

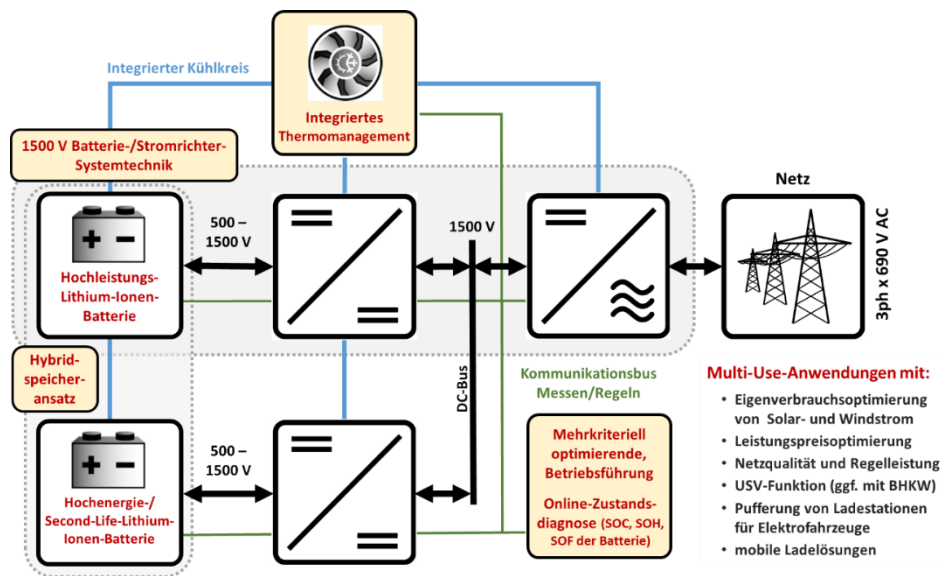
Förderprojekt Abschlussbericht

Zum Teilvorhaben der BorgWarner Akasol GmbH

Förderkennzeichen: 03EI3009A
(für Veröffentlichung gekürzte Version)

Hybride Lithium-Ionen-Batteriespeicherlösung mit 1500 V Systemtechnik, innovativem Thermomanagement und optimierender Betriebsführung

„HYBAT“



Autoren:
M.Sc. Jan Neunzling
Dr.-Ing. Andreas Vath
Dr.-Ing. Björn Eberleh

Datum:
28.03.2024

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Zuwendungsempfänger BorgWarner AKASOL GmbH	Förderkennzeichen 03EI3009A
Vorhabenbezeichnung HYBAT – Hybride Lithium-Ionen-Batteriespeicherlösung mit 1500 V Systemtechnik, innovativem Thermomanagement und optimierender Betriebsführung	
Laufzeit des Vorhabens 01.01.2020 – 30.09.2023	
Berichtszeitraum Abschlussbericht Teilvorhaben AKASOL	

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03EI3009A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	5
1. Aufgabenstellung.....	6
2. Voraussetzung des Vorhabens	7
3. Planung und Ablauf des Vorhabens.....	9
4. Wissenschaftlicher und technischer Ausgangsstand	10
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	11
6. Ergebnisse und Verwendung der Zuwendung.....	11
6.1 AP 1 – AP 1 Anforderungsanalyse und Systemspezifikation.....	11
6.2 AP 2 – Entwicklung und Aufbau der Leistungselektronik.....	14
6.3 AP 3 – Batteriemodul- und Batteriesystementwicklung.....	15
6.3.1 AP 3.1 – Batterie Konzeptentwicklung.....	15
6.3.2 AP 3.2 – Konstruktion Entwicklungsmuster.....	20
6.3.3 AP 3.3 – Beschaffung und Aufbau Entwicklungsmuster.....	21
6.3.4 AP 3.4 – Inbetriebnahme und Test Entwicklungsmuster.....	21
6.3.5 AP 3.5 – Überarbeitung und Konstruktion des Labormusters.....	25
6.3.6 AP 3.6 – Beschaffung und Aufbau Labormusters.....	26
6.4 AP4 – Integriertes Thermomanagement.....	27
6.5 AP5 – Hybridspeicher mit optimierender Betriebsführung	27
6.6 AP6 – Entwicklung Online-Zustandsdiagnose-Konzept	27
6.7 AP7 – Aufbau Labormuster und Inbetriebnahme	28
6.8 AP8 - Charakterisierung Labormuster mittels praktischer Einsatz-szenarien	33
6.9 AP9 - Systemanalyse und Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen ..	34
6.10 Zusammenfassung und Fazit	34
7. Wichtigste Positionen Zahlenmäßigen Nachweises	36
8. Voraussichtlicher Nutzen – Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des Fortgeschriebenen Verwertungsplan	37
9. Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt aus dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	38
10. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse ...	38
11. Literaturverzeichnis.....	40

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: PROJEKTSTRUKTUR MIT NEUN ARBEITSPAKETEN (LEITUNG DER JEWELIGEN APS IN KLAMMERN)	9
ABBILDUNG 2: SYSTEMKONZEPT: HYBRIDE LITHIUM-IONEN-BATTERIESPEICHERLÖSUNG MIT INNOVATIVEN MERKMALEN (GELB/ROT)	13
ABBILDUNG 3: ULTRA-HIGH-ENERGY BATTERY SYSTEM	14
ABBILDUNG 4: VERGLEICH DER HOCHLEISTUNGSSYSTEME BEZÜGLICH ENERGIE- UND LEISTUNGSDICHTE	19
ABBILDUNG 5: VERGLEICH DER HOCHLEISTUNGSSYSTEME BEZÜGLICH KOSTEN UND LEISTUNGSDICHTE	19
ABBILDUNG 6: AUFBAU FÜR LEISTUNGSTESTS DER HOCHLEISTUNGSMODULE AUF BASIS VON 12 POUCHZELLEN	21
ABBILDUNG 7: TEMPERATURVERLAUF INNERHALB DES MODULS BEI MAXIMALER LEISTUNG	22
ABBILDUNG 8: TESTAUFBAU FÜR DIE MESSUNG DES TEMPERATURVERLAUF AN VERSCHIEDENEN STELLEN DES MODULS	23
ABBILDUNG 9: MODULAUFBAU FÜR PROPAGATIONSTESTS DURCH ÜBERHITZEN EINER ZELLE OHNE KÜHLUNG	25
ABBILDUNG 10: EINZELNE HALTERUNG ZUM STAPELN DER DREI BATTERIEPACKS	26
ABBILDUNG 11: GESTAPELTE BATTERIEPACKS UND ULTRA-HOCH-ENERGIE-BATTERIESYSTEM	26
ABBILDUNG 12: ERWEITERTE VERSION DES CAN-PANELS ALS SCHNITTSTELLE ZU JEDEM TEILSYSTEM	29
ABBILDUNG 13: DEWETRON-COCKPIT ZUR VISUALISIERUNG DER MESSWERTE	30
ABBILDUNG 14: LEISTUNGSREGLER DER DC/DC-WANDLER	31
ABBILDUNG 15: STROMREGLER DER DC/DC-WANDLER	31
ABBILDUNG 16: EINGEPRÄGTER SINUSSTROM MIT 1 HZ	32
ABBILDUNG 17: EINGEPRÄGTER SINUSSTROM MIT 86 HZ	32
ABBILDUNG 18: EINGEPRÄGTER SINUSSTROM MIT 3 KHZ	33

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: TECHNISCHE DATEN SYSTEMKONZEPT A „15 AKM 57 POC“	16
TABELLE 2: KONZEPTE MIT PHEV2 MODULEN	17
TABELLE 3: KONZEPT C AUF BASIS VON HOCHLEISTUNGSRUNDZELLEN 21700.....	18

1. Aufgabenstellung

Ziel des Verbundvorhabens ist die Entwicklung einer hybriden Lithium-Ionen-Batteriespeicherlösung mit reduzierten Gesamtsystem- und Betriebskosten durch 1500 V Systemtechnik, innovatives Thermomanagement, Online-Zustandsdiagnose und mehrkriteriell optimierende Betriebsführung.

Im Zuge der Energiewende und der damit einhergehenden Umstellung der Energieversorgung auf fluktuierende erneuerbare Energien spielen Energiespeicher eine zentrale Rolle [Aus19]. Treiber dieser Entwicklung ist auch die starke Kostendegression der Lithium-Ionen-Batterietechnologie [Gol19]. Dieser Trend wird sich durch die Entwicklung des Massenmarkts „Elektromobilität“ auf Zellebene fortsetzen [Cam19]. Dennoch sind die verwendeten Batteriemodule ein Hauptkosten-treiber. Der Trend zu Hochvoltssystemen mit höheren Lade- und Entladeleistungen wirkt der Kostendegression auf Zellebene entgegen. Durch die sinkenden Zellpreise fallen außerdem die Kosten für den Systemaufbau (Batteriemodule, Leistungselektronik, Thermomanagement) immer stärker ins Gewicht. Eine signifikante Reduzierung der Kosten von Batteriespeichersystemen ist daher nur über ganzheitliche, komponentennahe und systemtechnische Ansätze möglich.

Ziel des Verbundvorhabens HYBAT ist die Entwicklung einer kostenoptimierten hybriden Lithium-Ionen-Batteriespeicherlösung mit 1500 V Systemtechnik, innovativem Thermomanagement, Online-Zustandsdiagnose und mehrkriteriell optimierender Betriebsführung für eine breite Palette von Multi-Use- und Second-Life-Batterieanwendungen. Es werden u.a. Anwendungen aus den Bereichen Eigenverbrauchs- und Stromkostenoptimierung, Pufferung von Ladestationen für Elektrofahrzeuge, USV-Funktion, Netzqualitätssteigerung, Regelleistung sowie mobile Ladelösungen untersucht. Die Realisierung einer 1500 V Batteriesystemtechnik bietet entscheidende Vorteile durch eine gesteigerte Leistungsdichte und reduzierte Systemkosten. Die Entwicklung eines ganzheitlichen Thermomanagements soll eine effiziente und bedarfsgerechte Temperierung der Batteriesysteme sowie eine optimale Kühlung der Leistungselektronik sicherstellen. Weiterhin werden die Vorteile und Einsatzmöglichkeiten des Hybridspeicherkonzepts zur Steigerung von Effizienz und Leistungsfähigkeit herausgearbeitet und mit einer Online-Zustandsdiagnose kombiniert.

Aus den Kernzielen heraus wurden für BorgWarner Akasol spezifische Ziele definiert.

- Bewertung der aktuell in der Entwicklung befindlichen Batterietechnologien (Titanat-Elektrode, Solid-State-Batterien, aktuelle nickelreiche NMC-Technologien). Dies ist nötig, da nach wie vor eine hohe Dynamik im Bereich der Zelltechnologie herrscht und die Zelle der grundlegende Baustein im Leistungspfad ist
- Integration einer aktiven Kühlung und eines integrierten Thermomanagements im Konsortium (konstruktiver Aufbau, Kühlkonzept, Temperaturmessstellen, etc.)
- Schnellladefähigkeit unter Berücksichtigung der Alterung (Ziel: homogene Temperaturverteilung, gleichmäßige Alterung, Vermeidung von Lebensdauereinbußen)
- Optimierung Batteriemangement-Architektur unter Verwendung neuester IC-Lösungen
- Verbesserung der Online-Zustandsdiagnose auf Zell-, Modul- und Batterieebene
- Durch die Kombination der unterschiedlichen Maßnahmen soll auch eine nennenswerte Kostenreduktion erreicht werden.

Im nachfolgenden Bericht wird schwerpunktmäßig auf die Zielstellung von BorgWarner Akasol eingegangen. Die detaillierten Ergebnisse der weiteren Partner Fraunhofer ISE, TU Dresden und HYDAC sind in deren Abschlussberichten zu finden.

2. Voraussetzung des Vorhabens

BorgWarner ist seit über 130 Jahren weltweit führend in der Produktentwicklung tätig und beliefert nahezu alle großen Automobilhersteller mit innovativen Technologien. Die BorgWarner AKASOL GmbH ist ein führender Hersteller von Hochleistungs-Lithium-Ionen-Batteriesystemen für Busse, Nutzfahrzeuge, Schienenfahrzeuge, Industrie-fahrzeuge, sowie für Schiffe und Boote. Mit fast 30 Jahren Erfahrung ist BorgWarner AKASOL ein Pionier in der Entwicklung und Herstellung von Lithium-Ionen-Batteriesystemen für kommerzielle Anwendungen.

