

1 Modulares Hochleistungsbatteriesystem

1.1 Entwicklung des modularen Batterieaufbaus

AKASOL AG

Um die Aufgabenstellung effizient und zielorientiert zu lösen, wurden im Projekt zwei Pfade parallel bearbeitet.

- a. Anwendung der neuen Lösungsansätze im Bereich Modularisierung, Brandschutz und BMS auf bestehende Modullösungen bei AKASOL
- b. Vorentwicklung eines neuen Moduls auf Basis von aktuellsten Zelltechnologien unter Einbringung der gesammelten Erkenntnisse

Die Abbildung 1.1 zeigt ein bestehendes Batteriesystem der AKASOL AG. Während der Bearbeitungszeit wurde auf dieser Basis ein modulares Batteriesystem aufgebaut, welches mittels Schnellladung betrieben wurde.



Abbildung 1.1: AKASYSTEM 15M-Trog

Bei der Entwicklung des Kopfelementes, einer Hochvolt-Verteilerbox (HV-Verteilerbox), welche es erlaubt mehrere parallele Batteriestränge miteinander zu verbinden und zu steuern, um die Anforderungen im Sinne der Modularität des Systems zu erfüllen, war das Absicherungskonzept von Bedeutung. Ebenso war die Fragestellung, wie viel Steuerungstechnik in welchem der beteiligten Elemente – Batterie-HV-Verteilerbox und Ladegerät – liegt, von Interesse. Die Bandbreite der Entwürfe für einen Lösungsansatz reichten von rein passiven Verteilerboxen mit Schmelzsicherungen bis hin zu aktiven Elementen mit Leistungsschützen und Steuergerät um Kommunikationsprotokolle zu implementieren. In Abstimmung mit den Partnern sowie durch Beobachtung der Marktanforderung-

en wurde an dieser Stelle eine Lösung unter Verwendung von aktiven Elementen geplant und umgesetzt.

Die Abbildung 1.2 zeigt den zweiten Ansatz. Dabei handelt es sich um ein neuartiges Rundzellenmodul der AKASOL AG, welches sich zu Beginn der Bearbeitungszeit in der Vorausentwicklung befand. Das Rundzellen Modul sollte ein kompatibles Format zu den aktuell produzierten Batterietrögen von AKASOL aufweisen. Die Vorteile von Rundzellen liegen in ihrer hohen Energiedichte. (Köllner 2021) Es wurden Konzepte favorisiert, welche eine möglichst optimale thermische Anbindung der Rundzellen an die Kühlung gewährleisten, um wie beim AKASOL AKM Modul leistungstechnisch neue Maßstäbe zu setzen.

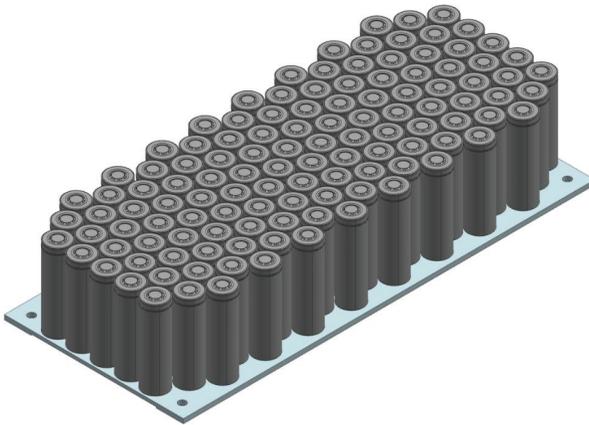


Abbildung 1.2: AKASOL Modul mit Rundzellen

Die Erkenntnisse aus dem Projekt MoBat waren für die Weiterentwicklung des Konzeptes elementar und wurden beispielsweise im Bereich der Modulsicherheit sowie der Möglichkeit zum modularen Aufbau übernommen.

