

Rahmenplan zum Kompetenzcluster „Batterienutzungskonzepte“ BattNutzung



Clusterkoordinator 1 (Sprecher)

Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA), RWTH Aachen

Lehrstuhl für Elektrochemische Energiewandlung und Speichersystemtechnik

Prof. Dr. rer. nat. Dirk Uwe Sauer

Jägerstr. 17-19, 52066 Aachen

Telefon: 0241/80 96977

Email: dirkuwe.sauer@isea.rwth-aachen.de

Clusterkoordinator 2

Institut und Lehrstuhl für Elektrische Energiespeichertechnik (EES), Technische Universität München

Prof. Dr.-Ing. Andreas Jossen

Arcisstraße 21, 80333 München

Telefon: 089/289 - 26967

Email: andreas.jossen@tum.de

Clusterkoordinator 3

Fraunhofer-Institut für Siliziumtechnologie ISIT

Dr. rer. nat. habil. Axel Müller-Groeling

Fraunhoferstrasse 1, 25524 Itzehoe

Telefon: 048/2117-0

Email: axel.mueller-groeling@isit.fraunhofer.de

Inhalt

1. Mission & Ziele	3
Mission und Ziele – Zusammenfassung.....	3
Ausführliche Beschreibung des Lösungsansatzes	4
Schwerpunkt A1: Modellbildung zur Sicherheit.....	7
Schwerpunkt A2: Untersuchung und Charakterisierung sicherheitsrelevanter Prozesse und Zustände mittels herkömmlicher und neuartiger Messmethoden.....	7
Themenfeld B – Alterung & Lebensdauerprognose“	8
Schwerpunkt B1: Untersuchung von Alterungsprozessen	10
Schwerpunkt B2: Beschleunigte Alterungstests und Lebensdauerprognosen	11
Schwerpunkt B3: Diagnostik zur Alterung.....	11
Themenfeld C – Batteriesystembewertung	12
Schwerpunkt C1: Anforderungsprofile wesentlicher Batterieanwendungen	13
Schwerpunkt C2: Bewertung und Konzeption neuer Material-, Zell- und Batteriesysteme.....	14
Schwerpunkt C3: Analyse von Technologien für die Realisierung von 2nd Use-Nutzungskonzepten.....	15
Querschnittsprojekt – 2nd Use & Green Battery	16
2. BMBF-Dachkonzept Forschungsfabrik Batterie	17
3. Cluster- & Governancestruktur	19
Clusterstruktur	19
Governance-Struktur.....	20
Kooperation mit weiteren Clustern.....	22
4. Kompetenzen	25
5. Ideen-, IP- & Technologietransfer - Verwertungsplan	29
6. Finanzierung & Kostenplan	31
Anhang	32
Literatur- / Quellenverzeichnis.....	32

1. Mission & Ziele

Mission und Ziele – Zusammenfassung

Die Mission (Abbildung 1) des Kompetenzclusters „Batterienutzungskonzepte“ ist die Unterstützung der Entwicklung neuer Material- und Zellkonzepte durch

- Vergleich von Eigenschaften und Anforderungsprofilen der Anwendungen
- Bewertung von Alterung, Lebensdauer, Performance und Sicherheit
- Entwicklung von Basiskonzepten für die Diagnostik
- Entwicklungsbegleitende Analyse von Ökobilanzen und Rohstoffverfügbarkeiten
- Analyse der Skalierbarkeit Richtung großer Batteriezellen und Batteriepacks

zur Verkürzung der Innovationszyklen und der time-to-market für neue Materialien und Zellen.

Der Cluster versteht sich als wissenschaftlicher Forschungspartner für die Cluster und Projekte, in denen Material- und Zellentwicklungen stattfinden und für die Branchen, in denen Batterien genutzt werden. Die Material- und Zellentwicklung selbst ist nicht Aufgabe und Teil dieses Clusters.

Wesentliche Aufgabe des Kompetenzclusters ist es, die heute übliche sequentielle Entwicklung vom Material zur Zelle zum System erheblich zu beschleunigen, indem wesentliche Entwicklungsschritte hin zum Batteriesystem zeitlich zur Material- und Zellentwicklung parallelisiert werden.

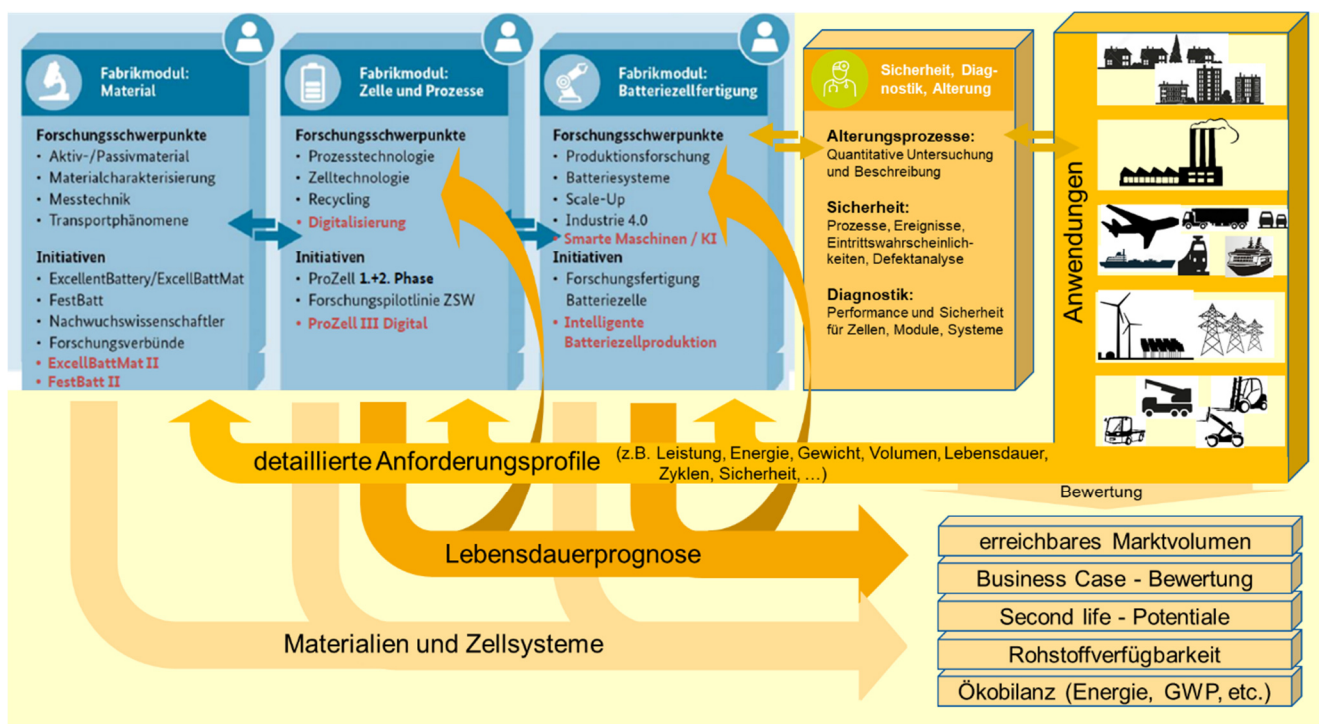


Abbildung 1: Übersicht zur Rolle und Aufgabe des Kompetenzclusters „Batterienutzungskonzepte“ in Bezug auf die Fabrikmodule des Dachkonzepts „Forschungsfabrik Batterie“

Der Bezug auf die Fabrikmodule des Dachkonzepts „Forschungsfabrik Batterie“ ist in Abbildung 1 schematisch zusammengefasst. Durch den Cluster wird eine Querverknüpfung zwischen Forschungs- und Entwicklungstrends bei Batteriezellen einerseits und Bedarfsanalysen in aktuellen und zukünftigen Anwendungsfeldern andererseits hergestellt. Es ergeben sich drei wesentliche Themenfelder für die Entwicklung passender Systemkonzepte:

1. Eine Bewertung von Sicherheit und Performance neuartiger Zellen und neuartiger Messmethoden zur Charakterisierung,
2. Eine fundierte Analyse des Themenfelds Alterung und Lebensdauerprognose sowie
3. Eine Batteriesystembewertung, welche die Ergebnisse auf Zellebene über ein Systemverständnis mit der Ebene der Anforderung verbindet.