Mit Unternehmenssitz in Deutschland betreibt BorgWarner AKASOL GmbH in Darmstadt und Langen (Hessen) Fertigungsanlagen für die Serienproduktion von Batteriesystemen für Nutzfahrzeuge. Die Systeme von BorgWarner AKASOL werden gemäß Anforderungen der Branchenstandards führender OEM-Kunden gefertigt. BorgWarner AKASOL verfügt über ein technologieunabhängiges Produktportfolio. Dies ermöglicht es dem

Unternehmen, an den individuellen Kundenbedürfnissen orientiert, die besten Batteriezellen und die beste Batteriechemie einzusetzen.

BorgWarner AKASOL ist bereits in der Entwicklung von Hochenergie- und Hochleistungsbatterien tätig. Dennoch stellen die hier zu entwickelten verschiedenen Batteriesysteme eine große Herausforderung dar. Hier ist das Ziel zum einen eine möglichst hohe Leistungsdichte mit hoher Zyklenfestigkeit zu erreichen und zum anderen eine Batteriesicherheit über dem Stand der Technik zu erreichen. So müssen beispielsweise bei der Propagation einer Einzelzelle (Durchgehen der Zelle) die Ausbreitung auf benachbarte Zellen oder Module innerhalb des Batteriepacks verhindert werden. Dies ist in Tests unter den verschiedenen Testbedingungen nachzuweisen.

Am Stammsitz in Darmstadt steht Akasol eine der modernsten Testumgebungen in Europa für Analyse- und Prüfverfahren für Batterietechnologie zur Verfügung. Das Testcenter umfasst insgesamt sechs Prüf- und Technikräume, in denen Batteriezellen und -module sowie komplette Batteriesysteme und Antriebsstränge umfangreichen Testverfahren unterzogen werden können.

Im Projekt HYBAT wurden von BorgWarner AKASOL verschiedene Batteriemodule und Systeme aufgebaut und nach den verschiedenen Kriterien getestet. Des Weiteren wurden verschiedene Batteriesysteme in den stationären Energiespeicherversuchsaufbau am ISE integriert, mit dem dann das Verhalten eines hybriden stationären Speichers getestet wurde. Durch dieses Projekt konnten wichtige Erkenntnisse über die Leistungsfähigkeit, das Sicherheitsverhalten von Batteriezellen, -modulen und -systemen gewonnen werden, welche im Feldeinsatz genutzt werden können.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Verbundprojekt HYBAT wurde in enger Zusammenarbeit mit den Partnern Fraunhofer ISE, HYDAC Cooling GmbH und der TU Dresden durchgeführt und gliedert sich in die neun Arbeitspakete, die in Abb. 1 dargestellt sind.

Die BorgWarner Akasol GmbH übernahm das Projektmanagement und für zwei der Arbeitspakete die Leitung, AP1 „Anforderungsanalyse und Systemspezifikation“ sowie AP3 „Batteriemodul und Batteriesystementwicklung“.

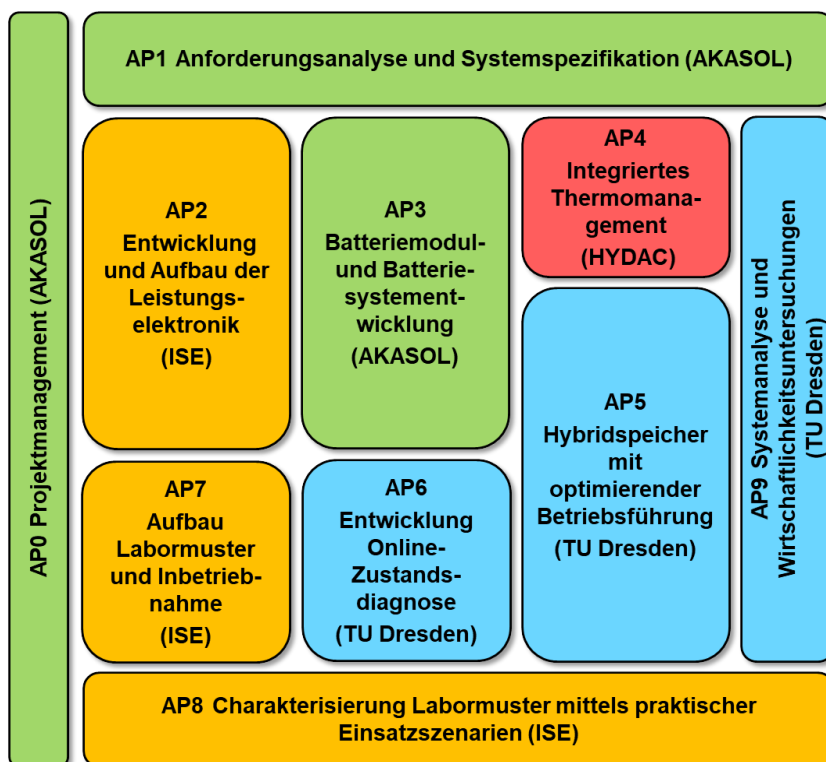


Abbildung 1: Projektstruktur mit neun Arbeitspaketen (Leitung der jeweiligen APs in Klammern)

Um die im Projekt HYBAT gesteckten Ziele zu erreichen, wurde eine Projektlaufzeit von 3 Jahren, im Zeitraum von 01. Januar 2020 bis 31. Dezember 2023, vorgesehen. Während der Projektlaufzeit kam es aus verschiedenen Gründen zu Verzögerungen, primär jedoch die Corona Pandemie zwischen 2020 – 2022 und damit verbundenen Lieferschwierigkeiten von Bauteilen sowie fehlenden Testmöglichkeiten. Die Verzögerung konnte durch eine kostenneutrale Verlängerung des Projektes aufgefangen werden. Zusätzlich sind die Rohstoffkosten insbesondere für die Herstellung von Nickel-Mangan-Cobalt Batterien um ein Vielfaches gestiegen und zum anderen hat sich die Energiedichte und Leistungsdichte von Lithium-Eisen-Phosphat (LFP) Batterien deutlich verbessert, so dass diese LFP Batterien aus heutiger Sicht sehr gut für stationäre Speicher geeignet sind. Diese Tatsache

führt zur Anpassung von einem Arbeitspaket (Arbeitspaket 3) im gesamten Projekt, jedoch ohne dass die übergeordneten Projektziele angepasst werden mussten. Im Arbeitspaket 3 wurden alle notwendigen Aufbauten und Tests mit Batteriezellen und Modulen durchgeführt, so dass auf dieser Basis sehr gut das Verhalten des Gesamtsystems prognostiziert werden konnte ohne dies zusätzlich aufzubauen zu müssen. Dies wurde in einem Änderungsantrag angezeigt, der auch genehmigt wurde, was dann zu einer Reduzierung der Projektkosten bei BorgWarner Akasol von 1.505.292 Mio € auf ca. 1.008.870 € geführt hat.

4. Wissenschaftlicher und technischer Ausgangsstand

Lithium-Ionen-Batterien sind sowohl bei mobilen Applikationen wie Bussen, Lastkraftwagen, Baufahrzeugen, als auch bei stationären Anwendungen wie Energiespeicher für die Stromversorgung die primäre Lösung, mit stark steigendem Volumen. Zur Steigerung der Leistungsfähigkeit und Effizienz sowie zur Reduzierung der Gesamtsystem- und Betriebskosten werden im Vorhaben innovative Lösungen und Untersuchungen in den Bereichen 1) Batteriesystemtechnik (1500 V-Technologie, ganzheitliches Temperaturmanagement von Batterie und Stromrichtern, Online-Zustandsdiagnose) und 2) Hybridspeichersystem (Kopplung von Hochenergie-/Hochleistungsbatterien oder neuen/gealterten Batterien, mehrkriteriell optimierende Betriebsführung, Simulations-/Dimensionierungswerkzeug für Gesamtsystemlösung) für eine breite Palette von Multi-Use- und Second-Life-Anwendungen erarbeitet. Beide Bereiche sind eng verzahnt, so dass Synergien durch einen ganzheitlichen Lösungsansatz ausgenutzt werden können.

Die Antragsteller sehen Forschungs- und Entwicklungsbedarf insbesondere in der Überführung der 1500 V Technologie in den Bereich der Batteriemodule und der Leistungselektronik. Thermisches Management, Hybridspeicheransatz, Online-Zustandsdiagnose und mehrkriteriell optimierende Betriebsführung spielen für die Kosteneffizienz, die Langlebigkeit und die Leistungsfähigkeit der hybriden Batteriespeicherlösung eine entscheidende Rolle.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Projekt wurde als Verbundprojekt mit den folgenden Projektpartnern durchgeführt:

- BorgWarner AKASOL AG (Projektschwerpunkt: Batterie, Konsortialführung)
- HYDAC Cooling GmbH (Projektschwerpunkt: Kühlsystem)
- TU Dresden (TUD) (Projektschwerpunkt: Übergeordnete Betriebsführung)
- Fraunhofer ISE (Projektschwerpunkt: Leistungselektronik)

Die Forschungsergebnisse des Verbundvorhabens "HYBAT" werden in den einzelnen Schlussberichten der jeweiligen Partner detailliert erläutert.

6. Ergebnisse und Verwendung der Zuwendung

Das Förderprojekt wurde in insgesamt neun Arbeitspakete + Projektmanagement aufgeteilt siehe **Abbildung 1** mit verschiedenen Schwerpunkten und Haupt- und Nebenverantwortlichkeiten. BorgWarner Akasol hatte bei den Arbeitspaketen AP1 und AP3 die Hauptverantwortlichkeit und wurde in den anderen Arbeitspaketen AP1, AP6, AP7 und AP8 als aktiver Projektpartner vorgesehen. Nachfolgend werden die Tätigkeiten in den einzelnen Arbeitspaketen beschrieben.

6.1 AP 1 – AP 1 Anforderungsanalyse und Systemspezifikation

In AP1 wurden die grundsätzlichen Anforderungen an die hybride Lithium-Ionen-Batteriespeicherlösung im Bereich stationärer Multi-Use- und Second-Life-Anwendungen analysiert. Der Fokus bei der BW Akasol GmbH lag hierbei auf der Marktanalyse der zur verfügbar stehenden Energiespeicher und der Definition des Energiespeichersystems für den in diesem Projekt aufzubauenden Prüfstand bestehend aus zwei verschiedenen Energiespeichern – einem Hochenergiespeicher und einem Hochleistungsspeicher.

AP 1.1 - Anforderungsanalyse

Im Rahmen der Anforderungsanalyse für die Entwicklung eines Hochleistungs-Lithium-Ionen-Batteriespeichers wurden aktuell verschiedene Lithium-Ionen Zelltechnologien wie NMC, LFP, LTO und LPCO und Zellformate wie pouch, prismatisch und zylindrisch miteinander verglichen. Dabei zeigt sich jetzt schon, dass Systeme auf Basis der LFP Technik die günstigsten Systemkosten in €/kWh vermutlich erreichen lassen, aber

deutliche Nachteile gegenüber den NMC Technologien haben. Bei dem Vergleich der Zellen auf Basis der NMC Technologien in den unterschiedlichen Formaten für High-Power Anwendungen haben Pouch-Zellen tendenziell eine höhere Zyklenfestigkeit gegenüber den Rundzellen. Vergleicht man dann wieder die Kosten der Hochleistungszellen für Pouch mit den 21700 Rundzellen, so könnten die Systeme auf Basis einer Hochleistungsrundzelle vermutlich kostengünstiger sein. Parallel zu den Zellformaten und der Zellchemie werden die Möglichkeiten einer höheren Systemspannung der Batteriesysteme untersucht. Hier wurden bereits die aktuellen Limitierungen für höhere Systemspannungen wie Isolationsfestigkeit der Module, Spannungsfestigkeit der verwendeten Schütze, Isolationsabstände und Spannungsfestigkeit der Batteriemanagerunit erarbeitet.

AP 1.2 - Simulationsgestützte techno-ökonomische Untersuchung unterschiedlicher Systemkonfigurationen, Bewertung und Gesamtspezifikation

Zur Beschreibung der wesentlichen techno-ökonomischen Aspekte für die Systemanalyse und Dimensionierungsuntersuchungen wurde ein grobes Simulationsmodell in MATLAB implementiert (Details siehe Abschlussbericht der TUD). Die Modellierung von Wechselrichter und DC/DC-Wandler erfolgte in Form einer bilanziellen Betrachtung der Leistungsflüsse. Die Wirkungsgrade der leistungselektronischen Komponenten wurden vom Fraunhofer ISE bereitgestellt. Das Kostenmodell der Leistungselektronik beinhaltet die Ergebnisse einer Kostenschätzung aller relevanter Bauteile.

