die gemachten Aussagen nicht mehr – oder es müssen wiederum Zellenblöcke mit einer vergleichbaren Kapazität berücksichtigt werden. Ein Aufbau eines SL-Speichers aus z.B. einzelnen Zellen im 18650-Format wird nicht als sinnvoll erachtet. Eine aus wirtschaftlicher Sicht sinnvolle Kapazität für zu verschaltende SL-Zellen (SL-Zellenblöcke) mit Einzelbewirtschaftung liegt nach Einschätzung der Autoren bei ca. 1 kWh.

Aktuell werden erst wenige Metalle im Recycling von Lithium-Ionen-Akkus wiedergewonnen. Die technischen Möglichkeiten, um deutlich mehr der seltenen Stoffe zu rezyklieren, sind vorhanden. Aktuell werde diese aber aus Kostengründen nicht genutzt. Man muss sich die Frage stellen, ob die Nutzung von SL-Zellen auch in ferner Zukunft noch sinnvoll sein wird. Falls die Prozesse zur Wiederverwertung der wesentlichen Stoffe aus einem Akku energetisch und stofflich optimiert sind, kann die Situation auftreten, dass die notwendige Energie in Form von grauer Energie der für den SL-Speicher zusätzlichen Elektronikkomponenten den Energieaufwand für ein Recycling der Zellen übersteigt. Dann wäre die Zweitnutzung von Zellen und Akkus nicht mehr sinnvoll.

Schlussfolgerungen

Stromspeicher aus SL-Zellen können technisch zuverlässig und sicher realisiert werden. Um einen zuverlässigen Betrieb zu realisieren müssen die einzelnen Zellen aber regelmässig überwacht werden und bei Bedarf überbrückt oder ausgetauscht werden. Mit welchem System diese Überbrückung oder der Austausch von SL-Zellen erfolgt, ist Abhängig von der Grösse des SL-Speichers und den Anforderungen an die Kapazität und die Verfügbarkeit.

Stromspeicher aus SL-Zellen werden voraussichtlich nicht günstiger zu realisieren sein als neue Stromspeichersysteme. Aktuell schätzen die Autoren der Studie die Wirtschaftlichkeit von grösseren Systemen (> 1MWh) leicht höher ein als von kleinen Systemen. Dabei wurde aber die Bereitschaft von Kunden, für ein ökologisches Produkt einen Mehrpreis zu bezahlen, nicht berücksichtigt.

Wenn eine Möglichkeit gefunden wird, die Kapazitätsverluste von Zellen zu prognostizieren, könnten SL-Speicher deutlich günstiger als bisher realisiert werden.

Aus ökologischer Sicht ist die Nutzung von SL-Zellen für die Stromspeicherung heute vorteilhaft. Dies wird sich erst mit einem deutlich optimierten Recyclingverfahren für Lithium-Akkumulatoren und einer Verknappung der zur Herstellung notwendiger Rohstoffe ändern.

Die SL-Tauglichkeit muss schon bei der Herstellung (First Life) beachtet werden. Nur so ist die Möglichkeit gesichert, in Zukunft preislich konkurrenzfähige und zuverlässige SL-Speicher herzustellen.

Referenzen

[1] Wissenschaftliches Mess- und Evaluierungsprogramm Solarstromspeicher 2.0: Aachen, Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe, November 2018 (<http://www.speichermonitoring.de>)

[2] Golubkov A.W., Thermal-runaway experiments on consumer Li-ion batteries with metal-oxide and olivin-typecathodes, RSCAdv.,2014,4,3633



[3] Held, M., & Brönnimann, R. (2016). Safe cell, safe battery? Battery fire investigation using FMEA, FTA and practical experiments. *Microelectronics and Reliability*, 64, 705-710.

<https://doi.org/10.1016/j.microrel.2016.07.051>

[4] Ökobilanz PV-Anlage und Batterie für das Garderoben- und Clubgebäude in Zürich Höngg; Schlussbericht: Zürich, März 2018 (<https://www.stadt-zuerich.ch/pv-batterie>)