In diesem Zusammenhang gilt es Schlüsselfaktoren zu erreichbarem Marktvolumen, Business-Case-Bewertungen und Second-Use-Potentialanalysen zu ermitteln und in Zusammenarbeit mit dem Cluster „Recycling / grüne Batterie“ – auch in Form eines Querschnittsprojektes – ebenso die Themen Rohstoffverfügbarkeit und Ökobilanz zu adressieren.

Entsprechend sollen im Kompetenzcluster „Batterienutzungskonzepte“ drei Themenfelder bearbeitet werden (siehe Abbildung 2) mit insgesamt neun Schwerpunkten. Zusätzlich wird ein gemeinsames Querschnittsprojekt zum Thema „2nd Use & Green Battery“ gemeinsam mit dem Cluster „Recycling / grüne Batterie“ implementiert.

Ausführliche Beschreibung des Lösungsansatzes

Auf Basis einer Kombination einer Vielzahl von Informationen forscht dieses Kompetenzcluster an Methoden zur umfassenden Bewertung von Materialien und Zellen in Bezug auf die Realisier- und Skalierungsmöglichkeiten und deren möglichen Anwendungen in verschiedenen Feldern. Dazu gehören Abschätzungen zu erreichbaren Marktvolumina und Business Cases für die zu erwartenden oder erreichten Leistungsparameter auch unter Berücksichtigung möglicher 2nd Use-Einsätze ebenso wie eine umfassende Ökobilanz und die Abschätzung der Rohstoffverfügbarkeit. Damit soll bereits in frühen Phasen der Entwicklungspipelines der Fokus der Material- und Zelloptimierung auf den Anwendungsbedarf gerichtet werden. Ferner können für die Material- und Zellentwicklungen für die verschiedenen TRL-Level Gateway-Anforderungen definiert werden, um die Marktrelevanz sicherzustellen. Dies führt auch zu einer effizienten Mittel- und Ressourcenallokation entlang der gesamten Wertschöpfungskette des Dachkonzeptes.

Die im Kompetenzcluster „Batterienutzungskonzepte“ adressierten Themen umfassen wesentliche Bereiche der Batteriesystemforschung. Entsprechend ist die Zahl der Forschungsstellen, die sinnvollerweise eingebunden werden sollten, groß. Forschungsstellen, die an Projekten des Clusters teilnehmen, sollen in der Vergangenheit in den jeweiligen Themenbereichen bereits signifikante Beiträge erbracht haben. Diese Beiträge sind durch öffentlich geförderte Forschungsprojekte, Forschungsprojekte im Auftrag und Kooperation mit der Industrie und eine mindestens angemessene Publikationsleistung nachgewiesen. An allen Forschungsstellen laufen verschiedene Forschungsvorhaben, die Grundlagen und Input für dieses Kompetenzcluster liefern. Das Kompetenzcluster hat zwei wesentliche Aufgaben:

a) Vernetzung und Verdichtung der Ergebnisse durch Vereinheitlichungen von Schnittstellen, Formaten und Definitionen von Zustandsvariablen von Plattformen für Simulationsmodelle, Datensammlungen und Zustandsbestimmungen sowie die Etablierung eines durchgehenden Digitalisierungskonzepts in direkter Zusammenarbeit mit allen anderen Clustern des Dachkonzeptes (z.B. elektronischer Zellpass),

b) Aufbau und Anwendung der Bewertungskompetenz von Material- und Zellentwicklungen auf allen TRL-Levels durch umfassende Projektion und Abgleich von Eigenschaften der Materialien und Zellen mit den Anforderungen verschiedener Anwendungsbereiche. Material- und Zelldaten werden aus verschiedenen Quellen zusammengetragen und können unterschiedliche Vertraulichkeitslevel haben: bei Projektpartnern im Cluster bereits vorliegende Daten, im Rahmen von Projekten des Clusters „Batterienutzungskonzepte“ bestimmte Daten, Daten aus anderen Clustern im Dachkonzept des BMBF, Daten von Industrieunternehmen.

Dadurch wird der Kompetenzcluster „Batterienutzungskonzepte“ sicherstellen, dass die Forschungsarbeiten unter dem Dach des Dachkonzepts „Forschungsfabrik Batterie“ zielgerichtet die Anforderungen in den Anwendungen erfüllen (siehe auch Mission). Eine Zell- und Materialentwicklung findet nicht statt.

Alle beteiligten Forschungsstellen verfügen über eine sehr gute technische Ausstattung für die hier jeweils vorgesehenen Aufgaben. Für die Arbeiten im Rahmen des Kompetenzclusters sind keine Anlageninvestitionen vorgesehen. Notwendig neben den Personalmittel sind Mittel für Verbrauchsmaterialien, Kleingeräte, Reisemittel und Rechnerinfrastruktur für besondere Aufgaben insbesondere im Bereich Hochleistungssimulation und wissenschaftlichem Datenmanagement für eine durchgehende Digitalisierung.

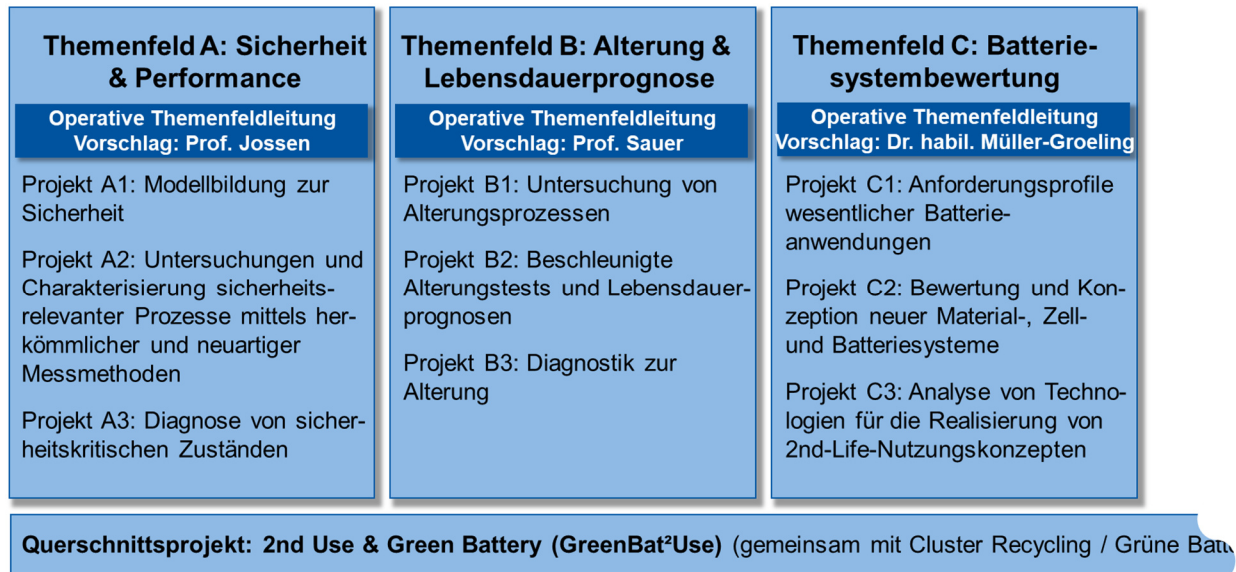


Abbildung 2: Themenfelder des Kompetenzclusters „Batterienutzungskonzepte“ mit thematischen Schwerpunkten

Themenfeld A – Sicherheit & Performance

Im Themenfeld A werden die Material- und Zellkonzepte, die in anderen Kompetenzclustern und in den Fabrikmodulen vorgelegt werden, in Bezug auf ihre Sicherheit im Betrieb charakterisiert und analysiert. Dazu gehören die Modellbildung und die experimentelle Analyse der sicherheitskritischen Prozesse und Zustände sowie neuartige Messmethoden und Diagnosealgorithmen zur Vorhersage des Sicherheitsstatus und Anzeige bevorstehender thermischer Events.

In der Literatur gibt es zahlreiche Arbeiten, die die Sicherheitsuntersuchungen von Li-Ionen Zellen beinhalten. Neben standardisierten Testmethoden [7] handelt es sich um die Entwicklung bzw. Charakterisierung von speziellen Untersuchungsmethoden, beispielsweise um einen internen oder externen Kurzschluss nachzubilden [1][2][3] oder um Ergebnisse von Sicherheitsuntersuchungen [6]. Hierbei spielen neben dem Zelldesign auch Aktiv- und Passivmaterialien und deren Kombination in der Zelle eine wichtige Rolle. Die Steigerung der Energiedichte, z.B. durch die Einführung nickelreicher Kathodenmaterialien hat aber auch eine Reduzierung der *Onset-Schwelle* für das thermische Durchgehen zur Folge [9]. Die sich anbahnende Einführung einer metallischen Lithiumanode kann auch bei Festkörperelektrolyten zu Dendriten führen [8] und stellt somit neue Herausforderungen an die Sicherheit zukünftiger Zellen dar.