Das Lithium-Ionen-Batteriemodell basiert auf einem elektrischen Ersatzschaltbild und beschreibt das Verhalten des Ladezustands, der Klemmenspannung und der auftretenden Verluste. Es besteht aus einer idealen Spannungsquelle und einem Innenwiderstand. Der Ladezustand wird anhand eines Stromintegral berechnet. Neben groben technischen Parametern wurden für alle Batterietypen die anfallenden Kosten von BorgWarner AKASOL zur Verfügung gestellt. Die Simulationen erfolgten unter der Annahme, dass es sich um ein temperiertes System handelt. Auf die Modellierung des thermischen Verhaltens der Komponenten wurde verzichtet. Die benötigte Kühlleistung wurde in Form einer leistungsabhängigen Verlustkennlinie berücksichtigt. Die Kostenanteile des Kühlsystems wurden durch HYDAC bereitgestellt.

AP 1.3 - Systemspezifikation

Die Systemspezifikation für das Hybride Ionen-Batteriespeicherlösung wurde zusammen mit den Partnern festgelegt und besteht aus zwei verschiedenen Batteriesystemen, die über einen jeweiligen DC/DC Wandler angeschlossen sind, wie es in **Abbildung 2** dargestellt ist.

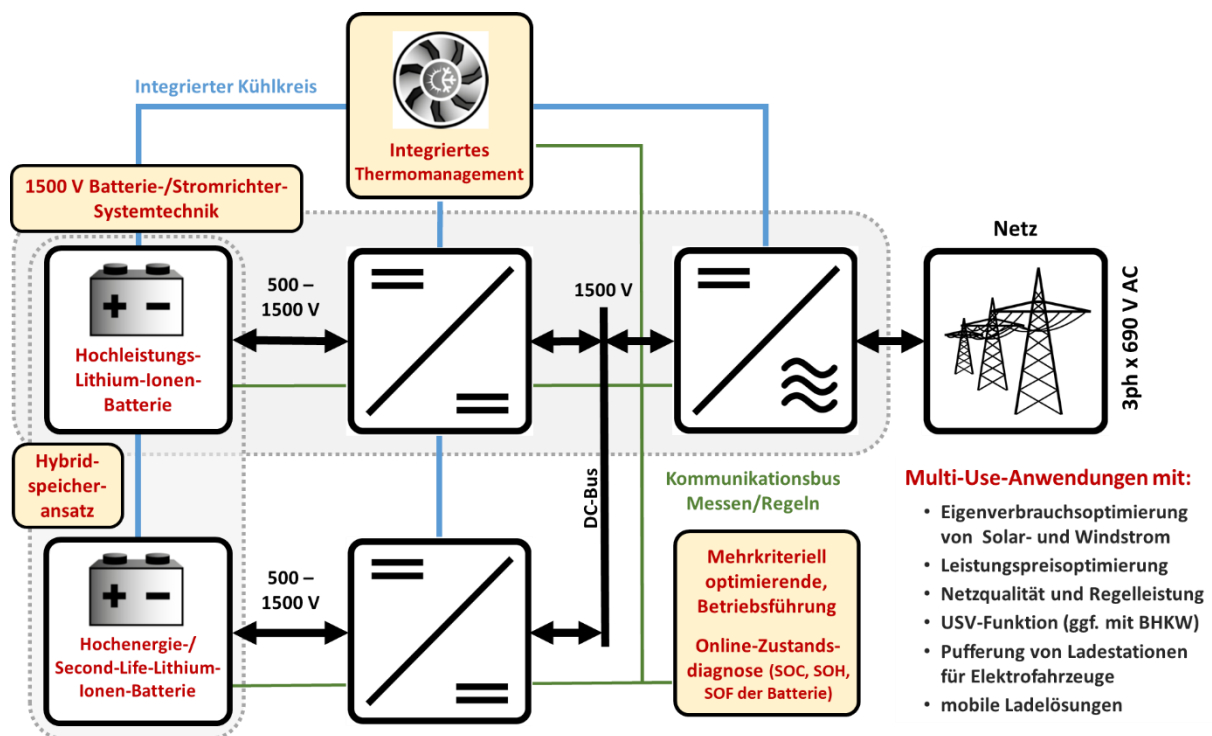


Abbildung 2: Systemkonzept: Hybride Lithium-Ionen-Batteriespeicherlösung mit innovativen Merkmalen (gelb/rot)

Der Hauptanteil bei der Systemspezifikation der BW Akasol GmbH betrifft die verwendeten Batteriesysteme, die im Folgenden näher erläutert werden:

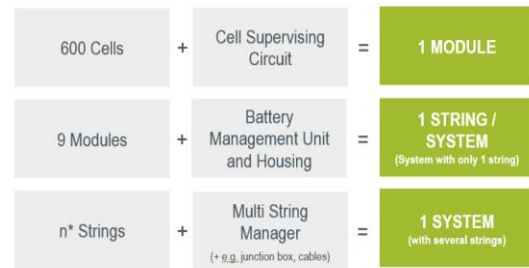
Hochenergie-Lithium-Ionen-Batterie:

Das Hochenergie-Batteriesystem basiert auf zylindrischen Zellen mit Nickel-Mangan-Cobalt (NMC) Technologie. Dieses Batteriesystem besteht aus 9 Modulen, die alle in Serie verschaltet sind, um eine Nennspannung von 662 V erreichen zu können. Jedes dieser Module besteht aus 600 zylindrischen Zellen, die über den Boden an ein Kühlprofil angebunden ist. Dieses Kühlprofil dient zusätzlich als mechanische Struktur des Moduls. Die technischen Daten eines Batteriesystems (bzw. Batterietroges) auf Basis der prismatischen Zelle inkl. dem Aufbau ist in **Abbildung 3** zu sehen.



USPs

- Ultra High Energy
- High Power
- High cycle life
- Extremely low cost



ELECTRICAL DATA 9 AKM 150 CYC UHE	
Capacity	150 Ah
Energy	99 kWh
Nominal voltage	662 V
Voltage (Max.)	756 V
Voltage (Min.)	540 V
Discharging power max. (10s)*	198 kW
Charging power max. (10s)*	119 kW
Continuous power discharge	99 kW
Continuous power charge	79-99 kW
Cycle life (depending on DoD, T, charge rate)	2000 - 3000

*peak rating depending on fuse and cable/connector configuration/ SOC and temperature

MECHANICAL DATA 9 AKM 150 CYC UHE	
Coolant pressure (max.)	1.5 bar
Typical coolant pressure loss (T _{coolant} = 25°C B _{Water/glycol} = 50/50)	400 mbar @300l/h
Operating temperature range	-30° bis 50° C
Recommended operating temperature range	15° bis 35°C
Protection class	IP67 (IP6K9K)
Weight	535 kg
Dimension (L x W x H in mm)	1,720 x 700 x 300

Abbildung 3: Ultra-High-Energy Battery System

Hochleistungs-Lithium-Ionen-Batterie:

Eine detaillierte Recherche bei den verschiedenen Zellherstellern für Hochleistungszellen ergab, dass damit prinzipiell drei unterschiedliche Hochleistungssysteme möglich sind. Für diese 3 möglichen Systeme wurden die Anforderungen (Lastenhefte) erstellt. Die wesentlichen technischen Daten dieser 3 Systeme sind in AP3 in Kapitel 6.3.1 dargestellt. Dort werden diese auch bezüglich Leistungsdichte, Energiedichte und Kosten verglichen.

6.2 AP 2 – Entwicklung und Aufbau der Leistungselektronik

BW AKASOL hat die Informationen bezüglich des elektrischen Verhaltens des Batteriesystems an das Fraunhofer ISE bereitgestellt, die für die Auslegung der Leistungselektronik benötigt werden. Diese sind insbesondere die elektrischen technischen Daten des Batteriesystems wie Impedanz, Spannungs- und Leistungsverlauf über dem Ladezustand sowie die Schnittstellenmatrix (CAN) für den Informationsaustausch. Auch das Thema Startverhalten des Umrichters mit Hilfe der Vorladeschaltung des Batteriesystems wurde entsprechend berücksichtigt.

Die Entwicklung und der Aufbau der Leistungselektronik ist im Abschlussbericht vom Projektpartner Fraunhofer ISE detailliert beschrieben. Es wurden ein DC/DC-Wandler und ein Wechselrichter entwickelt, die dann im Rahmen der Systemtests des hybriden Energiespeichers in AP7 und AP8 zum Einsatz kamen.

6.3 AP 3 – Batteriemodul- und Batteriesystementwicklung

Parallel zur Leistungselektronik wurde in diesem Arbeitspaket aus dem Anforderungskatalog und dem ausgewählten Konzept ein Funktionsmuster für die Hochleistungs-Batteriemodule entwickelt und aufgebaut werden. Innerhalb dieses Arbeitspakets wurde das technische Konzept entwickelt, welches die Schutzkomponenten bzw. Betriebssicherheit, neue integrierte Schaltungen für das Batteriemanagementsystem, ein integriertes thermisches Management und ein neuartiges Sensorkonzept bestehend aus elektrischen und thermischen Sensoren und natürlich die Zelltechnologien des Speichers beinhaltet.

6.3.1 AP 3.1 – Batterie Konzeptentwicklung

Anhand der Rückmeldung der verschiedenen Zellhersteller für Hochleistungszellen am Markt sind die folgenden 3 Systemkonzepte darstellbar:

Systemkonzept A: 15 AKM 57 POC

Beim Systemkonzept A „15 AKM 57 POC“ handelt es sich um ein Konzept auf Basis von Hochleistungs-Pouchzellen auf Basis von NMC-Technologie mit hochporöser Struktur an den Elektroden, um hohe Leistungsdichten zu erreichen. Diese haben eine Nennspannung von 3,7 V, eine Kapazität von 57 Ah und einer Energiedichte von 178Wh/kg auf Zellebene. Das Konzept auf Basis dieser Pouchzellen besteht aus 15 Modulen mit jeweils 12 Zellen, die alle in Reihe verschaltet sind. Die geplanten technischen Daten sind in **Tabelle 1** dargestellt.

Tabelle 1: Technische Daten Systemkonzept A „15 AKM 57 POC“

Technische Daten	Konzept 15 AKM 57 POC
Anzahl Module	15
Kapazität	57 Ah
Energieinhalt	37,8 kWh
Nennspannung	666 V
Spannung maximal	756 V
Spannung minimal	540 V
Entladestrom maximal (10s)	456 A (8 C)
Ladestrom maximal (10s)	285 A (5 C)
Dauerstrom (RMS)	142 A (2,5C)
Entladeleistung maximal (10s)	300 kW
Ladeleistung maximal (10s)	190 kW
Dauerleistung (RMS)	95 kW
Zyklen (bei 80% DoD, 25°C)	> 6.000

Systemkonzept B mit PHEV2-Modulen

Das Systemkonzept B besteht aus Standardhochleistungsmodulen (PHEV2-Modulen), wie diese aktuell in Hybridfahrzeugen eingesetzt werden. Diese am Markt verfügbaren PHEV2-Module bestehen aus 12 in Reihe geschalteter Zellen mit einer Kapazität von 38 Ah. Die Zellen hierbei bestehen aus entsprechend strukturierten Elektroden für Hochleistungsanwendungen und angepasster NMC-Zellchemie. Mit diesen PHEV2-Modulen werden zwei Konzepte untersucht, die sich nur in der Anzahl der Module und damit in der Spannung und Leistung unterscheiden, wie **Tabelle 2** zeigt

Tabelle 2: Konzepte mit PHEV2 Modulen

Technische Daten	Konzept 15 UHP 38 POC	Konzept 18 UHP 38 POC
Anzahl Module	15	18
Kapazität	38 Ah	38 Ah
Energieinhalt	25,3 kWh	25,3 kWh
Nennspannung	666 V	800 V
Spannung maximal	756 V	906 V
Spannung minimal	540 V	648 V
Entladestrom maximal (10s)	300 A (~8 C)	300 A (~8 C)
Ladestrom maximal (10s)	300 A (~8 C)	300 A (~8 C)
Dauerstrom (RMS)	105 A (~3)	105 A (~3)
Entladeleistung maximal (10s)	200 kW	240 kW
Ladeleistung maximal (10s)	200 kW	240 kW
Dauerleistung (RMS)	70 kW	84 kW
Zyklen (bei 80% DoD, 25°C)	> 8.000	> 8.000

Da die Zellen in diesen PHEV2-Modulen nicht direkt flüssigkeitsgekühlt sind, sondern die Wärmeabfuhr nur unten über die Anbindung der Module an eine Kühlplatte erfolgen kann, könnte dies hier die Leistungsfähigkeit des Systems limitieren. Die ersten Abschätzungen haben ergeben, dass bei optimaler thermischer Anbindung der Module an die Kühlplatte in Kombination mit dem sehr geringen Innenwiderstand der Zellen, eine Dauerleistung von 70 kW möglich sein sollte. Die Leistung des Systems könnte evtl. noch weiter gesteigert werden, wenn es gelingt, die Wärme aus den PHEV2-Modulen auch bei höheren Dauerleistungen zuverlässig abzuführen.