Anhang A

A1 Initialmessung

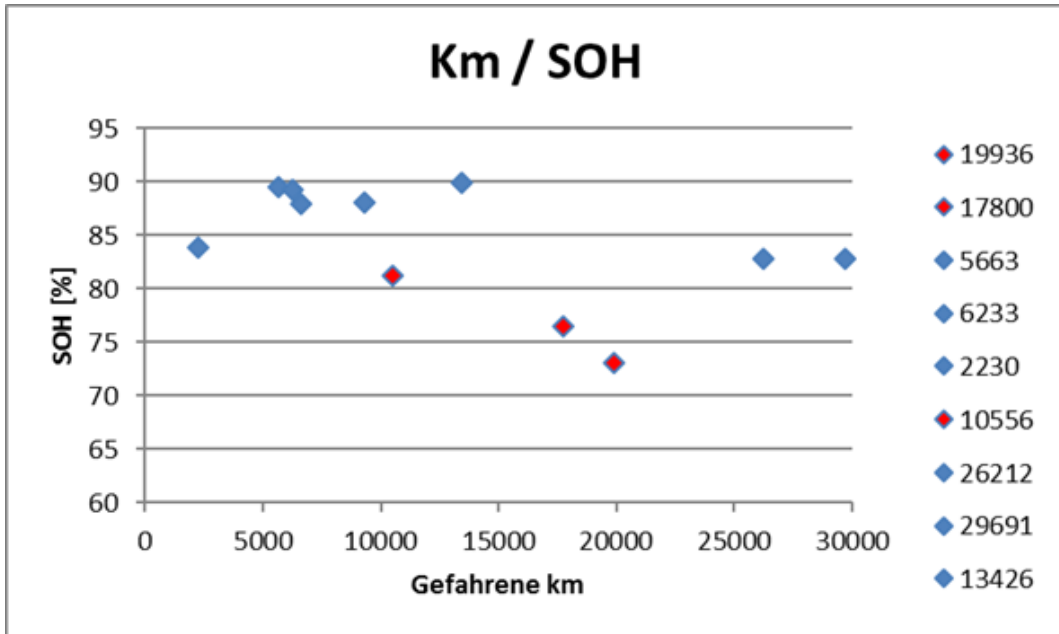


Abbildung A1.1 Durchschnittlicher SOH von Zellblöcken (4 bis 8 Zellen Typ AW oder AT) in Funktion der gefahrenen Strecke, rot Postfahrzeuge, blau Privatfahrzeuge

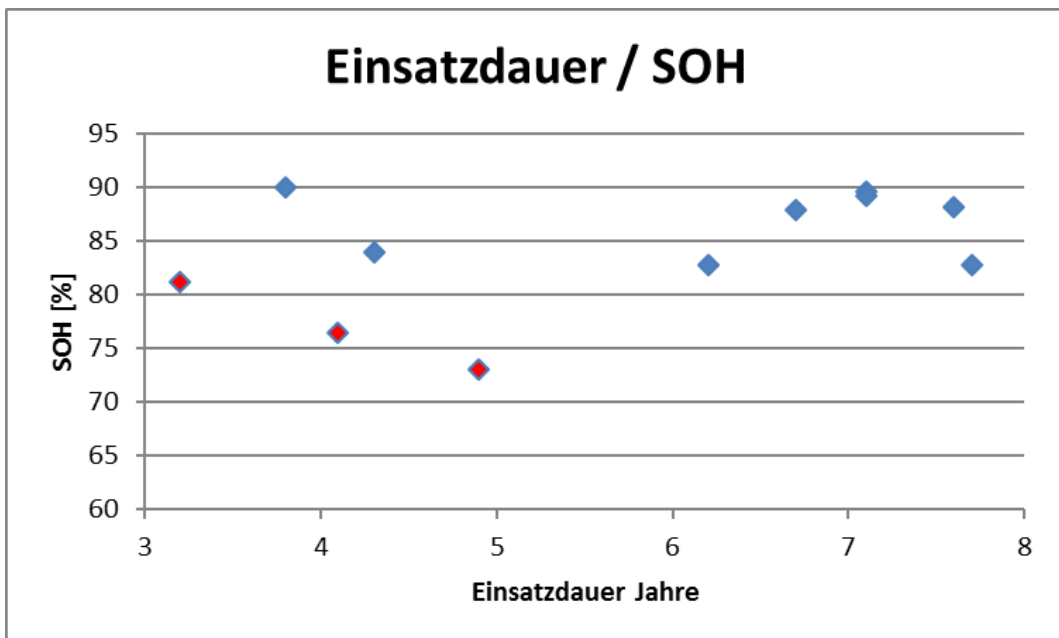


Abbildung A1.2 Durchschnittlicher SOH von Zellblöcken (4 bis 8 Zellen Typ AW oder AT) in Funktion der Einsatzdauer, rot Postfahrzeuge, blau Privatfahrzeuge