Um mit gegebenen Materialien hohe Energiedichten zu erzielen, müssen Zellen mit größter Packungsdichte und somit mit möglichst geringen Volumenanteilen der passiven Komponenten (z.B. Gehäusewandstärke) auskommen. Weiterhin kommen hohe Packungsdichten auf Modul- und Systemebene hinzu. Hiermit verbunden ist bei

einem Fehlerfall einer einzelnen Zelle ein hohes Risiko des thermischen Durchgehens dieser Zelle, mit möglicherweise einem unkontrollierten Gasaustritt. Zusätzlich kann es in der Folge zu einer Fehlerfortpflanzung („Failure Propagation“ FP) innerhalb des Moduls/System kommen. In den letzten Jahren wurden zur Untersuchung der Fehlerfortpflanzung zahlreiche Messverfahren entwickelt, die mit in der Regel aufwändigen Labormessungen verbunden sind. Erste Modelle zur Beschreibung der Fehlerfortpflanzung wurden entwickelt, zeigen aber auch, dass die Wärmeübertragung durch das ausströmende Gas der durchgehenden Zelle von zentraler Bedeutung ist [4][5] und bis heute hierfür keine Modelle und Parametrierungen zur Verfügung stehen.

Die frühzeitige Diagnose von sicherheitskritischen Zuständen ist bis heute nicht befriedigend gelöst. Neben der Definition eines Sicherheitszustandes (State of Safety) [10] wird der interne Zellkurzschluss als einer der kritischsten Ereignisse zur Auslösung eines thermischen Durchgehens gesehen und ist auch mit der wichtigste Grund für in der Vergangenheit aufgetretene Fehlerfälle (z.B. Samsung Note 7, Dell Computer, Dreamliner). Neben spontanen Kurzschlüssen treten auch Fälle auf, bei denen sich der Kurzschluss im Laufe der Zeit immer niederohmiger entwickelt und dann zu einem thermischen Durchgehen führt. Bis heute sind keine zuverlässigen Verfahren bekannt, die in solchen Fällen eine frühzeitige Detektion auf Zell oder Systemebene ermöglichen.

Die Anzahl der Temperatursensoren in Batteriepacks ist geringer als die Anzahl der Spannungssensoren. Während in vielen Packdesigns jede Zelle über einen Spannungssensor verfügt, wird die Temperatur nur an einzelnen Stellen des Packs platziert. Bei suboptimal platzierten Temperatursensoren kann es zu Fehlablesungen und thermischen toten Winkeln kommen [58].

Indirekte Temperaturbestimmung über Impedanzspektroskopiemessungen an den einzelnen Zellen basieren auf Daten der Spannungs- und Stromsensoren. Es wird die Temperaturabhängigkeit der Batterieimpedanz genutzt. Ein Vorteil wäre die Temperaturschätzung jeder einzelnen Zelle [59]. Jedoch ist Vorwissen über den Zusammenhang notwendig, welcher durch Messungen vorparametriert werden kann. Weiterhin wäre durch Ausfall eines Stromsensors nicht nur die Strommessung, sondern auch die Temperaturmessung beeinträchtigt. Damit ist es von hoher Relevanz eine flächendeckende, direkte Temperaturmessung im Batteriepack zu entwickeln, die wirtschaftlich konkurrenzfähig ist. Selbst dann besteht jedoch die Problematik, dass die Gehäusetemperatur der Zelle nicht der Innentemperatur der Zelle entspricht und Abweichungen von mehreren Grad möglich sind [60]. In-situ Messmethoden wurden bereits erprobt [60, 61]. Jedoch wird das auf absehbare Zeit keine Methode sein, die großflächig in kommerziellen Batteriepacks eingebaut werden kann. Vielmehr können diese Methoden genutzt werden, um modellbasierte Schätzungen der Zellkerntemperatur aufzubauen und in Kombination mit flächendeckender Messung der Zellgehäusetemperatur die Temperaturüberwachung deutlich zu verbessern.

Die Ablagerung von metallischem Lithium kann durch erhöhte Ladeströme verursacht werden. Diese Ablagerung, Lithium-Plating genannt, kann zu Dendritenbildung führen und ist damit ein relevantes Sicherheitsrisiko. Aktuell besteht keine Möglichkeit, Lithium-Plating-Situationen direkt zu erkennen. Bekannt ist, dass bei einem Anodenpotential von unter 0 V Plating stattfindet. Eine direkte Messung des Anodenpotentials ist in kommerziellen Zellen nicht möglich. Nur im Labormaßstab konnten Referenzelektroden erfolgreich eingebaut werden [62]. Durch neuartige Messmethoden, die mechanische Veränderungen in Lithium-Ionen Zellen detektieren, können neue Informationen aus dem Innern der Zelle extrahiert werden. Es konnte bereits gezeigt werden, dass mit Hilfe von Ultraschall der Ladezustand einer Lithium-Ionen-Batterie bestimmt werden kann [63]. Dies basiert auf Materialveränderung über den Ladezustand, die das Ultraschallsignal beeinflussen.

Problemstellung: Lithium-Ionen-Batterietechnologien können sich aufgrund der gesteigerten Energiedichte, neuen Materialkombinationen und allgemeinen Fertigungstoleranzen im Laufe des Betriebs zu einem Sicherheitsrisiko entwickeln. Infolge dessen treten sicherheitsrelevante Zustände auf Zellebene und Systemebene (z.B. Betrieb außerhalb des sicheren Betriebsfensters, Feinschlüsse, interne/externe Kurzschlüsse) auf und können zu

sicherheitskritischen Prozessen (z.B. Batterieausfall, Brandrisiken durch thermisches Durchgehen) führen, die auch einen gesamten Systemausfall oder eine unkontrollierbare Kettenreaktion hervorrufen können.

Das Ziel ist es, die Sicherheit von Lithium-Ionen-Batteriezellen und -systemen durch Optimierung der Design- und Betriebsphase, Vorhersage des Sicherheitsstatus und frühzeitige Erkennung und Anzeige bevorstehender thermischer Events zu erhöhen.

Dem Ziel wird sich angenähert durch Erreichen folgender Teilziele:

- Früherkennung/Detektion/Diagnose sicherheitsrelevanter Zustände und sicherheitskritischer Prozesse
- Schnelle Charakterisierung sicherheitsrelevanter Zustände und Prozesse von Batteriezellen und -systemen
- Verständnis und detaillierte Informationen über das Batteriezell- und Modulverhalten durch Modellierung sicherheitskritischer Fälle/Zustände/Prozesse

Zur Zielerreichung sollen drei vernetzte Schwerpunkte bearbeitet werden:

Schwerpunkt A1: Modellbildung zur Sicherheit

Dieser Schwerpunkt befasst sich mit der Sicherheitsmodellierung von Batterien, um detaillierte Informationen über das Zell- und Modulverhalten zu erhalten und die anderen Themenschwerpunkte im Cluster unterstützen zu können. Die Modelle sollen sicherheitsrelevante Zustände wie z.B.

- Betrieb außerhalb des sicheren Betriebsfensters (Übertemperatur, Überladen, etc.) oder
- Produktionsfehler (Feinschlüsse),

und die daraus sich ergebenden Prozesse wie

- den Thermal Runaway (thermisches Durchgehen) einer Zelle,
- die Propagation eines Thermal Runaways (TR-Propagation) im Modul/Pack und
- Gasung

abbilden können. Die erarbeiteten Methoden zur Modellgenerierung sind mit Messungen zu parametrisieren und mit Messdaten (eigenen, ggf. aus den Schwerpunkten A2 oder A3) zu validieren. Die Modelle sollen auch eine Hilfestellung für ein "sicheres" Modul-/Packdesign geben.

Schwerpunkt A2: Untersuchung und Charakterisierung sicherheitsrelevanter Prozesse und Zustände mittels herkömmlicher und neuartiger Messmethoden

Der Schwerpunkt A2 befasst sich mit der Charakterisierung von sicherheitskritischen Prozessen und Zuständen, die einen höheren Informationsgehalt über das Zell-/Modul-/Packverhalten liefern als die Standardmessmethoden in der Anwendung. Dabei sind Informationen zum Batterieverhalten bei sicherheitskritischen Zuständen, wie z.B.