Systemkonzept C mit Hochleistungsrundzellen

Das Systemkonzept C besteht aus Hochleistungsrundzellen mit dem Format 21700. Bei diesem Konzept werden 20 Zellen in Reihe und 30 Zellen parallel zu einem Modul mit 600 Zellen verschaltet. 9 dieser Module werden dann in Reihe geschaltet, um eine ausreichend hohe Spannung zu erreichen. Dabei werden jeweils 300 Zellen auf beiden Seiten der Kühlplatte angeordnet und diese thermisch direkt an das Kühlprofil in der Mitte angebunden. Auch hier ist eines der kritischen Themen eine ausreichende Wärmeabfuhr der Zellen zu erreichen. Erste Berechnungen haben hier gezeigt, dass aufgrund des sehr geringen Zellinnenwiderstandes eine Dauerleistung von 200 kW möglich sein sollte. Hinzu kommen noch die hohen Ströme im Modul, die über den Zusammenhang der Verlustleitung

„ $P=i^2 \cdot R$ “ bei doppeltem Strom die vierfache Verlustleistung entsteht lassen. Hier hat die Abschätzungsberechnung gezeigt, dass diese Verluste mit dem Konzept, das für die Hochenergielösungen verwendet wird, deutlich zu groß wären, so dass hier das Zellverschaltungskonzept an diese hohen Ströme angepasst werden muss. Die technischen Daten des Systemkonzepts C sind in **Tabelle 3** dargestellt.

Tabelle 3: Konzept C auf Basis von Hochleistungsrundzellen 21700

Technische Daten	Konzept 9 AKM 105 CYC
Anzahl Module	9
Kapazität	105 Ah
Energieinhalt	70 kWh
Nennspannung	662 V
Spannung maximal	756 V
Spannung minimal	540 V
Entladestrom maximal (10s)	600 A (~ 6C)
Ladestrom maximal (10s)	600 A (~ 6C)
Dauerstrom (RMS)	300 A (~ 3C)
Entladeleistung maximal (10s)	400 kW
Ladeleistung maximal (10s)	400 kW
Dauerleistung (RMS)	200 kW
Zyklen (bei 80% DoD, 25°C)	> 5.000

Vergleich der Systemkonzepte

Nachdem die wesentlichen elektrischen Eigenschaften der Systeme dargestellt wurden, werden diese jetzt anhand Leistungsdichte, Energiedichte und der zu erwartenden Investitionskosten verglichen. In **Abbildung 4** ist die Energiedichte der Systeme über der Dauerladeleistungsdichte aufgetragen. Hierbei zeigt sich, dass das Systemkonzept C auf Basis der zylindrischen Zellen das Potential hat, die höchste Leistungsdichte bei gleichzeitig hoher Energiedichte zu erreichen. Danach folgt das Konzept A auf Basis der Pouchzelle und die geringste Energie und Leistungsdichte hat das Konzept B mit den PHEV2 Modulen.

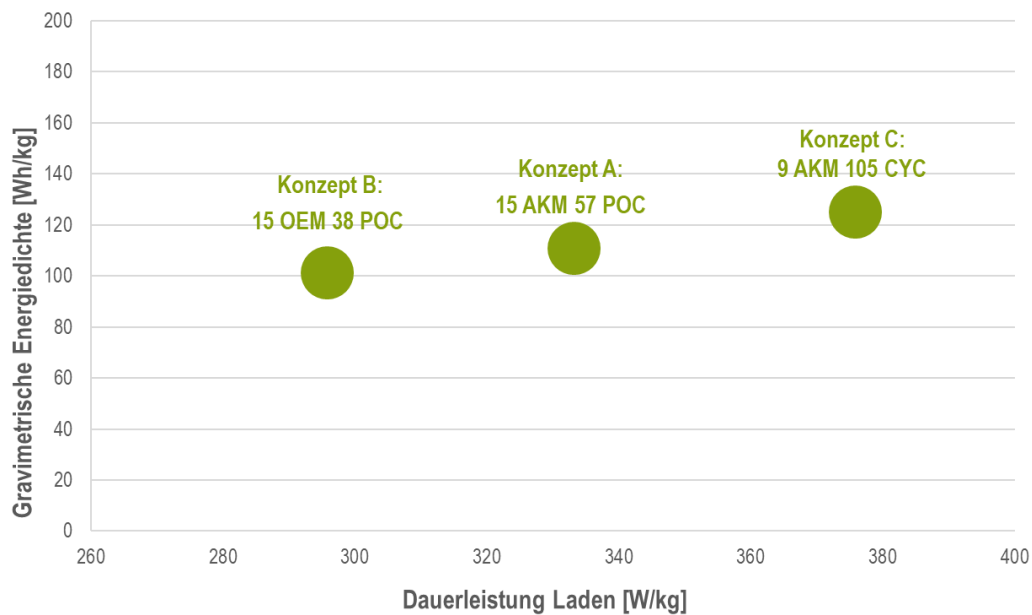


Abbildung 4: Vergleich der Hochleistungssysteme bezüglich Energie- und Leistungsdichte

Der Vergleich der Systeme bezüglich der Kosten pro Zyklus in **Abbildung 5** zeigt, dass mit dem Konzept B auf Basis von PHEV2 Hochleistungsmodulen die geringsten Kosten pro Zyklus zu erreichen sind, gefolgt von dem Konzept C mit 21700 Hochleistungszellen. Das Konzept A führt zu deutlich höheren Kosten, aufgrund der hohen Zellpreise und dem Aufwand für die direkte Kühlung der Zellen.

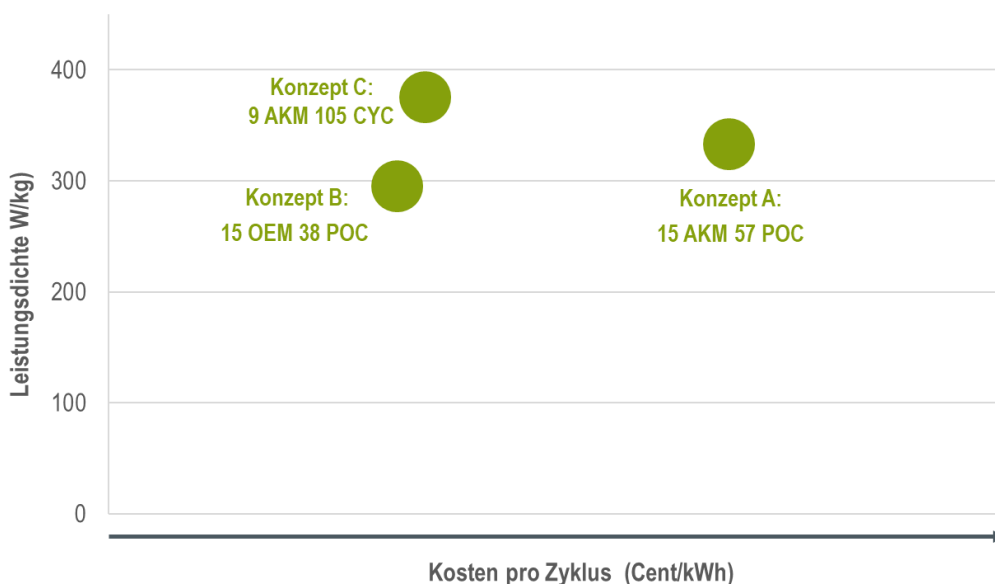


Abbildung 5: Vergleich der Hochleistungssysteme bezüglich Kosten und Leistungsdichte

Der Vergleich der Hochleistungssysteme bezüglich Leistungsdichte, Energiedichte und Kosten zeigt das Potential der Lösung auf Basis von 21700 Rundzellen klar auf. Leider sind die hierfür in Frage kommenden Zellen gerade erst in der Entwicklung und standen nicht rechtzeitig im Rahmen dieses Projektes zur Verfügung. Daher wurde sich bei dem Aufbau

der Entwicklungsmustern im AP3 auf die Module und Systeme mit Pouchzellen konzentriert.

6.3.2 AP 3.2 – Konstruktion Entwicklungsmuster

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurde sowohl Muster für Module als auch Systeme entwickelt.

Modulentwicklung:

Beim Systemkonzept A mit 57 Ah POC-Zellen wurden entsprechende Module entwickelt, die bis zu einem Dauerstrom von 171 A (3C) betrieben werden sollen. Hierbei sind die Einzelzellen jeweils von einer Seite direkt flüssigkeitsgekühlt, so dass hier der Wärmeabtransport auch bei diesen hohen Dauerströmen gewährleistet sein sollte. Da der Wärmeabtransport proportional der Temperaturdifferenz und zwischen Zelltemperatur und der Kühlmitteltemperatur ist, nimmt mit steigender Zelltemperatur auch die Möglichkeit der Wärmeabfuhr zu. Leider führen steigende Zelltemperaturen oberhalb von ca. 35°C bis 40°C zu einer deutlich schnelleren Alterung der Zellen, so dass dieser Bereich vermieden werden sollte.

Batteriesystemkonzept

In das Design des Batteriekonzeptes sind die Ergebnisse des Performance Tests, Propagations Tests und Kühlungstests eingeflossen. Hierbei werden 8 PHEV2 Batteriemodule von oben und unten an der Kühlplatte mittels Schrauben befestigt. Die Modulhalteplatte ist zusätzlich für die Kühlung der Module verantwortlich und hierbei als Aluminiumstrangpressprofil mit integrierten Kühlkanälen ausgeführt. An beiden Enden der Modulhalteplatte befinden sich weitere Aluminiumstrangpressprofile, die über Reibschweißverfahren an der Modulhalteplatte befestigt werden. Mit diesem mechanischen Konzept wird eine sehr steife und stabile Struktur bei sehr geringem Gewicht, ähnlich dem Prinzip des Breitflanschträgers, erreicht.

Das Batteriemanagementsystem ist zusammen mit den Schützen, Sicherungen, Vorladewiderständen und den weiteren, zum Betrieb eines Batteriesystems benötigten, elektronischen Bauteilen in der Schützbox verbaut. Das Design der Schützbox und deren Integration in das Batteriegehäuse ist derart ausgeführt, dass diese Schützbox einfach getauscht werden kann.

Das Design des Batteriepacks wurde so gewählt, dass dieses je nach Energie-, Leistungs- und Spannungsbedarf skaliert werden kann.

6.3.3 AP 3.3 – Beschaffung und Aufbau Entwicklungsmuster

Im Rahmen des Arbeitspaketes AP3.3 wurden die Zellen für den Aufbau der Entwicklungsmuster für die verschiedenen Module beschafft.

Neben der mechanischen Integration müssen auch die relevanten elektrischen und thermischen Parameter der einzelnen Zellen überwacht werden. Hierfür wurden die benötigten Platinen entwickelt und beschafft, welche die Spannungs- und Temperatursignale an das Batteriemanagementsystem über eine CAN-Bus Verbindung weiterleitet. Zusätzlich befindet sich auf der Platine das sog. „Cell-Balancing“, das dafür sorgt, dass alle Zellen beim Laden ein möglichst gleiches Spannungsniveau haben.

6.3.4 AP 3.4 – Inbetriebnahme und Test Entwicklungsmuster

Leistungsmessungen Systemkonzept A: 15 AKM 57 POC

Beim Systemkonzept A mit 57 Ah POC-Zellen wurden entsprechende Module aufgebaut und dann mit einem Dauerstrom von 171 A (3C) betrieben. Die Tests wurden mit einem Wasser-Glycol Gemisch (Mischungsverhältnis 50:50) mit einer Vorlauftemperatur von 25°C durchgeführt. Es wurden 25°C gewählt, da hier aufgrund der hohen Reaktionskinetik die Zellen ihre Maximalströme (Maximalleistungen) aufnehmen bzw. abgeben können.