A2 Betrieb in Energiespeichern

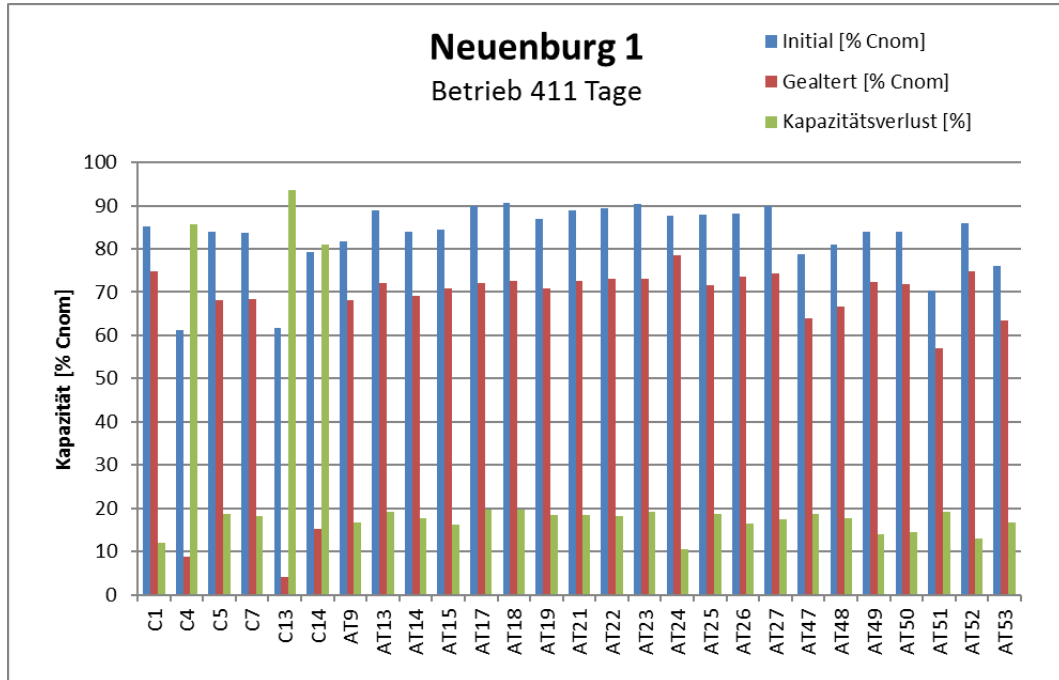


Abbildung A2.1 SOH in Prozent der nominalen Kapazität C_{nom} , initial und nach Betrieb im Energiespeicher Neuenburg 1, Kapazitätsverlust in % des Initialwertes

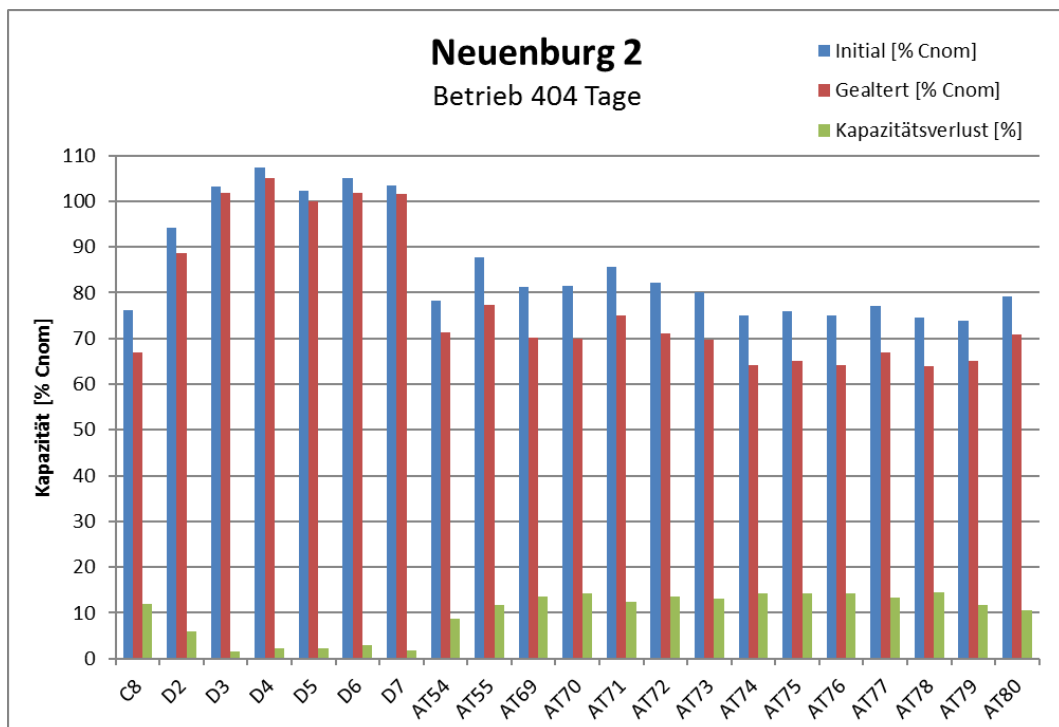


Abbildung A2.2 SOH in Prozent der nominalen Kapazität C_{nom} , initial und nach Betrieb im Energiespeicher Neuenburg 2, Kapazitätsverlust in % des Initialwertes