- Einfluss von der Temperatur auf Batterieparameter,
- Mechanisches Verhalten (Parameterbestimmung) oder
- Batterie- und Ausgasverhalten (freiwerdende Wärmemenge, Massenströme, Gaszusammensetzung und -menge, elektrisches Verhalten, etc.) von Interesse.

Sicherheitsrelevante Prozesse und Zuständen sind im Rahmen des Schwerpunkts A2 beispielsweise Feinschlüsse, Interne/externe Kurzschlüsse, Thermal Runaway (TR), extreme Umweltparameter (mechanische, elektrische, thermische Belastungen) oder TR-Propagation.

Die Methoden sollen gegenübergestellt und hinsichtlich dem Nutzen und des Aufwandes verglichen werden. Die Bewertung erfolgt nach Informationsgehalt, Standardisierung, Reproduzierbarkeit, Aufwand, Übertragbarkeit auf neue/andere Zellchemien und Zellformate, sowie auf die Anwendung in A3. Insbesondere soll auch gerade im Hinblick auf mögliche 2nd Use-Szenarien die Veränderung des Sicherheitsstatus mit fortschreitender Lebensdauer bzw. Alterung untersucht und quantifiziert werden. Gealterte Zellen zur Untersuchungen sollen zumindest zum Teil aus Themenfeld B zur Verfügung gestellt werden.

Schwerpunkt A3: Diagnose von sicherheitskritischen Zuständen

Dieser Schwerpunkt befasst sich mit der Diagnose von sicherheitskritischen Zuständen im Betrieb. Grundlage für die Diagnose bilden die Messgrößen gängiger Batterie-Management-Systeme (BMS), insbesondere Spannung, Strom und Temperatur und daraus abgeleitete Größen (Ladezustand, Kapazität, etc.). Die Diagnose kann sich auf einzelne Zellen bzw. auch auf Module oder ganze Batteriepacks beziehen. Das Zeitfenster für die Diagnose umfasst sowohl kurzfristige als auch langfristige Zustände.

Unter den Schwerpunkt Diagnose von sicherheitskritischen Zuständen fallen z.B. Detektion von

- Lithium Plating,
- Feinschlüssen in der Zelle,
- externen Kurzschlüssen auf Zell/Modul/Pack-Ebene,
- abnormalem thermischem Verhalten auf Zell/Modul/Pack-Ebene oder
- sicherheitskritischen Zellen im Modul/Pack (Lokalisierung).

Untersucht werden soll, inwieweit Diagnoseverfahren das Risiko für das Eintreten sicherheitskritischer Vorgänge in der Zukunft einschätzen können. Derartige Informationen sind bei der Überführung in den 2nd-use Anwendungen und bei Restwertbestimmung von Batterien von zentraler Bedeutung.

Für die Zustände sollen Methoden zur Diagnose im Betrieb erarbeitet und mit Hilfe von Versuchen validiert werden. Dabei sollen auch die folgenden Anforderungen an das BMS und Batteriesystem bewertet werden:

- Benötigte Messgrößen
- Benötigte Messgenauigkeit der Messgrößen
- Benötigte Abtastrate der Messgrößen
- Aufwand und Genauigkeit der hinterlegten Modelle
- Skalierbarkeit der Methode von Zelle zu Modul/Pack
- Übertragbarkeit der Methoden auf neue/andere Zellchemien und Zellformate

Themenfeld B – Alterung & Lebensdauerprognose

Im Themenfeld B werden die bestimmenden Alterungsprozesse experimentell untersucht und quantitative Modelle zu deren Abbildung aufgestellt. Dies dient dem Kernziel zur Entwicklung beschleunigten Alterungstests, bei

der nach einer Woche, nach vier Wochen und nach drei Monaten zunehmend umfassende Analysen über die zu erwartende Lebensdauer von produzierten Batteriezellen vorgelegt werden. Die Tests werden sich entsprechend der Anforderungsprofile verschiedener Anwendungen unterscheiden, aber das Zusammenspiel aus Experimenten, Post-Mortem-Analysen und Modellbildung soll die Zahl unterschiedlicher Tests minimieren. Diese Analysen sollen eine zeitnahe Rückmeldung in den Produktionsprozess in Bezug auf die Qualität und Eignung der verwendeten Materialien und Produktionsprozesse geben, um durch schnelle Rückkopplungen den Optimierungsprozess zu beschleunigen.

In der Entwicklung von Hochenergiebatterien mit nickel- und manganreichen und kobaltarmen Kathoden [53] wie auch die Zugabe von Silizium zum Anodenmaterial zeigen Forschungsbedarf im Gebiet der elektrochemischen Mechanik. Siliziumlegierungen mit Lithium, führen beispielsweise bei der Lithiumeinlagerung zu einer Volumenausdehnung von bis zu 280% [54] im Vergleich zu Graphit mit 10% [51, 52]. Die Folgen sind zum Beispiel, dass eine große Volumenarbeit einen strukturellen Zerfall der aktiven Materialien verursacht, was zu einem Kontaktverlust mit dem Bindemittel und dem leitenden Ruß führt, die Elektronenleitung reduziert und die thermischen und ohmschen Widerstände erhöht [55]. Darüber hinaus beeinträchtigt die mechanische Verformung des aktiven Materials die Stabilität der Elektrolyt-Grenzfläche (SEI), was zu einer nachhaltigen Verringerung der zyklischen Lebensdauer führt. Dennoch bleibt die Aufrechterhaltung der mechanischen Festigkeit aktiver Materialien eine große Herausforderung für Hochenergie-Elektroden, und dennoch eröffnen die Perspektiven der Mechanik wichtige Erkenntnisse für die Entwicklung zuverlässiger Batteriezellen [56, 57].

Basierend auf den experimentellen Alterungstests ist es entscheidend, ebenfalls Online-Methoden für Batterieanwendungen mit maschinellem Lernen zu entwickeln, die verfügbare Daten nutzen, um den Degradationsstatus der Zellen abzuschätzen [47, 48] und die Lebensdauer vorherzusagen [49]. Insbesondere die Zweitnutzung einer Batterie hängt stark von einer präzisen Lebensdauerprognose ab, da diese den potenziellen Wert in einer neuen Anwendung bestimmt. Die zuverlässige Überwachung und Vorhersage der Zellogradation als funktionaler Bestandteil eines Batteriemanagementsystems (BMS) ist daher, sowohl für Hersteller als auch Kunden von Elektrofahrzeugen und anderer Energiespeicheranwendungen, von entscheidender Bedeutung.

Ziel der Projekte des Themenfeldes soll es sein, neuartige Materialien und Batteriezellen in möglichst kurzer Zeit in Bezug auf die zu erwartende Lebensdauer in unterschiedlichen Anwendungen zu bestimmen. Damit sollen Entwicklungsprozesse sowohl im Bereich der Materialien als auch der Fertigungstechnik durch schnelle Rückmeldeschleifen bzgl. der Qualität beschleunigt werden. Dabei soll das ganze Spektrum von elektrischen, nicht-zerstörenden Tests, Post-Mortem-Analysen sowie Modellierung und Simulation angewendet werden. Für die Entwicklung der Verfahren und Prozeduren können kommerzielle, state-of-the-art Batteriezellen verwendet werden. Die entwickelten Methoden müssen aber auch im Rahmen der Projekte auf neue Zellen und Materialien aus der Forschungsfertigung Batteriezelle (FFB) oder anderen Clustern und Initiativen innerhalb und außerhalb des Dachkonzepts „Forschungsfabrik Batterie“ angewendet werden.

Für die schnelle Bewertung von neuen Batteriezellen stehen eine große Bandbreite an Verfahren unterschiedlicher Reifegrade zur Verfügung: elektrochemische Impedanzspektroskopie [36], Kapazitätsmessungen [37], Differenziell Spannungsanalyse [38], Float-Strom-Messungen [39], Präzisions-Coulombetry [40]. Diese Verfahren können eine schnelle Bewertung des Alterungsverhalten ermöglichen. Welche speziellen Bedingungen eine Beschleunigung ermöglichen und inwiefern diese Ergebnisse auf reale Anwendungen übertragbar sind, soll erforscht werden. Weiterhin sollen die Verfahren spezielle für die Anwendung in der schnellen Charakterisierung verbessert werden. Die Testmethoden und die Auswertung der Testdaten muss der Industriellen Anwendung genügen und der kleinen Probengröße Rechnung tragen. Dazu werden - zum Beispiel – Fehlerbetrachtungen [41] und Reproduzierbarkeitsanalysen [42] sowie Untersuchung der Probenvarianz [43, 44] erwartet. Weiterhin soll das Verständnis von Alterungsmechanismen gesteigert werden. Einerseits ermöglicht das Indikatoren für die

Qualität einer Zelle [45] festzuhalten andererseits können die gewonnenen Erkenntnisse in Alterungsmodelle einfließen welches eine anwendungsnahe Alterungsprognose ermöglicht [46].