Abbildung 6: Aufbau für Leistungstests der Hochleistungsmodule auf Basis von 12 Pouchzellen

In **Abbildung 7** ist der Temperaturverlauf an der 5. und 8. Zelle dargestellt. Hierbei wird deutlich, dass sich im eingeschwungenen Zustand die Zelltemperaturen bei maximaler Leistung um ca. 11°C über der Kühlmitteltemperatur liegen. Diese um 11°C erhöhte Temperatur ist ein sehr gutes Testergebnis. Dennoch ist zu berücksichtigen, dass im Laufe des Betriebs bis zum Ende der Lebensdauer der Innenwiderstand der Zellen bis auf das Doppelte steigen kann und dann theoretisch die Temperaturdifferenz bis auf 22°C steigen würde. Auch bei 47°C wären die Zellen noch nicht im kritischen Bereich, was den Betrieb der Zellen betrifft, aber dennoch im Temperaturbereich für die erhöhte Alterung, die zu vermeiden ist. Als Ergebnis der Tests lässt sich damit festhalten, dass bei einem Dauerbetrieb des Moduls mit 171 A die Vorlauftemperatur des Kühlmediums in Abhängigkeit der Zellalterung auf 20°C oder ggf. noch geringfügig darunter abgesenkt werden sollte. Zu tief darf die Vorlauftemperatur auch nicht liegen, da sonst Teilbereiche der Zellen zu kalt wären und damit die Stromverteilung innerhalb der Zellen negativ beeinflussen würden.

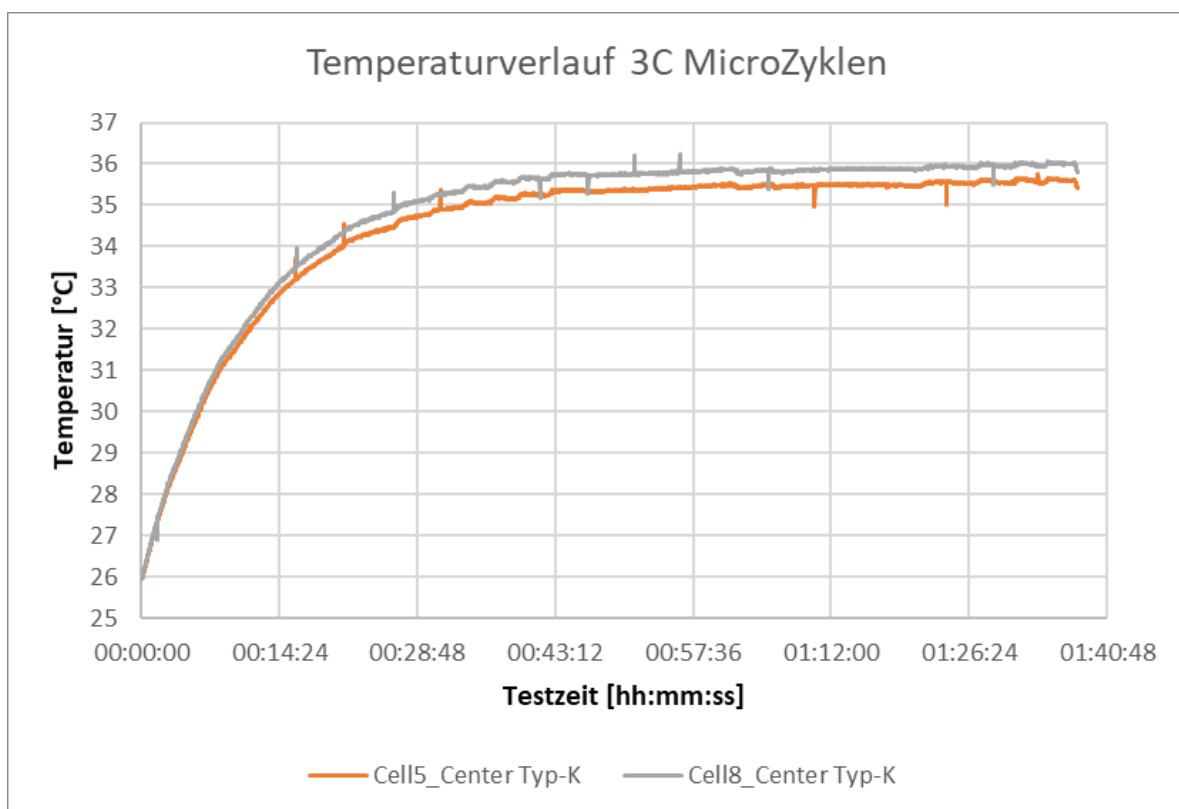


Abbildung 7: Temperaturverlauf innerhalb des Moduls bei maximaler Leistung

Leistungsmessungen Systemkonzept B mit PHEV2-Modulen

Die Wärmeabfuhr bei den Hochleistungsmodulen im PHEV2 Format erfolgt nur über die Bodenplatten, was bedeutet, dass diese einen sehr geringen Zellinnenwiderstand haben müssen. Zusätzlich müssen die Zellen in den Modulen so aufgebaut und angeordnet sein, dass eine Wärmeabfuhr nach unten optimal möglich ist.

Der Testaufbau für die Leistungsmessung ist in **Abbildung 8** zu sehen. Hierbei würden möglichst viele Temperatursensoren am und im Modul verbaut und zusätzlich das Modul mit einer möglichst guten thermischen Anbindung auf eine optimiert Kühlplatte montiert. Um sicherstellen zu können, dass keine Wärme von dem Modul an die Umgebung abgegeben wird, wurde das Modul in eine thermisch isolierte Kiste eingebaut und während der Tests auch alle Öffnungen verschlossen

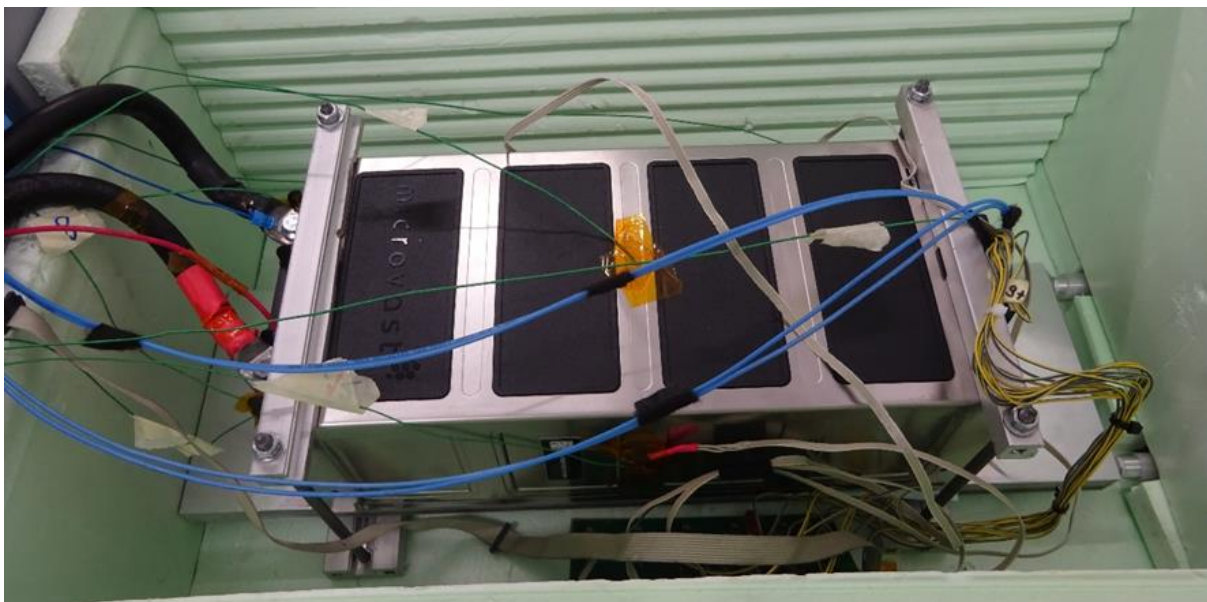


Abbildung 8: Testaufbau für die Messung des Temperaturverlauf an verschiedenen Stellen des Moduls

Im eingeschwungenen Zustand wird bei maximalem Strom von 111A (3C) Leistung hier eine Zelltemperatur bei neuen Modulen von 40,6°C gemessen, die 15,6°C über der Kühlmittelintrittstemperatur liegt. Nimmt man auch hier an, dass sich im Laufe der Zeit der Zellinnenwiderstand verdoppeln kann, so würde dann eine Temperatur von bis zu 56,2°C erreicht werden, was kein zulässiger Betriebsbereich für diese hohen Temperaturen ist. Zwar kann hier auch durch die Anpassung der Kühlmittelvorlauftemperatur die Zelltemperatur gesenkt werden, dennoch wird es nicht ausreichen, um Verlustleistung aus den Zellen aufgrund des Anstiegs des Innenwiderstandes zu kompensieren. Hier muss dann bei erhöhtem Innenwiderstand zusätzlich die Leistung auf etwa 92A (2,5C) im Dauerbetrieb gesenkt werden.

Propagationstests mit dem Systemkonzept A 15 AKM 60 POC

Für die Propagationstests wurden 2 Module mit 60 Ah Musterzellen und ein Modul mit der 46 Ah als Vergleichstest aufgebaut. Die Tests wurden bei 50% und 100% Ladezustand (SOC) mit der 60Ah Zelle durchgeführt, um zu sehen, ob mit dem aktuellen Moduldesign die Propagationsanforderungen erfüllt werden können. Für das Triggern der Propagation wurde das Überladen von einer Zelle im Modul mit einem Ladestrom von 60 Ah (1C) definiert. Während den Tests wurden die Module flüssigkeitsgekühlt.

Bei dem Modul mit den 46 Ah Zellen führte die Propagation der einen Zelle dazu, dass am Modul weißer Rauch austrat, aber am Ende nur diese eine Zelle propagierte und alle anderen Zellen im Modul noch intakt waren, was anhand der Zellspannung, die immer noch bei der Startspannung waren, nachgewiesen werden konnte. Bei den beiden Modulen mit den 60 Ah Zellen sind erheblich mehr weißer Rauch und sehr heiße Gase ausgetreten, was durch die höhere Energiemenge in dem Modul zu erwarten war. Die Tests haben auch gezeigt, dass davon auszugehen ist, dass man mit der 60 Ah Zelle weitere Maßnahmen im Modul und oder Batteriesysteme ergreifen muss, um die Sicherheitsanforderungen für die jeweiligen Normen in den verschiedenen Applikationen erfüllen zu können. Zusätzlich ist geplant, die 60 Ah Musterzellen auf Zellebene noch weiter zu optimieren, um eine Verbesserung des Propagationsverhaltens zu erreichen.

Propagationstests mit dem Systemkonzept A 15 AKM 60 POC

Analog zu den bereits beschriebenen Modultests mit den wassergekühlten Modulen sind Modultests mit den PHEV2 Modulen ohne Kühlung durchzuführen, die bei der Systemauslegung insbesondere hinsichtlich der Propagationsthemen berücksichtigt werden müssen. Der Aufbau des Moduls in der Prüfkammer ist in **Abbildung 9** zu sehen. In diesem Fall wurde der „Thermal Run-Away“ (Durchgehen von Zellen) durch kontinuierliche Wärmezufuhr herbeigeführt. Dabei wurde, wie zu erwarten war, das Modul zerstört, aber die Auswirkungen der Propagation waren geringer als erwartet.



Abbildung 9: Modulaufbau für Propagationstests durch Überhitzen einer Zelle ohne Kühlung

Nach den erfolgreichen und vielversprechenden Propagationstests auf Modulebene, erfolgten die Tests auf Systemebene. Hier wurde ein komplettes 15 OEM 38 POC System aufgebaut. Bei diesem Aufbau wurde das Modul, das durch Wärmezufuhr propagieren soll, in die Mitte gesetzt. Diese stellt den kritischsten Fall dar, da an allen Seiten des propagierenden Moduls sich weitere Module befinden, die ebenfalls propagieren könnten, falls die Propagation nicht auf Modulebene gestoppt werden kann.

Die Ergebnisse der Tests waren hier sehr positiv. Es konnte gezeigt werden, dass mit den Maßnahmen, die zur Verhinderung der Wärme bzw. Brandausbreitung im Batteriesystem eingeplant wurden, dies auch sicher erreicht werden kann.

6.3.5 AP 3.5 – Überarbeitung und Konstruktion des Labormusters

Für die mechanische Integration wurde eine Halterung entworfen siehe **Abbildung 10**, bei der es möglich ist die Batteriesysteme übereinander zu stapeln (**Abbildung 11**), so dass am Ende das komplette Energiespeichersystem inkl. der Kühlung in einem Spezial-Container untergebracht werden konnte. Durch die Unterbringung der Batterien in einem Spezial-Container ist es möglich die potenziellen Gefahren, die durch die Verwendung von Lithium-Ionen-Batterien auf Nickel-Mangan-Cobalt (NMC) Basis entstehen, zu minimieren.