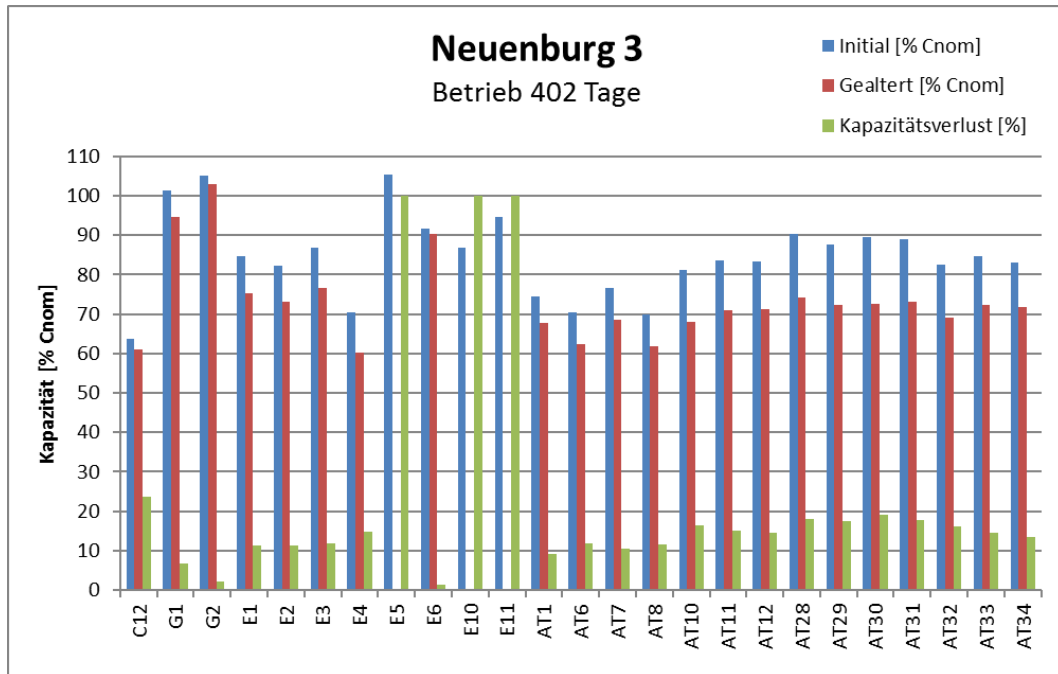


Abbildung A2.3 SOH in Prozent der nominalen Kapazität C_{nom} , initial und nach Betrieb im Energiespeicher Neuenburg 3, Kapazitätsverlust in % des Initialwertes

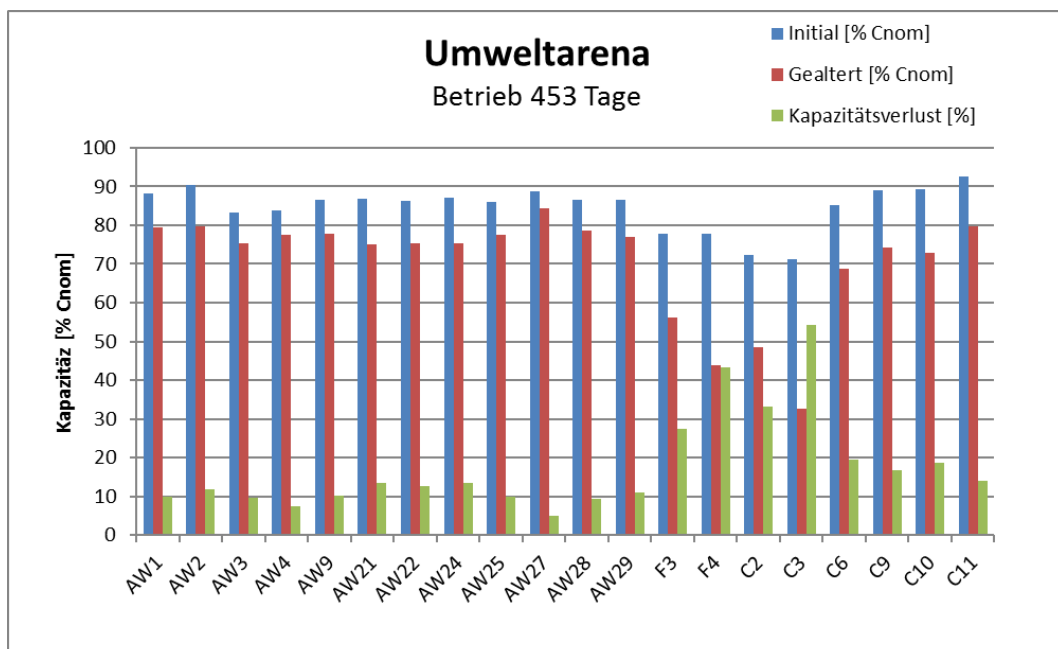


Abbildung A2.4 SOH in Prozent der nominalen Kapazität C_{nom} , initial und nach Betrieb im Energiespeicher Umweltarena, Kapazitätsverlust in % des Initialwert