Schwerpunkt B1: Untersuchung von Alterungsprozessen

Es sollen Alterungsprozesse für die verschiedenen Materialklassen und Zelldesigns identifiziert werden, die die Lebensdauer maßgeblich beeinflussen. Entsprechend ist eine Analyse des Impakts von Alterungsprozessen durchzuführen. Für diese Alterungsprozesse sollen Testprozeduren entwickelt werden, die eine Anregung der Prozesse in möglichst kurzer Zeit ermöglichen und die dann durch geeignete zerstörungsfreie Methoden oder Post-Mortem-Analyse eindeutig identifiziert und quantifiziert werden sollen. Ziel ist die Erstellung eines funktionalen Zusammenhangs zwischen Belastungsprofil, Fortschritt des Alterungsprozesses und Auswirkungen auf die Zellperformance.

Bisher intensiv untersuchte Alterungsfaktoren umfassen unter anderem C-Rate, Entladetiefe, Ladezustand und Temperatur [22-25]. Darüber hinaus treten den Alterungsprozess beeinflussende Effekte bedingt durch eine Inhomogenisierung der Lithium-Verteilung [26] und Überhangeffekte der Anode [27,28] auf. Die Ursache dieser Alterungsfaktoren lässt sich dabei der zyklischen Alterung bei Beaufschlagung der Zellen mit Lastprofilen oder der kalendarischen Alterung zuschreiben [29]. Bei dem durch die Zellalterung bedingte Kapazitätsverlust kann zwischen reversiblen und irreversiblen Kapazitätsverlusten unterschieden werden [28]. Wesentliche Alterungseffekte umfassen den Verlust an zyklisierbarem Lithium und den Verlust elektrisch angebundenen Aktivmaterials [30]. Eine Trennung dieser Effekte lässt sich beispielsweise durch das Balancing von Halbzell-OCVs an die OCV einer gealterten Vollzelle realisieren [31]. Bekannte Ursachen für den Verlust zyklisierbaren Lithiums sind der Verbrauch von Lithium in Nebenreaktionen wie der Bildung von SEI und die Abscheidung metallischen Lithiums (Plating) [32]. Der Verlust elektrisch angebundenen Aktivmaterials ist hingegen zurückzuführen auf den Bruch von Partikeln [32] sowie die Auflösung von Aktivmaterial durch elektrochemische Prozesse [33]. Eine Untersuchung des Alterungsprozesses wird sowohl durch elektrische Messmethoden wie Kapazitätstests und Elektrochemische Impedanzspektroskopie [34] wie auch mittels physikalisch-chemischer Untersuchungen an Zellkomponenten nach Zellöffnung [35] durchgeführt.

In diesem Schwerpunkt soll der Fokus auf Methoden liegen, die in relativ kurzer Zeit und für hohe Fallzahlen für die Entwicklungsbegleitung (kontinuierlicher Qualitätssicherungsprozess) eingesetzt werden können.

- Untersuchung des Einflusses mikroskopischer und makroskopischer Inhomogenitäten innerhalb von Zellen auf die Alterung
- Identifikation der wesentlichen Alterungsprozesse und den Wirkmechanismen, die zu einer Reduktion von Performance führen
- Entwicklung standardisierter Testprozeduren inkl. zerstörungsfreier Messtechnik und Post-Mortem-Analysen zur quantitativen Aufklärung der Alterungsprozesse für neue Materialien und Zellen

Bei den Themen „Alterung“ und „Sicherheit“ wird sich der Cluster „Analytik / Qualitätssicherung AQUA“) schwerpunktmäßig einerseits mit der Entwicklung neuer Diagnoseverfahren und der Untersuchungen von Prozessen auf Materialebene andererseits beschäftigen. Im Vordergrund steht die Aufklärung fundamentaler Alterungsprozesse. Der Cluster „Batterienutzungskonzepte“ beschäftigt sich mit der Alterung auf Elektroden- und Zellebene mit dem Ziel, Modelle zu entwickeln, die Lebensdauern in der eigentlichen Nutzung vorhersagen sollen. Die beiden Cluster werden sich hier entsprechend der Längenskalen, auf denen die Betrachtung stattfinden, unterscheiden.

Die „Diagnostik“ im Cluster „Analytik / Qualitätssicherung“ bezieht sich auf eine in-line Diagnostik während des Produktionsprozesses. Im Cluster „Batterienutzungskonzepte“ ist die Diagnostik eine Zustandsbestimmung während der Nutzungsphase an der vollständigen Zelle oder Batterie.

Schwerpunkt B2: Beschleunigte Alterungstests und Lebensdauerprognosen

Ergebnisse der Projekte sollen Verfahren zur beschleunigten Lebensdauerprognose für reale Anwendungen sein. Die Lebensdauern werden prinzipiell immer besser und damit dauern klassische Prüfstandtests zu lange, um als Grundlage von Entwicklungsprozessen geeignet zu sein. Es werden Konzepte gesucht, bei denen nach 2 Wochen, nach 6 Wochen und nach 3 Monaten zunehmend belastbare und differenzierte Prognosen für die Lebensdauern vorgelegt werden können, die in die Material- und Produktionsprozessentwicklung zurück gespiegelt werden können. Dabei sind Recovery-Effekte in Ruhe- bzw. Standphasen genauso zu berücksichtigen wie Multi-Stress-Szenarien (wechselnde Stromstärken, Temperaturen, DODs, Drücke, etc.), wie sie in praktischen Anwendungen typisch sind.

- Entwicklung elektrischer Tests mit Multi-Stress-Anregung zur schnellen Lebensdauerbestimmung
- Kombination von Erkenntnissen aus physikalisch-chemischen Analysen von Alterungsprozessen (insbesondere auch Erkenntnisse aus dem Schwerpunkt "Untersuchung von Alterungsprozessen" und dem Cluster „Analytik / Qualitätssicherung" und schnellen elektrischen Tests")
- Konkrete Aussage zur Lebensdauererwartung einer Zelle zur Rückmeldung in den Material- und Herstellungsentwicklungsprozess
- Modellbildung zur Alterung z.B. in Koordination mit Arbeiten im Cluster "ExcelBattMat"
- Analyse der Streuung im Alterungsverhalten bei Zellen aus einem Herstellungsbatches, Nutzung der Ergebnisse u.a. in Schwerpunkt C2
- Verfahren zur effektiven Multi-Stress Alterung auf Prüfständen (Temperatur, Stromraten, Ladezustandsniveaus, Druck, mechanischer Stress (Vibrationen, Schock) inkl. mathematischer Verfahren zur rechnerischen Separierung der verschiedenen Prozesse
- Modellentwicklung zur Alterungsprognose für Gesamtsystemsimulationen (in Schwerpunkt C2) bei verschiedenen Belastungsprofilen

Schwerpunkt B3: Diagnostik zur Alterung

Batterien sind komplexe elektrochemische Systeme, deren Leistung mit der Nutzung und der Zeit abnimmt, und die genaue Diagnose und Prognose der Degradation von Batterien unter realen Bedingungen sind die Schwerpunkte der gegenwärtigen Forschung. Da die Degradation von Batterien ein komplexer nichtlinearer Prozess mit verschiedenen internen Mechanismen ist, die nur schwer genau modelliert werden können, werden in den Projekten datenbasierte Methoden auf der Grundlage von Alterungstestdaten zur Degradationsdiagnose und -prognose untersucht. Testverfahren sollen entwickelt und implementiert werden, um eine größere Menge an Alterungsdatensätzen mit mehr Zellen und verschiedenen Alterungsszenarien zu generieren [50], als die Datensätze in der Literatur verfügbar sind. Auf der Grundlage dieses Datensatzes werden verschiedene datengestützte Modelle entwickelt und implementiert, sowohl für die Abschätzung des Alterungszustandes als auch für die Vorhersage der Lebensdauer. Die Anforderungen an den Datensatz zur Beschreibung der Alterung (z.B. Anzahl der Messpunkte, zeitliche Auflösung und Genauigkeit), sollen auch mit dem generierten Alterungsdatensatz und den entwickelten Datengestützten Methoden untersucht werden.