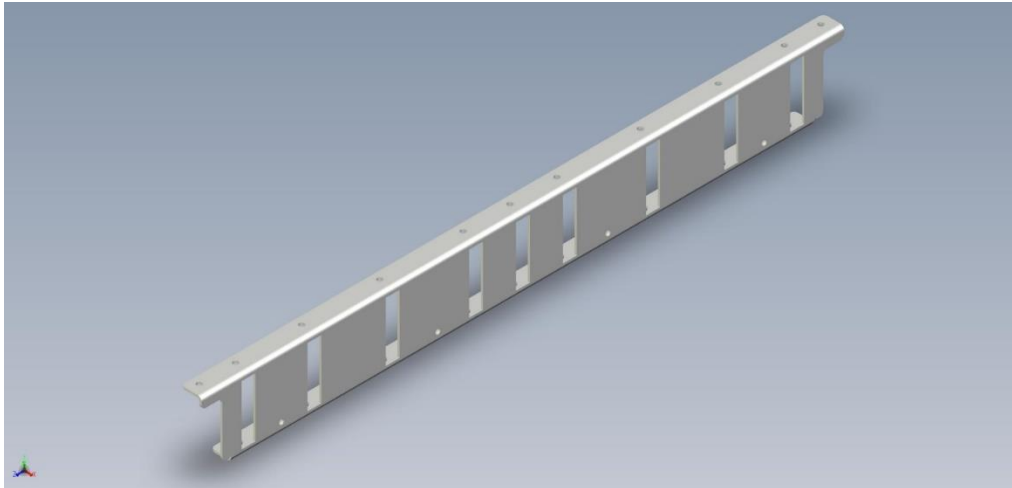


Abbildung 10: Einzelne Halterung zum Stapeln der drei Batteriepacks



Abbildung 11: Gestapelte Batteriepacks und Ultra-Hoch-Energie-Batteriesystem

6.3.6 AP 3.6 – Beschaffung und Aufbau Labormusters

Grundsätzlich enthält jede der drei einzelnen Batteriepacks sämtliche Sicherheitsmechanismen und -funktionen und überwacht sich selbstständig. Um aus den drei selbstständigen Batterien ein Batteriesystem zu erstellen und die Steuerung durch die Anwendung zu vereinfachen, wird ein Multi-String-Manager (MSM) benötigt. Dieses Steuergerät zentralisiert die CAN-Kommunikation zwischen den einzelnen Batterien und der Anwendung. Um die Integration des Batteriesystems in die Anwendung zu beschleunigen, wurde dem Fraunhofer ISE in Freiburg ein MSM mit anwendungsspezifischer Software und ein eigens angefertigter Kabelsatz für die 24V Spannungsversorgung und die CAN-Kommunikation zur Verfügung gestellt. Um die Hochvoltkreise der drei Batterien zusammenzuführen wurde ein Sicherungsverteiler samt

Steckern und Zubehör zur Verfügung gestellt. Die Anpassung an die lokalen Randbedingungen erfolgte durch das Fraunhofer ISE.

Parallel wurde in dem Berichtszeitraum ein Ultra-Hoch-Energie-Batteriesystem des Typs 9 AKM 150 CYC UHE aufgebaut. Bevor das 9 AKM 150 CYC UHE Batteriepack an das Fraunhofer ISE in Freiburg ausgeliefert werden kann, muss dieses System umfangreich in Bezug auf Funktion, Sicherheit und Leistung getestet werden.

6.4 AP4 – Integriertes Thermomanagement

Für das Thermomanagement der hybriden Lithium-Ionen-Batteriespeicherlösung wurden die notwendigen Informationen wie Verlustleistung, Durchflüsse und Druckabfall in Abhängigkeit des Volumenstroms an den Arbeitspaketleiter HYDAC weitergegeben, so dass dieser die Informationen in der Auslegung des Kühlsystems entsprechend berücksichtigen kann. Die Detailinformationen zu dem AP4 – Integriertes Thermomanagement sind in dem Abschlussbericht von dem Projektpartner HYDAC dargelegt.

6.5 AP5 – Hybridspeicher mit optimierender Betriebsführung

Für die Optimierung der Betriebsführung wurden Messdaten über Zeiträume von mehr als einem Jahr aus verschiedenen Anwendungen an den Arbeitspaketleiter TU Dresden übergeben. Zusätzlich wurden die Daten von Batteriesystemen für die Modellbildung bereitgestellt. Die Detailinformationen zu dem AP5 – Hybridspeicher mit optimierender Betriebsführung sind in dem Abschlussbericht von dem Projektpartner TU Dresden dargelegt.

6.6 AP6 – Entwicklung Online-Zustandsdiagnose-Konzept

Zur Charakterisierung der aktuellen Betriebszustände von Lithium-Ionen-Batterien wurde in AP6 ein praxistaugliches Online-Zustandsdiagnose-Konzept entwickelt. Die genauere Kenntnis der Zustandsgrößen trägt maßgeblich zum optimierten, sicheren, effizienten und schonenden Betrieb der hybriden Lithium-Ionen-Batteriespeicherlösung bei. Zum einen wurde untersucht, ob sich das Verfahren der elektrochemischen Impedanz-spektroskopie auch für den Online-Einsatz auf Systemebene unter Verwendung kostengünstiger Messtechnik realisieren lässt. Zum anderen wurden filterbasierte Ansätze zur Zustands-

und Parameterschätzung konzeptionell betrachtet, vielversprechende Ansätze implementiert und auf ihre Eignung im Online-Betrieb bewertet.

Impedanzspektroskopie auf Systemebene

Die elektrochemische Impedanzspektroskopie ist ein weit verbreitetes Verfahren zur Zustandsdiagnose von Lithium-Ionen-Batterien. Der Einsatz erfolgt vorwiegend auf Zellebene mittels hochwertiger Labormesstechnik. Um die Anforderungen an die Messtechnik und Reglerdynamik bereits in einer frühen Projektphase zu spezifizieren, wurde eine Literaturrecherche zur Anwendung der Impedanzspektroskopie auf Modul- und Systemebene durchgeführt. Als Ergebnis wurde ein Verfahren zur praxisnahen Online-Zustandsdiagnose von neuen und gealterten Lithium-Ionen-Batterien sowie die Integration der Onlinezustandsdiagnose in die Energiemanagement-Einheit mit Schnittstelle zum Thermomanagement erreicht. Alle weiteren Informationen zu diesem Arbeitspaket sind in dem Abschlussbericht der TU Dresden enthalten.

6.7 AP7 – Aufbau Labormuster und Inbetriebnahme

Die Inbetriebnahme des Gesamtsystems erfolgte in Zusammenarbeit und enger Abstimmung der beteiligten Partner.

Die einzelnen Teilsysteme der Leistungselektronik wurden in der Laborhalle in direkter Nähe zum Batteriecontainer aufgebaut. So können günstige Umgebungsbedingungen bei gleichzeitig möglichst kurzen Kabelwegen realisiert werden. Parallel dazu wurden das Messsystem zusammen mit der Not-Aus-Einrichtung aufgebaut und in Betrieb genommen.

Um erste Untersuchungen durchführen zu können wurde ein temporäres Interim-Kühlsystem, zunächst für die Batteriesysteme und im weiteren Verlauf für weitere Teilsysteme der Leistungselektronik, eingesetzt. Jedes weitere Teilsystem wurde mit Hilfe eines hydraulischen Abgleichs in das Gesamtkühlsystem integriert, um eine optimale Kühlleistungsverteilung zu garantieren. Durch den Einsatz des Interim-Kühlsystems in Verbindung mit der Methode des hydraulischen Abgleichs konnte nicht nur die Versuchszeit verlängert werden, sondern auch Zeit bei der Integration des TMS von HYDAC eingespart werden.

Zeitgleich wurden Funktionstests mit der, bereits in Betrieb genommenen, OEM-Batterie (auch Ultra High Power = UHP) durchgeführt. Die Komponenten wurden in separaten, mehrtägigen Terminen mit den jeweiligen Partnern in Betrieb genommen und in das Gesamtsystem integriert worden.

Um einen stabilen Betrieb des Gesamtsystems gewährleisten zu können, wurden folgende Maßnahmen durchgeführt:

Zum einen wurde die Leitungsführung der Versorgung von TMS und EMS so gewählt, dass die induktive Einkopplung von Störungen aus benachbarten Versuchsständen auf ein Minimum reduziert wird, zum anderen wurden die CAN-Schnittstellen von EMS und TMS nachträglich um eine galvanische Trennung erweitert, um effektiv Erdschleifen zu unterbinden. Darüber hinaus wurden gezielt Gleichtakfilter in Form von hochpermeablen Ringkernen eingefügt, um Signalleitungen zu entstoren.

Die Benutzeroberflächen des ISE-Steuerrechners mit angeschlossenem CANalyzer (Abbildung 12) sowie des Messerfassungsrechners (Abbildung 13) wurden ebenfalls mit jedem weiteren Teilsystem erweitert und an die Testbedürfnisse angepasst, sodass die Projektpartner bei deren Inbetriebnahmen effizient unterstützt und von anfänglichen Präsenz-Teil-Inbetriebnahmen auf Remote-Inbetriebnahmen per Remote-Zugriff und Videokonferenzen gewechselt werden konnte.

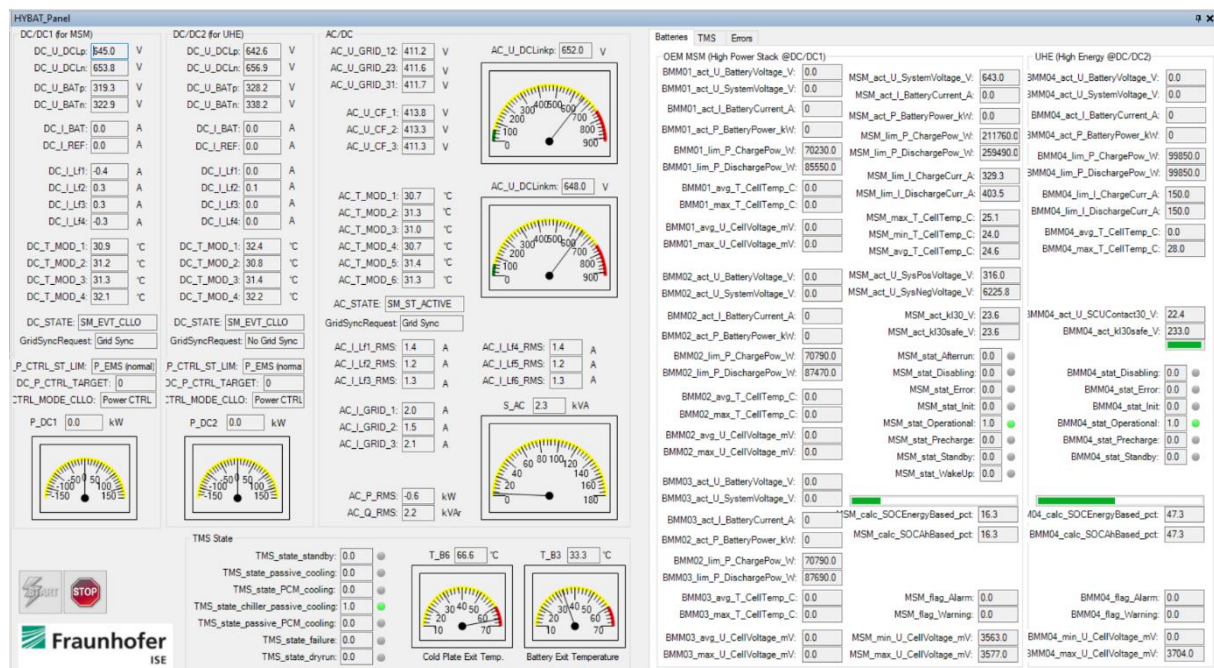


Abbildung 12: Erweiterte Version des CAN-Panels als Schnittstelle zu jedem Teilsystem



Abbildung 13: Dewetron-Cockpit zur Visualisierung der Messwerte

Elektrische Impedanz-Spektroskopie (EIS)

Für die Impedanzmessung der Batterien durch die TU Dresden ist die Einprägung eines sinusförmigen Batteriestroms nötig. Die Reglerstruktur wurde deshalb um eine Option erweitert, bei der der Leistungsregler der ursprünglichen Regelstruktur (Abbildung 14) umgangen wird und dem Zustandsregler direkt ein sinusförmiger Sollstrom übergeben wird (Abbildung 15).