A3 Ausbreitungstest

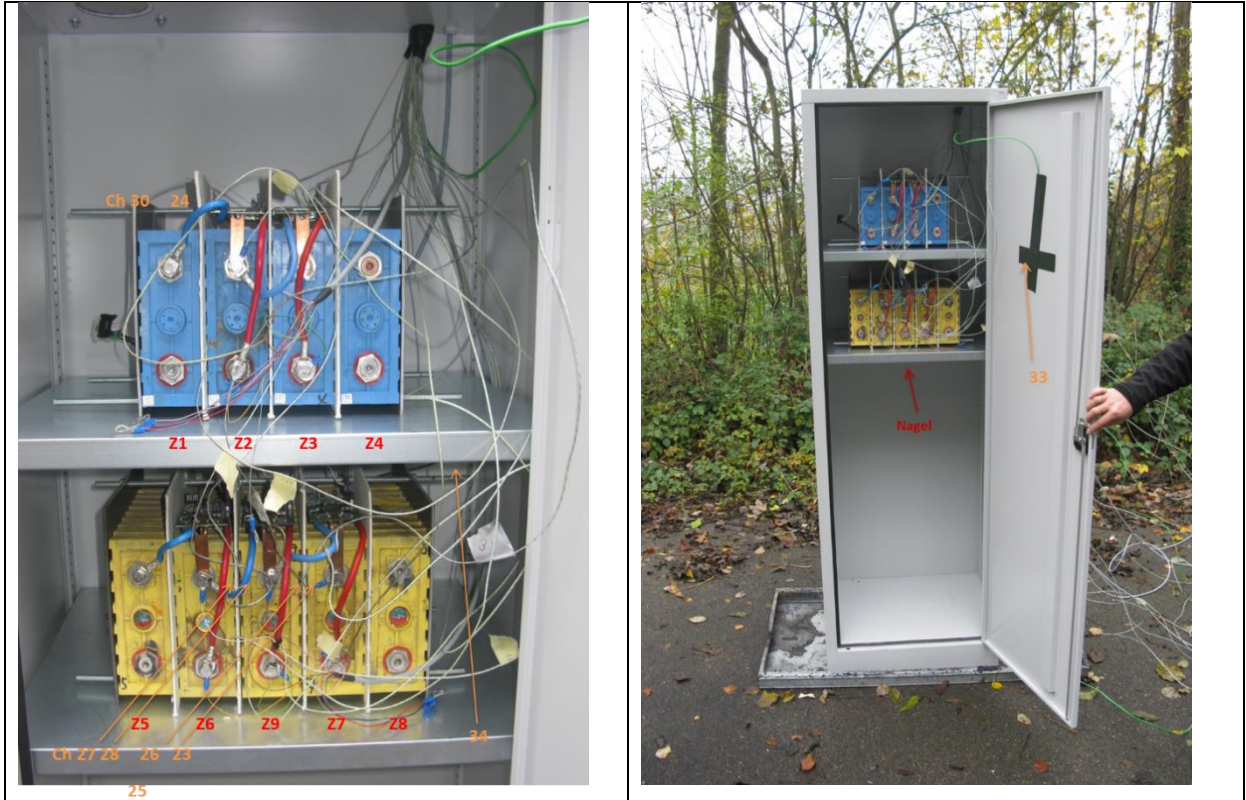


Abbildung A3.1 Anordnung der Zellen beim Ausbreitungstest im Originalschrank

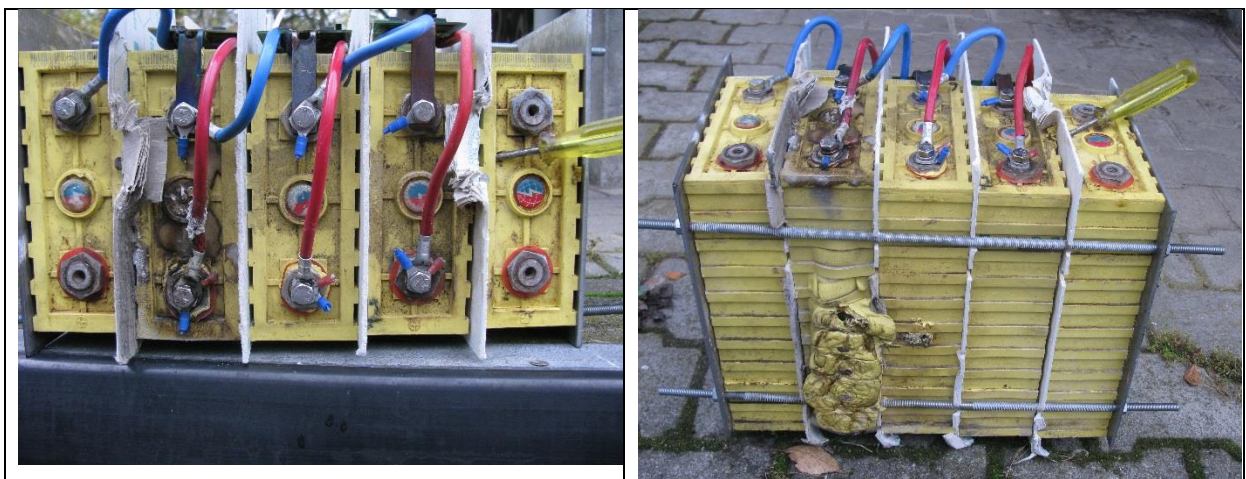