Es wurden in diesem Projekt zwei unterschiedliche Modulkonfigurationen (Pouch-Zellen und Rundzellen) für das Gesamtsystem betrachtet und eine Entscheidung für das AKASYSTEM mit 15 Modulen getroffen. Basierend auf den guten Ergebnissen der Abuse-Tests, welche in diesem Projekt durchgeführt wurden (vgl. Abschnitt 3.5), wurde der Einsatz von Zellen mit einem Energieinhalt von 53 Ah dem der konventionellen Bauweise mit 46 Ah Zellen vorgezogen. Darüber hinaus wurden eine HV-Verteilerbox mit aktiven Absicherungseinrichtungen zur Verbindung der parallelen Batteriestränge entwickelt.

1.2 Auslegung hinsichtlich Energieinhalt und Leistungsfähigkeit

Wolfsburg AG

Als Ergebnis dieses Arbeitspaketes liegen die wichtigsten Parameter für die Einrichtung einer Elektro-Buslinie sowie die Auslegung des Batteriesystems und der Ladeinfrastruktur vor. Bei der Untersuchung wurde deutlich, dass entsprechend der betrachteten Anwendungen stets gegensätzliche Entwicklungen beachtet werden müssen:

Batteriegröße

Eine große Batterie verspricht eine große Autonomie hinsichtlich Reichweite. Diese steht erhöhten Kosten und einem erhöhten Batteriegewicht, d. h. auch einer geringeren Fahrgastzahl gegenüber. Eine Erhöhung der Fahrgastkapazität verursacht wiederum einen erhöhten Energiebedarf, darf jedoch die zugelassene Achslast nicht überschreiten.

Eingesetzte Ladetechnik

Bei der Betrachtung der einzusetzenden Ladetechnik spielt die zu erwartende Ladedauer eine entscheidende Rolle. Hierbei sind die Komplexität der aufzubauenden Ladeinfrastruktur auch hinsichtlich Kosten und Raumbedarf nicht außer Acht zu lassen. Die in diesem Arbeitspaket identifizierten Parameter fanden Eingang in das anschließend entwickelte Auslegungstool (vgl. Abschnitt 5.4). Dafür wurde in Liniendaten, Fahrzeugdaten, Daten für Ladeinfrastruktur und Kosten unterschieden.

Zu den *Liniendaten* zählen:

- Linientopologie mit GPS Koordinaten
- Linienlänge
- Geschwindigkeit des Fahrzeugs zu jedem Zeitpunkt der Messung
- Betriebliche Besonderheiten wie Taktzeiten, Einsatzzeiten, Pausen

Zu den *Fahrzeugdaten* zählen:

- Gewicht und Querschnittsfläche des Busses
- Luftwiderstand
- Maximaler State of Charge (SOC) oder Ladezustand eines Akkus
- Angabe zur Rekuperation

Daten für *Ladeinfrastruktur* sind:

- Batteriekapazität
- Ladeoptionen versus Opportunity Charging

anderen Zeitpunkt als „über Nacht“ in das Depot zurückkehren, um dann wieder eingesetzt zu werden.