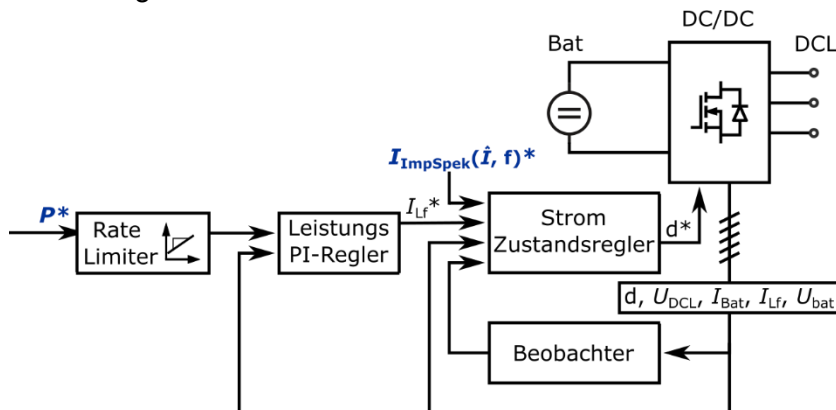


Abbildung 14: Leistungsregler der DC/DC-Wandler

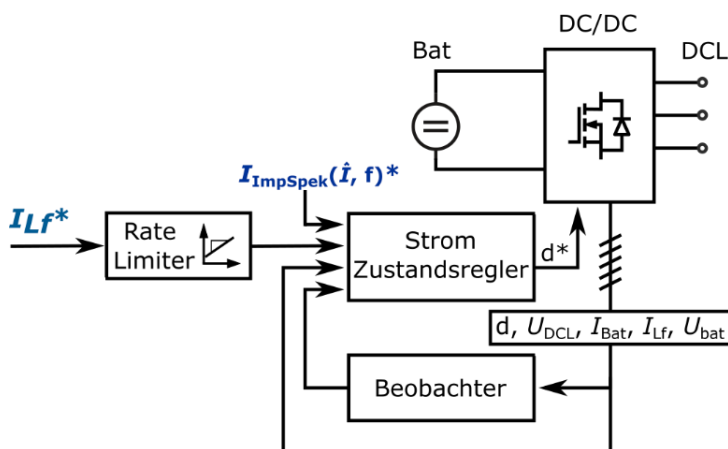


Abbildung 15: Stromregler der DC/DC-Wandler

Während der Leistungsregler durch den integrativen Anteil stationär genau arbeitet, fehlt diese Eigenschaft beim reinen Stromregler (ursprünglich, damit keine doppelt integrierende Strecke entsteht). Für stationäre Genauigkeit bei gleichzeitig hoher Dynamik hätte beim Stromregler ein neuer Regler ausgelegt werden müssen, was jedoch aufgrund des hohen Aufwands nicht realisiert wurde und erst in einem nachfolgenden Projekt getestet werden soll.

Bei den resultierenden Stromformen (Abbildung 16, Abbildung 17 und Abbildung 18) ist deshalb gerade bei niedrigen Frequenzen eine deutliche Abweichung von der idealen Sinusform erkennbar, im Frequenzspektrum wären entsprechend Oberwellen vorhanden,

die suboptimal für die Impedanzspektroskopie sind. Außerdem sind die tatsächliche Amplitude und der Strom-Offset dieser Ungenauigkeit unterworfen, sodass hier noch manuell nachjustiert werden muss, um die gewünschten Werte zu erreichen

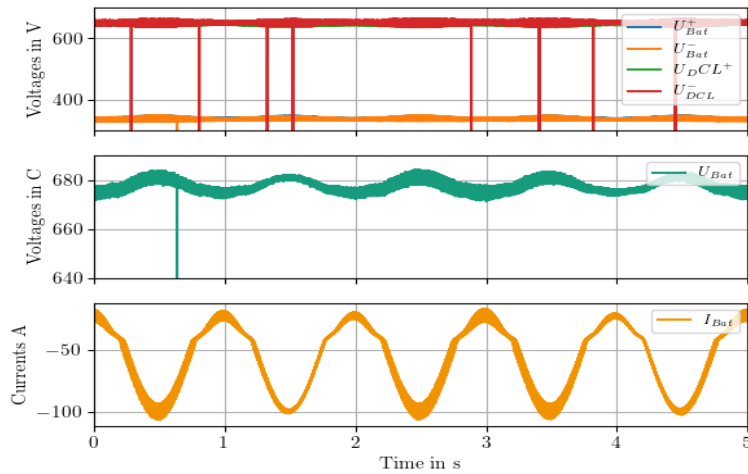


Abbildung 16: Eingprägter Sinusstrom mit 1 Hz

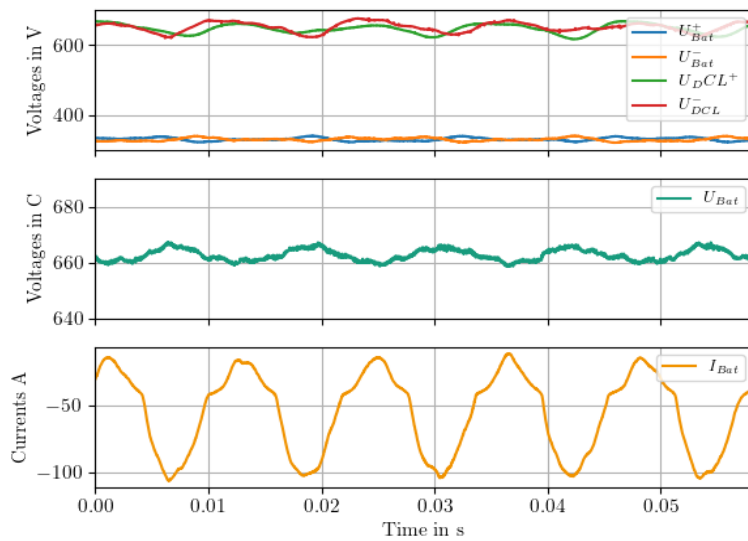


Abbildung 17: Eingprägter Sinusstrom mit 86 Hz

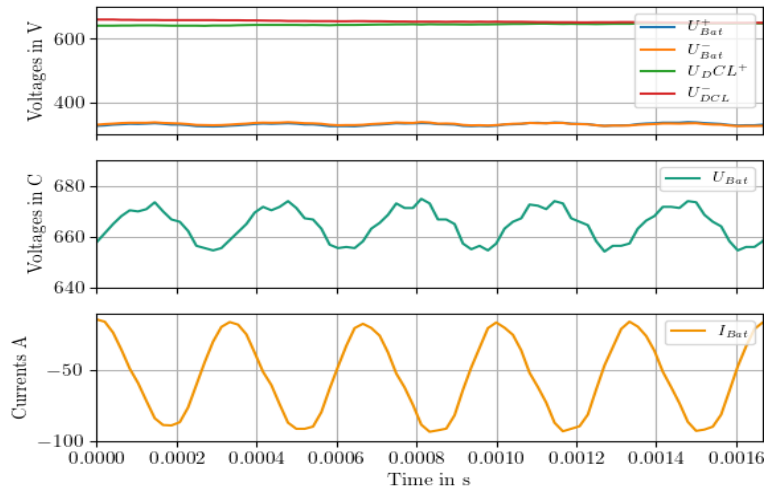


Abbildung 18: Eingprägter Sinusstrom mit 3 kHz

Die Versuche zur Elektrischen Impedanz Spektroskopie haben gezeigt, dass die Batteriesysteme in einzelnen Versuchskonstellationen in den Fehlerzustand übergehen. Tieferegehende Analysen der aufgezeichneten Messreihen haben gezeigt, dass die redundant ausgeführten batterie-internen Stromsensoren bei ausgeprägten sinusförmigen Strömen unterschiedliche Messwerte liefern und daraufhin der interne LTC-IC dem Batteriemanagementsystem unplausible Messwerte meldet, woraufhin das Batteriemanagementsystem mit dem Übergang in den Fehlerzustand und dem Öffnen der internen Schütze reagiert.

6.8 AP8 - Charakterisierung Labormuster mittels praktischer Einsatz-szenarien

In AP8 wurden experimentelle Untersuchungen zum Funktionsnachweis und zur Charakterisierung der hybriden Batteriespeicherlösung mit Energiemanagement-Einheit geplant, durchgeführt und ausgewertet. Die Referenzparametrierung lieferte für die Batteriesysteme aktualisierte Parameter des Ersatzschaltbildmodells (Ruhespannungskennlinie, Widerstand, RC-Glieder) und aktualisierte Kennfelder für DC/DC-Wandler und Wechselrichter.

Im Abschlussbericht von der TU-Dresden sind der Einfluss der Temperatur sowie Ladezustand auf die Impedanzspektroskopie detailliert dargestellt. Es konnte auch gezeigt werden, dass mittels der „normalen“ Leistungselektronik EIS-Signale generiert werden können und diese zu auswertbaren Ergebnissen führen. Dies konnte für beide Speicherbatterien (Hochenergie und Hochleistung) gezeigt werden.

6.9 AP9 - Systemanalyse und Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen

In AP9 wurde ein Simulationstool von der TU Dresden entwickelt, mit dem beliebige Konfigurationen der hybriden Lithium-Ionen-Batteriespeicherlösung hinsichtlich technischer und wirtschaftlicher Performancekriterien bewertet werden können. Das HYBAT-Simtool wurde während der Projektlaufzeit stetig um neue Module und Parameterdatensätze erweitert. Mit dem HYBAT-Simtool wurden anschließend simulationsgestützte Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen für unterschiedliche Konfigurationen der hybriden Lithium-Ionen-Batteriespeicherlösung für ausgewählte Anwendungsbeispiele unter Berücksichtigung veränderlicher Marktsituationen und regulatorischer Rahmenbedingungen durchgeführt.

AKASOL hat für die verschiedenen Batteriesysteme das Alterungsverhalten, sowie die Kostenmodelle auf Baugruppen bzw. Systemebene den Partnern bereitgestellt. Zusätzlich werden die Systeme bezüglich der Kosten pro Zyklus bewertet, so dass beim „Total Cost of Ownership“-Ansatz neben den Anschaffungskosten für einen Speicher insgesamt die Gesamtlebenszykluskosten betrachtet und entsprechend bewertet werden.

6.10 Zusammenfassung und Fazit

Übergeordnetes Projektziel: Ziel des Verbundvorhabens ist die Entwicklung einer hybriden Lithium-Ionen-Batteriespeicher-lösung mit reduzierten Gesamtsystem- und Betriebskosten durch 1500 V Systemtechnik, innovatives Thermomanagement, Online-Zustandsdiagnose und mehrkriteriell optimierende Betriebsführung.

Das Hauptziel von BorgWarner AKASOL in dem Fördervorhaben war die Entwicklung von sicheren Hochleistungsbatteriemodulen für ein Hochleistungsbatteriesystem mit einer Spannungsfestigkeit bis 1500 V inklusive einer aktiven Kühlung und einer Weiterentwicklung des Batteriemanagementsystems (BMS) bezüglich der Hard- und Software.

Im AP2 wurden Hochleistungsbatteriemodule auf Basis der am Markt verfügbaren und neuesten Entwicklungen im Bereich der NMC-Hochleistungszellen entwickelt, aufgebaut und getestet. Die Performance Tests und Sicherheitstests (Propagationstests) haben sowohl die Module mit integrierter Kühlung als auch die Module mit Bodenkühlung sehr gut bestanden. Auf Basis dieser getesteten Hochleistungsmodule wurden dann die verschiedenen Batteriekonzepte entwickelt und anhand Performance, Sicherheit, Kosten, ... bewertet. Insbesondere das Konzept B hat eine sehr hohe Leistungsdichte bei

gleichzeitig geringen Kosten und hohen Sicherheitsanforderungen. Aufgrund der deutlichen Weiterentwicklung und Kostenreduzierung insb. bei Lithium-Eisenphosphat-Batterien werden diese zukünftig den Markt der stationären Speicher dominieren, was zu einer Anpassung des Projektes bei BorgWarner Akasol geführt hat und der Aufbau der Hochleistungsbatteriesystem nicht mehr durchgeführt wurde. Unabhängig davon wurden verschiedene Batteriesysteme (Hochenergie und Hochleistung) im Projekt bereitgestellt und damit ein hybrides stationäres Energiespeichersystem zusammen mit allen Projektpartnern in AP7 aufgebaut und in AP8 getestet.

Ein weiteres Ziel war die Bewertung der aktuell in der Entwicklung befindlichen Batterietechnologien. Hierbei ist zu erwähnen, dass während der Projektlaufzeit zum einen die Rohstoffkosten insbesondere für die Herstellung von Nickel-Mangan-Cobalt Batterien um ein Vielfaches gestiegen sind und zum anderen hat sich die Energiedichte und Leistungsdichte von Lithium-Eisen-Phosphat (LFP) Batterien deutlich verbessert, so dass diese LFP-Batterien aus heutiger Sicht sehr gut für stationäre Speicher geeignet sind. Hinzu kommt noch, dass diese LFP-Batterien deutlich kostengünstiger in der Herstellung aufgrund der günstigeren Rohmaterialien sind und zukünftig auch erstmal bleiben werden. Der Markt für stationäre Energiespeicher wird in Zukunft sehr stark von der LFP-Technologie dominiert werden. Damit ist das Potential für stationäre Hochleistungsspeicher auf Basis der Nickel-Mangan-Cobalt Batterietechnik nur noch sehr gering, was zu der Anpassung des Arbeitspaketes 2 im Projekt geführt hatte.