Abbildung A3.2 Zellblock nach Ausbreitungstest der Zellen, Kurzschluss in Zellen Z9, Z6 und Z7

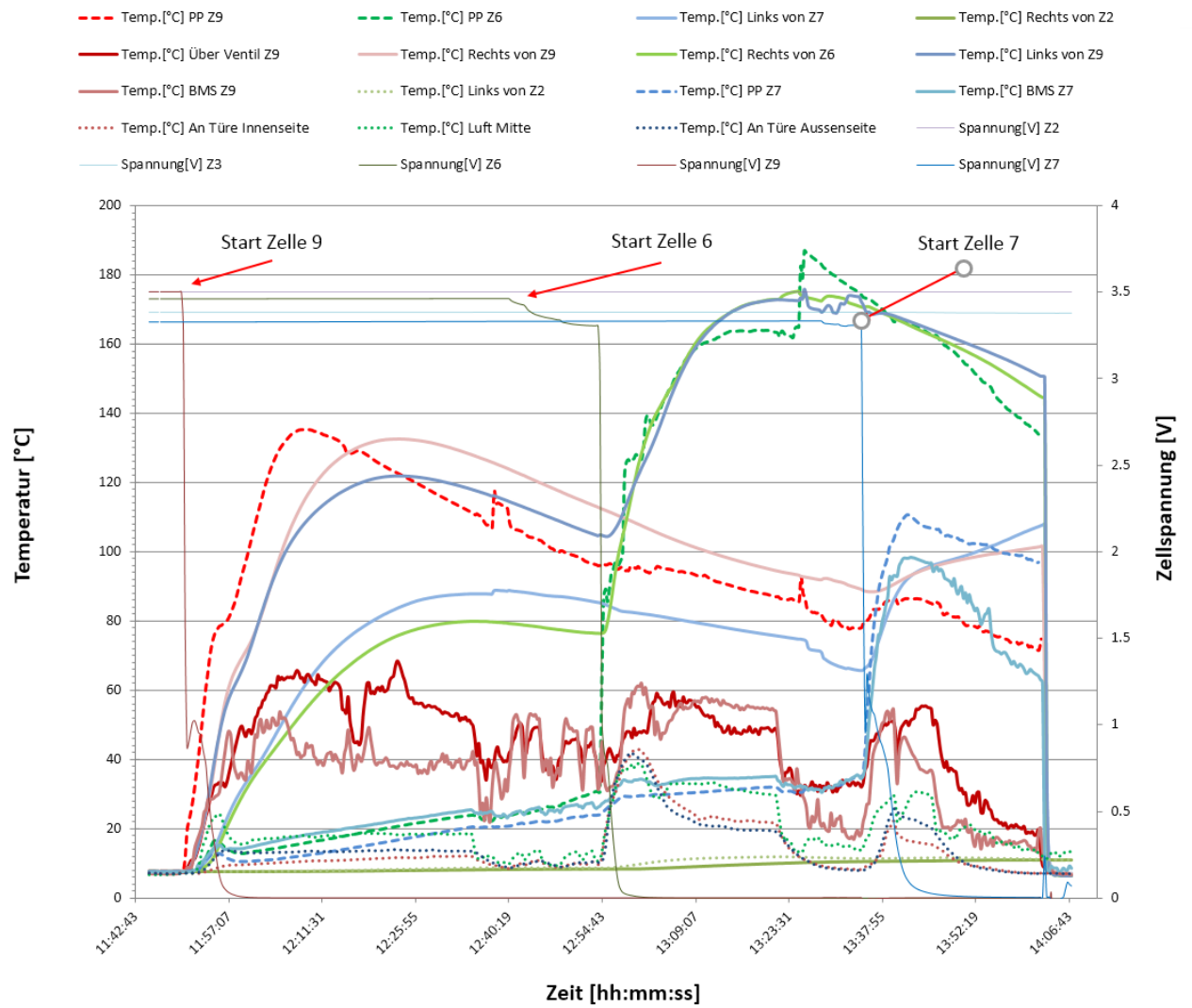


Abbildung A3.3 Temperaturen und Zellspannungen beim Ausbreitungstest, Kurzschluss in Zellen Z9, Z6 und Z7