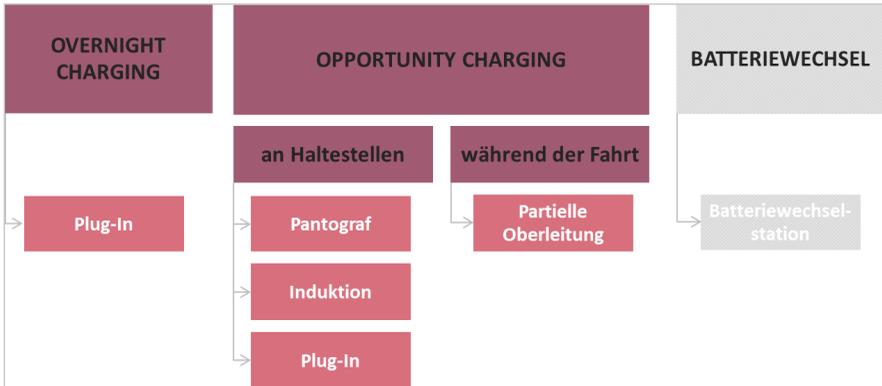


Abbildung 1.4: Ladeoptionen und Technologie

Beim Opportunity Charging können auch kurze Zeitfenster zum Laden genutzt werden. Diese Zeitfenster ergeben sich aus dem betrieblichen Einsatz der Busse und variieren in den Zeitpunkten ihres Auftretens über den Betriebstag sowie ihrer Dauer zum Teil erheblich. Die Standorte der potentiellen Ladepunkte liegen dabei im Verlauf der Linie, so dass kurze Unterbrechungen der Linienfahrt genutzt werden können, um Energie nachzuladen.

Das Auslegungstool bietet die Möglichkeit, über die Ausgabe technischer Parameter die Eignung einer Ladeoption in Abhängigkeit der einzusetzenden Anzahl der Fahrzeuge zu bestimmen. Ebenso wurde dabei auf die Übertragbarkeit der Anwendungen geachtet. Das Tool kann jede Art von Strecke als Quelle nutzen, jedoch müssen die Eingangsdaten stets einer gewissen Formatierung folgen. Somit wird sichergestellt, dass beispielsweise unterschiedliche Fahrzeugtypen auf unterschiedlichsten topografischen Verhältnissen untersucht werden können. Auch die Auslastung im Sinne von Zuladung kann so in unterschiedlichster Ausprägung in die Berechnung mit einfließen.

Vor dem Hintergrund der vereinfachten, mathematisch ausgerichteten Skriptsprache, der enormen Erweiterbarkeit durch sogenannte Toolboxes, der Möglichkeit einer nativ ausführbaren Auskopplung des entwickelten Skripts und der hohen Akzeptanz im wissenschaftlichen Bereich, ist die Wahl der Entwicklungsumgebung auf die Software MATLAB von Mathworks gefallen. Um eine verständliche und intuitive Bedienbarkeit gewährleisten zu können, wurde das Auslegungstool mit einer grafischen Benutzeroberfläche (GUI) ausgestattet. Dabei wird der Nutzer mit nachvollziehbaren Aufforderungen und Eingabemöglichkeiten auf dem Bildschirm durch den Berechnungsprozess geführt und ein, ohne

enormen Aufwand auswertbares Ergebnis, geliefert. Der Nutzer muss sich somit lediglich auf einer Ebene mit dem Software-Tool auseinandersetzen, die keine tiefergehenden Programmierkenntnisse erfordert.

Betrachtete Anwendungsfälle

Unterschiedliche Buslinien des ÖPNV wurden mithilfe des im Projekt entwickelten Software-Tools auf ihre Tauglichkeit der Elektrifizierung überprüft. Hierbei wurde zunächst auf die einzelnen Strecken und ihre Herausforderungen eingegangen. In den Bewertungsabschnitten der Ergebnisse des Abschnitts 5.4 werden zu Beginn alle Buslinien nach Batteriegröße und Ladeinfrastruktur ausgelegt und anschließend auf ihre Plausibilität analysiert. Die Ergebnisse, welche sich zur Auslegung und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen für verschiedene Anwendungsfälle aus den Untersuchungen ergeben haben, sind in Abschnitt 5.4 dargestellt.

1.3 Fertigung der Batteriemodule mit faseroptischer Sensorik

Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut und AKASOL AG

In einem ersten Schritt wurde das genaue Ausdehnungsverhalten der für den Projektinhalt verwendeten Batteriezellentypen detailliert charakterisiert. In Abstimmung mit dem Projektpartner AKASOL AG wurde eine Lithium-Ionen-Batteriezelle des koreanischen Herstellers KOKAM mit einem flexiblen Hüllmaterial in Form einer Aluminiumverbundfolie mit den Kunststoffaußenschichten Polyamid und Polypropylen ausgewählt. Neben der verfügbaren Zyklenzahl und den Energie- sowie Leistungsparametern waren für den Industriepartner vor allem der kapazitätsbezogene Preis und die Lieferverfügbarkeit entscheidend. Das Kathodenmaterial der betreffenden Zelle besteht aus einem Kristallkomplex mit den Einzelstoffen Nickel, Cobalt und Mangan. Mit vergleichbaren Batteriezellen der identischen Innenchemie wurden am HHI im Vorfeld zu diesem Projekt bereits faseroptische Dehnungs- und Temperaturfelduntersuchungen durchgeführt, welche zu Projektstart anhand der zur Verfügung gestellten Energiespeicherlastprofile wiederholt wurden, um die zu erwartenden, späteren Anforderungen an die zur Zustandsüberwachung eingesetzten Lichtwellenleiter abschätzen zu können.