Entwickelt werden sollen online-Verfahren, die den Alterungszustand und die zu erwartenden verbleibende Lebensdauer diagnostizieren. Konzeptionell kann es sich dabei um Verfahren zur Implementierung im Batteriemanagementsystem oder Kombinationen mit Cloud-Computing handeln. Fragestellungen können sein:

- Definition eines geeigneten End-of-Life-Kriteriums – Standard ist heute eine verfügbare Kapazität von 70 oder 80%. Gibt es alternative Kriterien, die z.B. die Beschleunigung der Alterung („Abknicken“) als Kriterium verwenden?

- Modelbasierte Verknüpfung des Alterungszustands durch Kapazitätstests und Ausdehnungsmessungen
- Online-Diagnostik, die die verbleibende Lebensdauer unter der Annahme gleichbleibender Belastungsprofile vorhersagt
- Entwicklung von Datengestützten Methoden, die aus den Sensorwerten der Zelle eine Schätzung des derzeitigen State of Health (SOH) ermöglichen. Ein wichtiger Punkt ist die Entwicklung von Machine-Learning-Modellen zur Abschätzung der Zellkapazität auf der Grundlage der Ladephase eines Ladevorgangs.
- Entwicklung von Datengestützten Methoden, die den Verlauf des SOH nutzen, um den Degradationsverlauf vorhersagen.
- Berücksichtigung der Streuung innerhalb eines Batteriepacks und Auswirkungen auf die Gesamtperformance und Lebensdauer
- Definition von Mindestanforderungen an die Datenaufzeichnung der Batterie, um eine umfassende Diagnose des Zustands online oder offline vorlegen zu können und die insbesondere Grundlage einer Restwertbestimmung sein kann und die als Startpunkt der technischen und wirtschaftlichen Analyse möglicher Zweitanwendungen dienen kann
- Untersuchung der Anforderungen an Alterungstests für die Entwicklung von Datengestützten Methoden. Mögliche Parameter sind unter anderem die erforderliche Mindestanzahl von Zellen bei verschiedenen Lastprofilen und Umweltbedingungen.
- Datengestützte Prädiktion eines möglichen Knickverhaltens im Alterungsverlauf von Batteriezellen
- Entwicklung der Validierungs- und Bewertungsmethoden für die datenbasierten Modelle zur Alterungsschätzung und Lebensdauervorhersage. Ein wichtiger Punkt ist die Validierung der datenbasierten Methoden, wie z.B. der Machine-Learning-Modelle, mit einer eingebetteten Hardware mit verschiedenen Szenarien, um das Potential der weiteren Anwendung zu bewerten.

Themenfeld C – Batteriesystembewertung

Im Themenfeld C werden in engem Kontakt mit Nutzern verschiedene Anwendungsfälle analysiert und Lastenhefte für Anwendungen und Anwender herausgearbeitet. Darauf aufbauend werden Gap-Analysen unter Berücksichtigung bestehender Material-, Zell- und Batteriesystemkonzepte sowie eine Abschätzung der Marktpotentiale durchgeführt.

Es soll ein gesamtheitliches Verfahren entwickelt werden, dass es erlaubt, vorliegende Zellen oder Prototypen mit Hilfe eines Katalogs von Nutzungsszenarien zu bewerten und einzuordnen. Die Nutzungsszenarien werden dabei aus den verschiedenen heute verfügbaren Anwendungsfelder für Batterien in stationären, mobilen und medizinischen Anwendungen entwickelt. Zudem sollen elektrifizierbare Anwendungen, die in Zukunft mit Hilfe von Batterien bedient werden können, in die Nutzungsszenarien aufgenommen werden. Die Nutzungsszenarien werden abgeschätzt und aus heute verfügbaren Daten entwickelt, dabei spielen zyklische Belastungsprofile ebenso eine Rolle wie Entladeströme, typische Lagerungsperioden, Temperatureinflüsse, mechanische Belastung und besondere Umgebungsbedingungen (z.B. korrosive Umgebung in maritimen Anwendungen). Eine Ableitung der Belastungsprofile sollte dabei auf Basis von möglichst realen Anwendungsdaten erfolgen, die je nach Leistungsbereichen geclustert werden können. Wichtiger Bewertungspunkt sind zudem die Sicherheitsanforderungen der jeweiligen Anwendung. Mit Hilfe dieses gesamtheitlichen Verfahrens soll dann ermittelt werden, welche Zellen sich für die jeweiligen Nutzungsszenarien eignen und ob sie in einigen Anwendungen durch ihre Materialeigenschaften besondere Vorteile zeigen.

Auf Basis der Kostenstruktur der jeweiligen Batteriezellen und den geeigneten Anwendungen sollen Verfahren weiterentwickelt werden, die zukünftige Marktpotentiale abschätzen können. Zudem sollen die Gap-Analysen

helfen die Anwendungen zu identifizieren, die trotz hoher Marktpotentiale noch keine geeigneten Speicherlösungen in Aussicht haben aufgrund technologischer Defizite.

Bereits bestehende Lösungen, z.B. Material- und Zellkonzepte aus anderen Kompetenzclustern oder den Fabrikmodulen, werden dabei auf Basis digitaler Modelle hinsichtlich ihrer Passgenauigkeit zu den Anforderungsprofilen analysiert. Dazu werden holistische Speichersystemmodelle entwickelt, mithilfe derer Batteriezellen, Speicherkomponenten und Anwendungsanforderungen ganzheitlich abgedeckt werden. Neben Einzelbetrachtungen werden auch Kombinationen verschiedener Zelltypen und Anwendungsfälle analysiert. In Fällen großer Defizite und Potentiale werden konkrete Lösungsvorschläge erarbeitet, die auch den Aufbau von Funktionsmustern umfassen können. Ein weiterer Schwerpunkt werden Anwendungsfälle mit Potential für eine 2nd-Life-Nutzung sein. Dabei werden soweit notwendig in Einzelfällen auch neue Lösungen entwickelt oder bestehende Lösungen an konkrete Anwendungsfälle adaptiert.

Zur Gesamtbewertung gehört auch die Schaffung von Metriken zur Untersuchung des ökologischen Footprints und der Rohstoffbilanz der untersuchten oder erarbeiteten Technologien bzw. Nutzungskonzepte. Diese Analysen inkl. der Betrachtung der Upstream-Wertschöpfungskette werden als Schwerpunkt des Clusters „Recycling / grüne Batterie“ durchgeführt. Deren Ergebnisse werden dann mit den Erkenntnissen aus der Sicherheits- und der Lebensdaueranalyse zusammengeführt, um damit Profile für Materialien, Zellen und Systeme anlegen zu können, die frühzeitig deren möglichen Erfolg in Anwendungen darlegen.

Schwerpunkt C1: Anforderungsprofile wesentlicher Batterieanwendungen

Lithium-Ionen-Batterien werden heute bereits in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt. Im Konsumerbereich, der Elektromobilität, bei Power Tools und stationärer Energiespeicherung spielen sie eine zentrale Rolle. Auch in neuen Nutzungsszenarien wie der Logistik, Flurförderfahrzeugen, für Schiffsantriebe und im Flugzeug- bzw. Drohnenbau aber auch in der Medizintechnik werden sie zunehmend wichtiger. Diese verlangen oftmals nach Zellen, die besondere Charakteristiken aufweisen. Ziel ist es daher, diese besonderen Anforderungen herauszuarbeiten und mit aktueller sowie zukünftiger Zelltechnologie abzugleichen. Die in diesem Themenschwerpunkt gesammelten Informationen dienen als Grundlage für Kalkulations- und Simulationswerkzeuge im Themenschwerpunkt „Bewertung und Konzeption neuer Material-, Zell- und Batteriesysteme“ sowie für sicherheitstechnische Betrachtungen im Themenfeld „Sicherheit & Performance“. Sie sollen aber auch direkt zur Orientierung für die Entwicklung neuer Batteriematerialien und Zellkonzepte in der Forschungsfertigung Batteriezelle (FFB) oder anderen Clustern und Initiativen innerhalb und außerhalb des Dachkonzepts „Forschungsfabrik Batterie“ sowie in der Industrie dienen.