Anhang B

Gefahrenanalyse

Langenbruck, 24. November 2016

Elektrische Sicherheit

- Akku-Nennspannung 48V
- Netzgeführter galvanisch getrennter Wechselrichter
Konformität Einspeisewechselrichter:
 - Richtlinien CEM 2004/108/CE : EN 61000-6-1, EN 61000-6-3, EN 55014, EN 55022, EN 61000-3-2, 62040-2
 - Niederspannungsrichtlinien 2006/95/CE : EN 62040-1-1, EN 50091-2, EN 60950-1
- Doppelte Netztrennstelle gemäss AR4105

Brandsicherheit

Die grösste Gefahr bezüglich Brandsicherheit bei einem Lithium-Ionen-Hausspeicher ist das Thermische Durchgehen einer oder mehrerer Zellen. Die Abläufe bei einem Thermischen Durchgehen einer Zelle sind im Bericht *Brandschutzforschung der Bundesländer; 2105, Kapitel 2.3* detailliert beschrieben.

Ein Thermisches Durchgehen kann durch Fehler im elektrischen System oder in seltenen Fällen auch spontan erfolgen. Die getroffenen Massnahmen, um diese Fehlerfälle zu verhindern oder die Auswirkungen zu minimieren, sind im Folgenden dargestellt.

Zellenversagen durch Fehler im elektrischen System

Der häufigste Grund für das Versagen einer Lithium-Eisenphosphat-Zelle ist ein Fehler im elektrischen System. Um diese Fehlerquelle zu minimieren hat das KIT einen *Sicherheitsleitfaden Li-Ionen-Hausspeicher* und eine Kurz-Checkliste für Li-Ionen-Heimspeicher entwickelt (Anhang A).

Der Stromspeicher SL-Home erreicht gemäss dieser Checkliste eine Punktzahl von 130. Somit kann gemäss Checkliste im vorliegenden Fall auf eine detaillierte Prüfung des elektrischen Systems verzichtet werden.

Im Folgenden sind die einzelnen Punkte der Checkliste kommentiert:

- 2 elektro-mechanische, stromlos offene Gleichstrom-Relais zur redundanten Abschaltung der Batterie

Zwischen Einspeisewechselrichter/Ladegerät und Akkumodul sind 2 elektro-mechanische, stromlos offene Gleichstrom-Relais zur redundanten Abschaltung des Akkumoduls installiert.

- Über- und Unterspannungsüberwachung auf Zellebene mit redundanter Auslösung der Batterieabschaltung



Jede Zelle wird auf Über- und Unterspannung überwacht. Dies erfolgt lokal auf Einzelzellenebene mittels je einem zueinander redundanten Software und Hardware Safety-Layer pro Zelle welche die entsprechende Einzelzelle abschalten. Weiter entscheidet die Master-Steuerung über die Abschaltung der Einzelzellen und des gesamten Akkumoduls.

- Einzelzelltemperaturüberwachung an jeder Zelle oder „Current Interrupt-Device (CID)“ in jeder Zelle

Eine Einzelzelltemperaturüberwachung ist auf der Master-Steuerung auf Softwareebene implementiert. Eine Sicherheitsabschaltung erfolgt durch einen zusätzlichen Software Safety-Layer lokal auf Einzelzellenebene.

- Sicherer Schutz vor einer Wiederinbetriebnahme nach Tiefentladung oder anderer signifikanter Schädigung der Batterie

Ein Schutz gegen Wiederinbetriebnahme nach Tiefentladung ist in der Master-Steuerung (Steuerungssoftware) implementiert. Auf lokaler Einzelzellenebene verhindert der jeweilige Hardware/Software Safety Layer das Einschalten der Einzelzelle ausserhalb des sicheren Spannungs/Temperatur-Bereichs.

- Keine ungesicherte, direkte Parallelschaltung von Zellen ohne „Current Interrupt Device (CID)“ in jeder Zelle

Zellen werden in Serie geschaltet.

- Aktive Stromregelung als Funktion von Zellspannung und Zelltemperatur

Eine aktive Stromregelung als Funktion von Zellspannung

und Zelltemperatur ist auf der Master-Steuerung auf Softwareebene implementiert.

- Metallisches, geschlossenes Batteriegehäuse, alternativ geschlossener Metallbatterieschrank

Der Schrank in dem sich die Akkus befinden ist aus Metall und geschlossen. Der Akkuschrank ist Staubdicht.

- Transport-Tests nach UN38.3 für das Batteriesystem bzw. für ein Batteriemodul

Nicht vorhanden für das gesamte Batteriesystem.