Für die optische Zustandsüberwachung wurden die Testzellen jeweils mit drei Messstellen, bestehend aus einem photonischen Dehnungs- und einem Temperatursensor, versehen. In Abbildung 1.5 ist eine im Rahmen der Voruntersuchungen charakterisierte, mit der KOKAM-Zelle weitestgehend identische Lithiumionenbatteriezelle abgebildet. Die Oberfläche ist mit einem Glasfaserstrang versehen, in welchem sechs Einzelfaser-Bragg-Gitter integriert sind. Die Zustandsgrößenerfassung erfolgt stets paarweise mithilfe jeweils eines faseroptischen Dehnungs- und eines Temperatursensors. Dank der unterschiedlichen charakteristischen Reflexionswellenlängen der einzelnen Sensorteilstellen kann eine simultane Echtzeitüberwachung durchgeführt werden.

Während die Dehnungsmessstellen (ϵ) fest mit der Zelloberfläche mechanisch gekoppelt sind, befinden sich die Temperaturmessstellen (T) von Kräfteinflüssen geschützt und mechanisch entkoppelt in einem wärmeleitfähigen Röhrchen. Die Messposition 1 detektiert vor allem den Ort der größten Abwärmeentwicklung zwischen den beiden Ableitern, wodurch kritische thermische Zustände frühzeitig erkannt werden können. Demgegenüber befindet sich Messposition 2 im Zellzentrum, wo mit der größten Ausdehnung zu rechnen ist und somit die genaue Ladezustandsanalyse sowie Degradationserkennung begünstigt werden.

Da die Einzelzellen zu einem späteren Zeitpunkt auch im Verbund überwacht wurden und sich gegebenenfalls bei gleichzeitig auftretender, starker Ausdehnung gegenseitig beeinflussen könnten, wurde mit Messposition 3 eine zusätzliche Stelle mit eingeplant, wo im Vergleich mit Position 1 und 2 zwar eine geringfügigere Signaländerung zu erwarten war, jedoch die Quereinflussung bei gleichzeitig auftretenden Volumenveränderungs-

vorgängen deutlich reduziert ist. Die gleiche Messanordnung wurde auch für die im Modul verbauten Zellen angewendet. Die Voruntersuchungswerte waren mit den Analysen aus der Modulnormalzyklisierung und den angedachten Extremtests, wo zum Teil zusätzliche Schutzlösungen der Firma Stöbich technology GmbH zum Einsatz kamen (vgl. Abschnitt 3.5), vergleichbar.

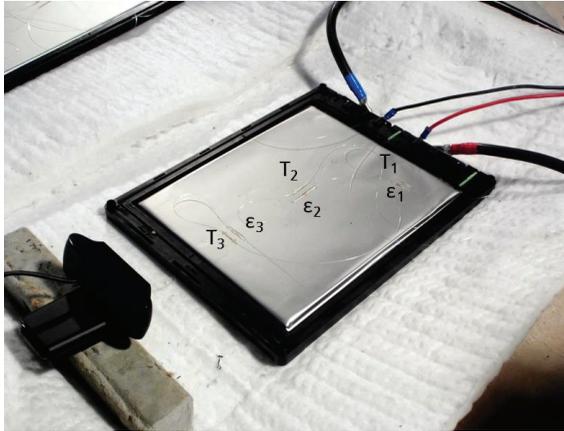


Abbildung 1.5: Lithiumionenbatteriezelle mit flexiblem Hüllenmaterial

Wie bereits angedeutet, wurde das optische Reflexionssignal, bestehend aus drei Temperatur- und drei Dehnungsstellen, zeitgleich mithilfe eines Spektrometers ausgewertet. In Abbildung 1.6 ist ein Signalspektrum einer Einzelzelle grafisch aufgetragen.