Der Themenschwerpunkt soll sich daher mit folgenden Aufgaben beschäftigen:

- Ermittlung von konkreten Anforderungsprofilen für Batteriezellen (u.a. kalendarische und zyklische Lebensdauer, gravimetrische und volumetrische Energiedichte, Leistungsanforderungen beim Entladen, Ladedauern, Temperaturbereiche, mechanische Belastungen, Außendruck, Zuverlässigkeit, Sicherheit) für unterschiedliche Nutzungsszenarien (Marktanalyse, Forecast, Literaturrecherche, Industrieworkshops, Erstellung von Lastenheften)
- Analyse von Sicherheitsanforderungen der Nutzungsszenarien in Bezug auf Batteriematerialien der neuesten Generation sowie potentieller neuer Zelltechnologien (Verknüpfung mit Themenfeld A notwendig)
- Gap-Analyse unter Berücksichtigung bestehender und zukünftiger Material-, Zell- und Batteriesystemkonzepte
- Entwicklung einer Standardisierung zur Aufnahme der Anforderungsprofile und zur Ableitung von Zellspezifikationen

Schwerpunkt C2: Bewertung und Konzeption neuer Material-, Zell- und Batteriesysteme

Dieser Schwerpunkt befasst sich mit der Erstellung einer holistischen Systemsimulation von der Zelle bis zur Speicheranwendung und findet in enger Abstimmung mit den Themenschwerpunkten C1 und C3 statt. Insbesondere wird eine Einbeziehung der aus C1 erlangten Erkenntnisse zu standardisierten Anwendungsprofilen und Zell-Anforderungsprofilen vorausgesetzt, um passende Systemkonzepte in der Simulation zu erarbeiten. Es sollen zudem neue Material-, Zell- und Batteriesysteme untersucht werden und auf Seiten der Anwendung neue Nutzungsszenarien und kombinierte Anwendungsfälle mit untersucht werden. Dabei sollen alle aktuellen Entwicklungen weltweit einbezogen werden. Als ein Ergebnis sollen digitale Werkzeuge zur Verfügung gestellt werden, die ein vereinfachtes anwendungsspezifisches Zell- und Batteriesystemdesign und deren umfassende Bewertung bzgl. Materialbedarf, elektrischer Charakteristik, ökologischer Fußabdruck und erreichbaren Kostenzielen erlauben.

Im Rahmen des Schwerpunkts soll eine holistische Systemsimulation ermöglicht werden. Aktuell ist die Abschätzung der Eigenschaften neuer Materialien hinsichtlich der Performance auf Zelllevel nur durch viele Annahmen und mit damit verbundenen Ungenauigkeiten verbunden. Literaturquellen [64], [65], [66] zeigen erste Ansätze zur ganzheitlichen Betrachtung des Einflusses von Materialeigenschaften auf Zell- und Systemebene. Allerdings fehlt die Skalierbarkeit mit Hilfe von geometrischen Parametern, die fundierte Begründung zur angegebenen Leistungsfähigkeit, sowie die anforderungsspezifische Auslegbarkeit solcher neuartigen Systeme. Daher ist es zwingend erforderlich, dass ein Tool erarbeitet wird, mit dem fundierte Aussagen über die Leistungsfähigkeit in höheren Levels anhand der Materialparameter getroffen werden können. Hier gibt es aktuell große Unterschiede, wie in [67] beschrieben.

Ein Tool zum Zell- und Systemdesign sowie eine Datenbank, in der Material und Geometriedaten gespeichert und vom Tool genutzt werden können, stellt hier ein zentrales Ziel des Schwerpunkts dar. Der angestrebte Bottom-Up Ansatz ermöglicht eine wesentlich schnellere und präzisere Vorhersage der Zelleigenschaften und Zellperformance durch geometrische, elektrochemische und physikalische Multi-Physics-Modelle.

Als Kernaufgaben wird der Themenschwerpunkt deshalb die folgenden Aufgaben beinhalten:

- Aufbau / Weiterentwicklung einer holistischen Speicher-Systemsimulation: „Von der Zelle bis zur Anwendung“, die Designtools für Batteriezellen und Programme zur Anwendungsmodellierung verknüpft
- Open-Source-Bereitstellung der entwickelten Simulationsplattform für Stakeholder aus Forschung und Industrie in den Bereichen Zellfertigung, Systemdesign und Speicher-Anwendung.

Zellebene:

- Neu- oder Weiterentwicklung eines Tools für einen „digitalen Zwilling“ mit dem aus Daten zu den Materialeigenschaften ein virtuelles Zelldesign vorgenommen und bzgl. Materialbedarf, elektrischer Charakteristik, ökologischer Fußabdruck und erreichbaren Kostenzielen inkl. Produktionskosten bewertet werden kann
- Berücksichtigung der Komposition der Materialien inkl. Leitrutsche und Binder, Verwendung von Blends als Elektrodenmaterialien, der Balancierung der Elektroden und des geometrischen Aufbaus der Elektroden und der Zelle
- Modellierung des Alterungs- und Sicherheitszustands von bestehenden und neuartigen Batteriezellen in Abhängigkeit des Belastungsprofils.
- Schnittstelle zu den Daten zur erreichbaren Lebensdauer und zum Sicherheitszustand, die von den Themenfeldern A und B bereitgestellt werden
- Durchführung einer anwendungsspezifischen LCA auf Zellebene

- Aufbau einer Datenbank mit Material- und Geometriedaten, aus welcher sich die Performance-Parameter ableiten lassen
- Entwicklung neuer anwendungsspezifischer Zelldesignkonzepte (offene Ableiter, Verbindungsstellen innerhalb und außerhalb der Zelle, Temperierkonzepte, etc.), ggf. Validierung

Systemebene:

- Modellierung von Speicher-Gesamtsystemen inklusive deren Peripherie (Leistungselektronik, Thermisches Management, Nebenverbraucher)
- Kalkulation von passenden System-Spezifikationen für unterschiedliche Nutzungsszenarien auf Basis von Zelldaten („Bottom-up“), ggf. Validierung
- Modellierung der Gesamtsystem-Alterung: Einbeziehen von Zellalterung (aus Schwerpunkt B2) und Leistungselektronik-Alterung für vorgegebene Anwendungsfälle
- Maximal-Ertrags-Bestimmung: Abschätzung der maximal möglichen kombinierten Belastung stationärer Anwendungsfälle („Dual Use / Value Stacking“), welche sich mit vorgegebener Zell/Pack-Konfiguration bedienen lassen
- Optimale Zell-Konfigurations-Ermittlung: Kombinatorische Methoden zum Auffinden bester Zell-Konfigurationen aus Einzelzellen / "Mischverbau" („Hybridbatterien“) um vorgegebene Anwendung optimal erfüllen zu können (Top-Down)

Anwendungsebene:

- Einbeziehung der Anwendungsprofil-Standards aus Schwerpunkt C1 – herunterbrechen von Anwendungsprofilen auf Systemvorgaben
- Kosten-Nutzen-Analysen: Zell- und Materialkosten, Systemkosten, vs. anwendungsspezifischer Revenue
- Ermittlung verschiedenster Key-Performance-Indikatoren, ökonomisch und ökologisch) - Mit einer Schnittstelle zu den ökologischen Bewertungen aus Themenfeld C3 und dem Querschnittsprojekt „2nd Use & Green Battery“

Schwerpunkt C3: Analyse von Technologien für die Realisierung von 2nd Use-Nutzungskonzepten

Dieser Schwerpunkt umfasst die Betrachtung technologischer Lösungen zur Etablierung einer Zweitverwertung von Zellen und Batteriesystemen in unterschiedlichen Nutzungsszenarien. Dabei soll auch die Frage beantwortet werden, welche Anforderungsprofile mit gebrauchten Zellen adressiert werden können und welche systemischen Voraussetzungen (Sicherheitstechnik, Kühlung) dafür benötigt werden. Darüber hinaus soll untersucht werden, inwieweit die Zweitverwertung schon bei der Material- und Zellentwicklung berücksichtigt werden kann bzw. sollte. Wichtig sind dafür auch die in C1 erlangten Erkenntnisse sowie unter C2 entwickelte Werkzeuge sowie Resultate aus den Themenfeldern A und B zur Sicherheitsanalyse und Lebensdauerprognose.