Das weitere Ziel bezüglich der Integration einer aktiven Kühlung und eines integrierten Thermomanagements im Konsortium (konstruktiver Aufbau, Kühlkonzept, Temperaturmessstellen, etc.) wurde sehr erfolgreich zusammen mit der Firma HYDAC bezüglich der Batteriesystem am Beispiel des Demonstrators umgesetzt.

Ein weiteres Ziel war die Verbesserung der Online-Zustandsdiagnose auf Zell-, Modul- und Batterieebene. Hier lag der Schwerpunkt seitens der TU Dresden vor allem auf der Schätzung von SoH und SoC. Im Vergleich zu aktuell häufig Statistik basierten lag der Fokus hier auf der direkten Bewertung des vorliegenden Zellverhaltens. Für den SoC hat ein erweiterter Kalman Filter Ansatz seinen Weg in das Funktionskonzept gefunden. Für den SoH wurden verschiedene Wege verfolgt. Neben einem weiteren Regler-orientierten Ansatz mittels rekursivem Least-Square Algorithmus wurde auch der Einsatz von einer Online-EIS-Methodik erprobt. Parallel hierzu konnten bestehende Algorithmen durch

verschiedenste im Projekt angestoßene Tests weiterentwickelt und validiert werden. So wurden unter anderem „Accelerated Aging Tests“ auf Modulebene durchgeführt. Durch diese konnte der Einfluss des Zellverbunds gegenüber des Alterungsverhaltens auf Zell-Niveau bewertet werden. Dieses weicht durch Verpressung, „Swelling“ und „Breathing“ der Zellen, gerade für großformatige Zellen, stark ab und ist entsprechend ein nicht zu vernachlässigender Einfluss. Als Fazit dieses APs lässt sich feststellen, dass interessante Ansätze auf den Weg gebracht werden konnten die eine Stabile Bewertung der Zustände erlauben. Vorteil der Filter und Regler ist, dass diese „In-Operando“ abgewendet werden können und kein extra Zustand zur Vermessung angefahren werden muss. Dennoch bietet die Online-EIS-Vermessung eine schnelle und sehr genaue Alternative zu einer klassischen Kapazitätsvermessung. Letztendlich kann gesagt werden, dass für eine spätere Anwendung der Einsatz von mehreren parallellaufender Schätz-Varianten angestrebt werden sollte. Das ermöglicht eine gegenseitige Plausibilisierung.

Zusammenfassend wurde das übergeordnete Projektziel *„Entwicklung einer hybriden Lithium-Ionen-Batteriespeicher-lösung mit reduzierten Gesamtsystem- und Betriebskosten durch 1500 V Systemtechnik, innovatives Thermomanagement, Online-Zustandsdiagnose und mehrkriteriell optimierende Betriebsführung“* sehr gut erreicht. Dieses hybride Speichersystem wurde im Rahmen des Projektes auch aufgebaut und entsprechend getestet.

7. Wichtigste Positionen Zahlenmäßigen Nachweises

Während der Projektlaufzeit kam es aufgrund der Corona-Pandemie zu Verzögerungen sowie aufgrund veränderter Rahmenbedingungen insbesondere bei den Rohstoffen für Lithium-Ionen-Batterien und der deutlichen Weiterentwicklung und Kostenreduzierung bei Lithium-Eisenphosphat-Batterien zu der Reduzierung des Arbeitsumfanges von einem Arbeitspaket (AP2). Dies führte zu der bewilligten Änderung sowie Förderungsreduzierung bei der BorgWarner AKASOL GmbH. Unabhängig davon wurden während der gesamten Projektlaufzeit alle wesentlichen Ziele erreicht.

Ursachen für die Verzögerungen waren im Wesentlichen die Einschränkungen durch die Corona Pandemie, weshalb persönliche Treffen und Tests nicht oder nur unter strengen Bedingungen stattfinden konnten.

Die größte Position im zahlenmäßigen Nachweis sind die Personalkosten, da aus diversen Abteilungen die Fachkollegen für die verschiedenen Themen wie Modulentwicklung, Systementwicklung, Zellchemie, Zellformate, benötigt wurden. Die geplanten Stunden wurden trotz Einbeziehung weiterer Fachkollegen nicht vollständig verwendet.

Eine weitere kostenintensive Position sind die Versuchsmaterialien zu nennen, da sowohl Zellen, Module als auch verschiedene Batteriesysteme für die Versuche zur Verfügung gestellt wurden. Allerdings wurde aufgrund der während des Projektes beobachteten Änderung der Wettbewerbsposition der Umfang von einem Arbeitspaket reduziert, was dazu geführt hat, dass das Gesamtbudget des Projektes nicht ausgeschöpft wurde. Die geleisteten Umfänge wurden daher auf das notwendige und angemessene Maß reduziert, indem sich auf aussichtsreiche neue technologische Ansätze konzentriert wurde.

8. Voraussichtlicher Nutzen – Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des Fortgeschriebenen Verwertungsplan

Die gesammelten Erkenntnisse über die die verschiedenen Batterietechnologien, der Betrieb von hybriden Lithium Ionen Speichern sowie die Verbesserung der Algorithmen für die Zustandserkennung von Batterien fließen unmittelbar in künftige Batterieentwicklungen bei der BorgWarner AKASOL GmbH ein. Es wurden auf breiter technologischer Basis für alle gängigen Zellformate (Pouch, Prismatisch Hardcase und Rundzelle) Hochleistungskonzepte entwickelt und erprobt. Auch wenn aktuell eine direkte Vermarktung eines Hochleistungsspeichers im stationären Bereich nicht geplant ist, werden die Forschungsergebnisse in die weitere Entwicklung und Vermarktung von mobilen Batteriesystemen inklusive anschließender stationärer second-life Nutzung überführt. Die Technologieführerschaft bleibt ein wesentlicher Anspruch des Unternehmens, im zunehmend umkämpften Markt der Lithium basierten Batterien, die Wettbewerbsfähigkeit zu stärken.

9. Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt aus dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Durchführung des Vorhabens wurde im Wesentlichen die technologische Weiterentwicklung von Lithiumeisenphosphat Batterien beobachtet. Dies beeinflusste vor allem die Untersuchungen und Schlussfolgerungen zur Wirtschaftlichkeit verschiedener Lösungsoptionen. Aus technisch-wissenschaftlicher Sicht sind keine weiteren Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen bekannt.

10. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Der Demonstrator des DC/DC-Wandlers wurde auf der Intersolar 2022 und der Volta-X 2023 auf den jeweiligen Ständen des Fraunhofer ISE ausgestellt. Außerdem wurde ein Beitrag innerhalb des Jahresbericht des Fraunhofer ISEs 2022 veröffentlicht. FKZ 03EI3009B, Rev: 28.03.2024/14:00, Seite 66, FHG-SK: PUBLIC

Des Weiteren wurden im Zuge des Teilvorhabens zwei Conference-Paper eingereicht:

- M. Geiss, R. Kragl, J. Thoma und B. Volzer, „Non-parasitic induced transient overvoltage in ANPC topology due to critical switching sequences,“ 24th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'22 ECCE Europe), Hannover, pp. 1-10, 2022.
- R. Kragl, A. Cornelius und S. Reichert, „Battery Inverter System for Stationary, 1500 V Hybrid, Battery Storage Applications,“ 25th European Conference on Power Electronics and Applications, (EPE'23 ECCE Europe), Aalborg, Dänemark, 2023.

Außerdem ist eine gemeinsame Veröffentlichung aller vier Projektpartner nach offiziellem Ende des Projektes geplant, in dem alle Ergebnisse vorgestellt werden. Die wesentlichen Ergebnisse zu den Arbeiten an diesem Teilvorhaben werden über die Technische Informationsbibliothek, Deutsche Forschungsberichte in Hannover mit diesem Bericht veröffentlicht.

Kontakt

BorgWarner AKASOL GmbH

Kleyerstr. 20

64295 Darmstadt

Deutschland

Telefon: +49 6151 800 500 - 0

Fax: +49 6151 800 500 – 129

Mail: beberleh@borgwarner.com

www.borgwarner.com

<https://www.borgwarner.com/company/locations/darmstadt-langen>

11. Literaturverzeichnis

[Aus19]	Ausfelder et al. (Hrsg.): Sektorkopplung - Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft), München, 2017. ISBN:978-3-9817048-9-1
[Cam19]	Campbell, C.: „Lithium-ion battery cells: cathodes and costs“, 2019. online: thedeepdive.ca/lithium-ion-battery-cells-cathodes-and-costs/
[Gol19]	Goldie-Scot, L.: „A behind the scenes take on lithium-ion battery prices“, 2019. online: about.bnef.com/blog/behind-scenes-take-lithium-ion-battery-prices/

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Hybride Lithium-Ionen-Batteriespeicherlösung mit 1500 V Systemtechnik, innovativem Thermomanagement und optimierender Betriebsführung	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Vath, Andreas Eberleh, Björn Neunzling, Jan	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.09.2023
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation Sonstiges
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) BorgWarner AKASOL GmbH Kleyerstr. 20 64295 Darmstadt Deutschland	9. Ber.-Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 03EI3009A
	11. Seitenzahl 54
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 53107 Bonn	13. Literaturangaben 3
	14. Tabellen 4
	15. Abbildungen 35
16. DOI (Digital Object Identifier)	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Technische Informationsbibliothek Hannover	
18. Kurzfassung Ziel des Verbundvorhabens war die Entwicklung einer hybriden Lithium-Ionen-Batteriespeicherlösung mit reduzierten Gesamtsystem- und Betriebskosten durch 1500-V-Systemtechnik, innovativem Thermomanagement, Online-Zustandsdiagnose und mehrkriteriell optimierender Betriebsführung. Die wesentlichen im Teilvorhaben durch die BorgWarner AKASOL GmbH erreichten Ergebnisse waren: <ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung von sicheren Hochleistungsbatteriemodulen für ein Hochleistungsbatteriesystem • Bewertung der aktuell in der Entwicklung befindlichen Batterietechnologien. • Erfolgreiche Verifikation des Gesamtsystems mit Leistungselektronik, Batterien und Kühlsystem im Betrieb am Netz in mehrtägigen Dauertests • Demonstration einer Impedanzspektroskopie zur Batterie-Zustandsbestimmung durch die Leistungselektronik selbst, d.h. ohne externe Quellen oder Messgeräte 	
19. Schlagwörter Hochleistungsbatterie, Batterie-Wechselrichter, Second-Life, Impedanzspektroskopie	
20. Verlag Technische Informationsbibliothek Hannover	21. Preis

Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 2303923-11

Document control sheet

1. ISBN or ISSN planned	2. type of document (e.g. report, publication) Veröffentlichung (Publikation)	
3. title HYBAT – Hybrid Lithium-Ion Battery Storage Solution with 1500 V System Technology, Innovative Thermal Management and Optimized System Management		
4. author(s) (family name, first name(s)) Vath, Andreas Eberleh, Bjoern Neunzling, Jan	5. end of project 30.09.2023	6. publication date
	7. form of publication Sonstiges	
	8. performing organization(s) name, address BorgWarner AKASOL GmbH Kleyerstr. 20 64295 Darmstadt Deutschland	
12. sponsoring agency (name, address) Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action 53107 Bonn	9. originators report no.	
	10. reference no. 03EI3009A	
	11. no. of pages 54	
	13. no. of references 3	
	14. no. of tables 4	
15. no. of figures 35		
16. DOI (Digital Object Identifier)		
17. presented at (title, place, date) Technische Informationsbibliothek Hannover		
18. abstract The objective of the joint project was the development of a hybrid lithium-ion battery storage solution with reduced overall system and operational costs through 1500 V system technology, innovative thermal management, online condition diagnostics, and multi-criteria optimization of the system management. The key results achieved in the sub-project by BorgWarner AKASOL GmbH were: <ul style="list-style-type: none"> • Development of safe high power battery modules for a high power battery system • Evaluation of the current and future cell technology • Active cooling and thermal management (structural design, cooling concept, temperature measurement points) • Successful verification of the overall system with power electronics, batteries, and cooling system in grid operation during multi-day continuous tests • Demonstration of impedance spectroscopy for battery state determination by the power electronics itself, i.e., without external sources or measuring devices 		
19. keywords Lithium-Iron battery, battery inverter, second life, impedance spectroscopy		
20. publisher Technische Informationsbibliothek Hannover	21. price	

Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 2303961-8