Die zu den jeweiligen Amplituden gehörenden Faser-Bragg-Gitter (FBG) wurden unter Verwendung identischer Herstellungsparameter (Laserpulsenergie, -wiederholungsrate und -frequenz) gefertigt, um eine gleichwertig sensitive Messwertaufnahme gewährleisten zu können. Alle Einzel-Bragg-Gitterpunkte befinden sich in der Mitte des lichtleitenden Faserkerns, wodurch die Empfindlichkeit von Quereinflüssen reduziert ist. Da aufgrund des vom Fraunhofer Henrich-Hertz-Instituts entwickelten Herstellungsverfahrens die charakteristische Wellenlänge der Faser-Bragg-Gitter individuell eingestellt werden kann, ist auch die Anzahl der Sensorstellen je Glasfaserstrang flexibel festlegbar. Der begrenzende Faktor liegt hierbei vor allem in der Bandbreite der verwendeten Lichtquelle. Abhängig von den zu erwartenden Dehnungs- und Temperaturänderungen muss zwischen den Reflexionsamplituden ein Mindestwellenlängenabstand verfügbar sein, sodass die Zentralwellenlängen in jedem Anwendungsfall problemlos vom optischen Auswerteprogramm unterschieden werden können. Nichtsdestotrotz kann die Anzahl an Faser-Bragg-Gittern in einem Strang bei Bedarf entsprechend angepasst werden.

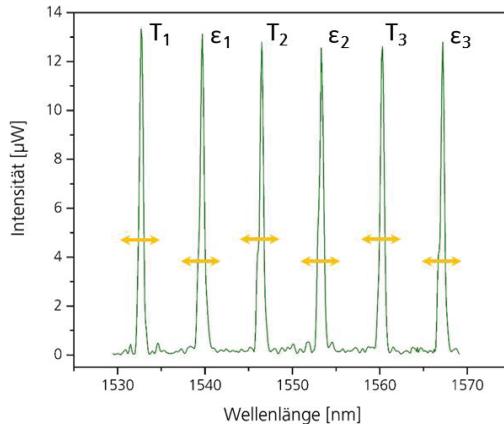


Abbildung 1.6: Reflexionsspektrum von sechs Faser-Bragg-Gittern

Dargestellt ist das Reflexionsspektrum von sechs Faser-Bragg-Gittern, die zur gleichzeitigen Auswertung von jeweils drei Dehnungs- (ϵ) und drei Temperaturmessstellen (T) für die Zustandsüberwachung von Batteriezellen verwendet wurden. Die charakteristischen Zentralwellen sind so gewählt, dass auch bei starken, mit einer deutlichen Wellenlängenverschiebung einhergehenden Dehnungs- oder Temperaturänderungen an einzelnen Messstellen die Amplituden voneinander unterschieden werden können. In den Vorversuchen erfolgte die optische Charakterisierung noch in einem Wellenlängenbereich von 1550 nm. Im Verlauf des Forschungsprojektes erfolgt die Umstellung auf den Bereich von 850 nm, da hier deutlich günstigere Komponenten hinsichtlich der Lichtemission und -detektierung verfügbar waren.