Spontanes Zellenversagen durch internen Kurzschluss

Ein interner Kurzschluss einer einzelnen Zelle kann trotz optimalen elektrischen und mechanischen Bedingungen nie komplett ausgeschlossen werden. Obwohl die verwendeten Zellen als Kathodenmaterial Lithiumeisenphosphat verwenden, das bei einem internen Kurzschluss deutlich weniger schnell reagiert als andere Kathodenmaterialien (z.B. Lithiumcobaltdioxid), ist im Falle eines internen Kurzschlusses mit einem Thermischen Durchgehen einer einzelnen Zelle zu rechnen.



Die verwendeten Zellen sind Second-Life Zellen, die vorgängig in den Zustellfahrzeugen der Post im Einsatz waren. Auch während des mobilen Einsatzes wurden die Zellen innerhalb der elektrisch zulässigen Grenzen bewirtschaftet. Dennoch ist davon auszugehen, dass die Wahrscheinlichkeit für ein spontanes Thermisches Durchgehen im Vergleich mit einer neuen Zelle erhöht ist. Über das Ausmass der erhöhten Wahrscheinlichkeit kann jedoch keine Aussage getroffen werden, da Systematische Untersuchungen dazu fehlen.

Um bei einem Thermischen Durchgehen eine Ansteckung der Nachbarzellen möglichst zu verhindern, sind die einzelnen Zellen mittels Zementfaserplatten gemäss *Abbildung 1* getrennt. So kann in der Regel verhindert werden, dass heisse Gase, Flammen oder ausgeworfene Flüssigkeit die Nachbarzelle oder deren Elektronik direkt beeinträchtigt.

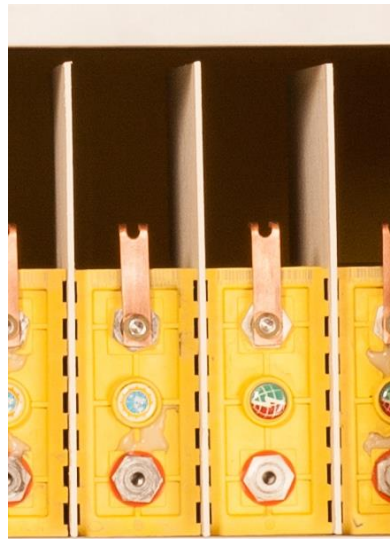


Abbildung B1: Zwischen den einzelnen Zellen reduziert eine Faserzementplatte das Risiko einer "Ansteckung" von weiteren benachbarten Zellen im Falle eines Thermischen Durchgehens einer Zelle.

Auswirkungen im Falle eines Thermischen Durchgehens einer Zelle vom Typ LYP100AHA

Energieinhalt elektrisch: 320 Wh (100 Ah, 3.2 V)

Energieinhalt thermisch: ca. 3 kWh *(gemäß *Brandschutzforschung der Bundesländer; 2015*)

Gasvolumenausstritt pro Zelle: ca. 440 l *

Austretende Stoffe: neben Fluorwasserstoff und Phosphorsäure auch giftige und kanzerogene Stoffe*

*(gemäß Bericht *Brandschutzforschung der Bundesländer; 2015*)

Kurz-Checkliste für Li-Ionen-Heimspeicher



Kurz-Checkliste für Li-Ionen-Heimspeicher

Technische Merkmale	Punktzahl
2 elektro-mechanische, stromlos offene Gleichstrom-Relais zur redundanten Abschaltung der Batterie	50
Über- und Unterspannungsüberwachung auf Zellebene mit redundanter Auslösung der Batterieabschaltung	10
Einzelzelltemperaturüberwachung an jeder Zelle oder „Current Interrupt-Device (CID)“ in jeder Zelle	20
Sicherer Schutz vor einer Wiederinbetriebnahme nach Tiefentladung oder anderer signifikanter Schädigung der Batterie	20
Keine ungesicherte, direkte Parallelschaltung von Zellen ohne „Current Interrupt Device (CID)“ in jeder Zelle	10
Aktive Stromregelung als Funktion von Zellspannung und Zelltemperatur	20
Metallisches, geschlossenes Batteriegehäuse, alternativ geschlossener Metallbatterieschrank	10
Transport-Tests nach UN38.3 für das Batteriesystem bzw. für ein Batteriemodul	10
Gesamtpunktzahl	

Wenn die Gesamtpunktzahl kleiner ist als 110, sollte das System detaillierter geprüft werden.

Die oben aufgeführten technischen Merkmale geben nur eine erste grobe Indikation zur Bewertung der sicherheitsrelevanten Baugruppen. Die Sicherheit wird darüber hinaus durch die Betriebsweise, den Aufstellungsort und die Installation beeinflusst und ist in jedem Fall separat zu prüfen. Zusätzlich müssen die geltenden internationalen Normen und Richtlinien (IEC, DIN EN, UN) erfüllt sein. Empfehlenswert ist ebenfalls die Zertifizierung gemäß Entwurf DIN EN 62619.