Um das im Normalzyklisierbetrieb zu erwartende faseroptische Dehnungs- und Temperatursignal der für das Projekt ausgewählten Zelltypen evaluieren zu können, wurden gleichsam zu Abbildung 1.5 entsprechende Zellen mit Glasfasern ausgestattet, in welche davor Faser-Bragg-Gittersensoren integriert wurden. Wichtig ist dabei, dass das Aufbringen der mechanisch gekoppelten Dehnungssensoren im entladenen Zustand durchgeführt wird, damit mit Sensorstellenstauchungen einhergehende, undefinierbare Signalverläufe beim volumenmäßigen Schrumpfen des Zellkörpers verhindert werden können. Während der anschließenden Zyklisierung bei einer Umladestromrate von 0,5C erfolgte zunächst die Aufnahme charakteristischer Verhaltensmuster, die abhängig vom Ladezustand auftreten. In Abbildung 1.7 sind die Profilbilder der Kapazität, Spannung und Stromstärke des 11. bis 13. Umladezyklus einer Litarion Nickel-Mangan-Cobalt-Oxide-Batteriezelle aufgetragen. Aus Gründen der Zellnormierung wurden während der ersten zehn Zyklen keine Messungen durchgeführt. Die Kapazität der verwendeten Zelle beträgt 40 Ah. Dargestellt sind jeweils drei Lade- und Entladeteilzyklen, zwischen welchen stets

eine stromfreie Pause von einer Stunde eingefügt wurde. Das Spannungsfenster wurde auf den Bereich zwischen 3,0 V und 4,2 V festgelegt, der aufgegebene Lade- beziehungsweise Entladestrom betrug während der Gleichstromphase 20 A, wobei ab einer Unterschreitung von 2 A in der Gleichspannungsphase die Umladung jeweils abgebrochen wurde.

Gleichzeitig zu den elektrischen Werten aus Abbildung 1.7 wurden mithilfe der faseroptischen Sensoren und einer Spektrometersauswerteeinheit die photonischen Dehnungs- und Temperaturfeldsignale aufgenommen. Da die Dehnungssensoren fest an die Zelloberfläche gekoppelt sind, wird durch diese sowohl die Dehnungs- als auch die Temperaturinformation übertragen. Zur Trennung der Signale eines Sensorpaars wird die von der Temperaturmessstelle detektierte Wellenlänge von der Gesamtwellenlängenänderung der Dehnungsmessstelle subtrahiert, sodass das reine Dehnungssignal herausgestellt werden kann. Auf die physikalischen Umrechnungen der Reflexionswellenlängenänderung hin zu einem Dehnungs- beziehungsweise Temperaturwert soll an dieser Stelle mit dem Verweis auf (Marowsky 2015) nicht eingegangen werden.

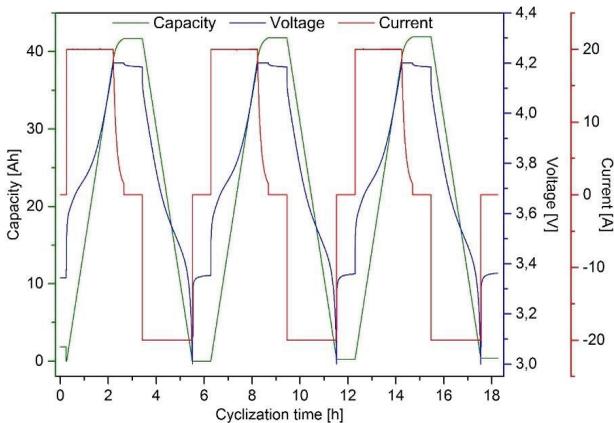


Abbildung 1.7: Elektrisches Profilbild einer Litarion-Lithiumionenbatterie zelle mit dem Kathodenmaterialkomplex Nickel-Mangan-Cobalt-Oxide

Die voneinander getrennten Signalbestandteile sind in Abbildung 1.8 aufgeführt, wobei die Abszissenachse mit der von Abbildung 1.7 identisch ist. Über die Außenmaße der Zelle kann aus der Einheit $[\mu\text{m}/\text{m}]$ die Gesamtvolumenausdehnung während der Zyklisierung nach Bedarf ausgerechnet werden.

Bei dem durchgeführten Experiment ist zu beachten, dass die Kammertemperatur im Zyklisierstand konstant bei 16 °C gehalten wurde und entstandene Abwärme sehr effektiv abgeführt werden konnte. Im Zellverbund sind daher höhere Temperaturspitzen zu