- „Design for 2nd Use“ von Zellen und Systemen, Entwicklung konkreter Umsetzungskonzepte von der Zelle bis zum System
- Entwicklung von Konzepten zur vereinfachten Zelldemontage von Modulen
- Adressierung von Herausforderungen in den Themenfeldern Systemsicherheit und Brandschutz durch Entwicklung geeigneter Systemkonzepte; Einbeziehung aktueller Normen
- Entwicklung eines Tools zur Erstellung eines optimalen Designs eines 2nd Use-Systems auf Basis der realen Zellspezifikationen gealterter Zellen, bzw. zur Auswahl geeigneter gealterter Batteriemodule / Bat-

teriepacks für die Bedienung einer vorgegebenen Anwendung durch kombinatorische Methoden. Hierbei soll eine enge Zusammenarbeit und Abstimmung mit dem Cluster „Recycling / grüne Batterie“ sowie mit dem Begleitprojekt „2nd use & Green Battery“ stattfinden.

- Best-fit Optimierung/Kombinatorik: Auswahl der „besten“ (platz-/preisgünstigsten) Konfiguration von zuvor in einer Datenbank (elektronischer Pass) abgelegten Zellen für einen vorgegebenen Anwendungsfall
- Entwicklung oder Optimierung eines Balancierungs-Tools und eines BMS für den Betrieb von Speichersystemen mit unterschiedliche Alterungszustände bzw. Zellformaten

Querschnittsprojekt – 2nd Use & Green Battery

Im Querschnittsprojekt wird eine systematische Analyse der Potentiale von 2nd Use-Konzepten vorgenommen. Dabei sollen mögliche Anwendungsbereiche für 2nd Use-Einsätze identifiziert und für die Anforderungs- und Belastungsprofile bestimmt werden. Aus dem Themenfeld A werden Diagnoseverfahren bereitgestellt, mit denen der Zustand der Batterien am Ende ihres „First Life“ bestimmt werden kann. Die Lebensdauerprognoseverfahren aus dem Themenfeld B werden eingesetzt, um bereits begleitend zur Material- und Zellentwicklung (in anderen Clustern und Projekten) zu analysieren, welche Lebensdauer jeweils im ersten und im zweiten Leben möglich wäre. Das Themenfeld C liefert Belastungsprofile, Simulationstools als Plattform und Technologien, die für eine effektive, sichere und zuverlässige Nutzungsumwidmung notwendig sind. Aus dem Cluster „Recycling / grüne Batterie“ werden zusätzliche Informationen über die Kosten und den Wert von Zerlegung oder Recycling bereitgestellt. Zentrales Ergebnis des Querschnittsprojekts wird eine ökologische und ökonomische Bewertung sowie eine technische Machbarkeitsanalyse für Second-Life-Konzepte sein.

Zentrales Element ist die Transparenz aller Ergebnisse durch die Etablierung eines „elektronischen Passes“ für alle Materialien und Zellen (→ enge Abstimmung mit „Cluster ExcellBattMat“ und Themenfeld B). Aufsetzend auf den Vorarbeiten des Prozell-Clusters wollen wir hier eine Erweiterung bzgl. der Themen elektrische Performance, Lebensdauer, Sicherheit, Ökobilanz und Rohstoffverfügbarkeit erarbeiten. Die Daten sollen durch KI-Anwendungen aus den Bereichen Big Data und Machine-Learning ausgewertet und nutzbar gemacht werden.

2. BMBF-Dachkonzept Forschungsfabrik Batterie

Ziel des BMBF-Dachkonzepts ist die Etablierung einer Innovationspipeline entlang der Wertschöpfungskette „Batteriezelle“ über nahezu alle TRL-Levels hinweg. Dadurch sollen sowohl die Forschungsfertigung Batteriezelle, in der neue Materialien, Zellkonzepte und Produktionsprozesse zusammengeführt werden (siehe auch Abbildung 1), als auch insbesondere die Industrie direkt – auch in Einzelaspekten – unterstützt werden. Darin hat das Kompetenzclusters „Batterienutzungskonzepte“ folgende Missionen:

- Vergleich von Eigenschaften und Anforderungsprofilen der Anwendungen
- Bewertung von Alterung, Lebensdauer, Performance und Sicherheit
- Entwicklung von Basiskonzepten für die Diagnostik
- Entwicklungsbegleitende Analyse von Ökobilanzen und Rohstoffverfügbarkeiten
- Analyse der Skalierbarkeit Richtung großer Batteriezellen und Batteriepacks
- **Verkürzung der Innovationszyklen und der time-to-market für neue Materialien und Zellen**

Der wesentliche Beitrag des Kompetenzclusters „Batterienutzungskonzepte“ zum Dachkonzept ist somit die Absicherung der Relevanz aller Entwicklungen in Bezug auf die Nutzung der Batteriezellen und die Verkürzung der time-to-market für neue Material- und Zellkonzepte durch umfassende Analysen bzgl. Diagnosefähigkeit, Lebensdauer, Sicherheit und Ökobilanzen.

Der Cluster Batterienutzungskonzepte stellt im Dachkonzept „Forschungsfabrik Batterie“ die Schnittstelle zur Anwendung von Batterien dar. Einerseits werden detaillierte Bedarfsanalysen bzgl. der Spezifikationen in den verschiedenen Anwendungen erstellt und Referenzdaten zum Stand der Technik bereitgestellt, um die neuen Materialien und Zellen daran zu messen. Andererseits werden durch umfassende Untersuchungen zur Sicherheit und zur Alterung sowie zum Potential einer Weiterverwendung nach Ende des Einsatzes in der Erstverwendung ganz wichtige Daten für die technische und wirtschaftliche Bewertung der neuen Materialien und Zellen zur Verfügung gestellt. Durch die neuen Methoden und Werkzeuge soll diese Bewertung auch bereits in einem frühen Entwicklungsstadium erfolgen, so dass Gesamtbatteriekonzepte inkl. Sicherheitskonzept, Batteriemanagement, Diagnostik und thermischem Management bereits zur Entwicklung des Produktionsprozesses entwickelt werden können. Heute erfolgt dies sequentiell. Dadurch geht heute sehr viel Zeit bis zur Markteinführung verloren, die wir mit Hilfe des Clusters gewinnen möchten.

Der Cluster Batterienutzungskonzepte soll auch helfen, die Entwicklung neuer Materialien und Zellformate an den Bedürfnissen der Anwendung auszurichten. Damit können langwierige und teure Entwicklungsrichtungen vermieden werden.

Der Cluster erfüllt seine Mission, wenn es gelingt, die anderen Cluster und Initiativen des Dachkonzepts „Forschungsfabrik Batterie“ und die Forschungsfertigung Batteriezelle (FFB) so zu unterstützen, dass deren Ergebnisse und Erkenntnisse erfolgreich und wesentlich schneller, als das heute der Fall ist, in praktische Anwendungen umgesetzt werden können. Eine wichtige Aufgabe ist auch die Entwicklungen von Methoden und die Bereitstellung von Daten zur Bestimmung der Energiebilanz, der CO₂-Emissionen, des ökologischen Fußabdrucks und der zu erwartenden Gesamtwirtschaftlichkeit in den unterschiedlichen Anwendungsfeldern. Dazu gehört auch die Analyse möglicher Zweitverwertungen der Batterien in „2nd Use-Anwendungen“. Es wird analysiert werden, wie die Sicherheit gebrauchter Batterien in neuen Anwendungen ist, wie lange deren zu erwartenden Restlaufzeiten sind und wie das Design von Batteriemodulen und -zellen aussehen muss, damit eine wirtschaftlich attraktive Zweitverwertung möglich ist.

Entsprechend ist es auch eine Mission des Clusters, möglichen Anwendungen einer neuer Batterietechnologie oder -zelle bereits in einer frühen Phase ein umfassendes (virtuelles) Bild des neuen Produkts zu vermitteln. Auch

dies hilft wieder, die Entwicklungszyklen erheblich zu verkürzen, denn die Planungen für neue Projekte und Produkte können bereits auf Basis der virtuellen Abbilder neuer Batteriezellen, -module und -packs anlaufen, bevor die einzusetzende Zelle überhaupt gefertigt ist.

3. Cluster- & Governancestruktur

Clusterstruktur

Der Cluster besteht aus den Elementen Forschungsstellen, Koordinatoren, Projekte, Schwerpunkte, Themenfelder, übergreifendes Clusterprojekt und Managementkreis.

Forschungsstellen: Qualifizierte Lehrstühle oder Institute von Hochschulen, Universitäten und außeruniversitären Forschungseinrichtungen mit Sitz in Deutschland, die vom BMBF gefördert werden können.

Koordinatoren: Drei Koordinatoren, die vom BMBF für die Konzeptentwicklung und Leitung des Clusters benannt worden sind und die gegenüber PTJ und BMBF Rechenschaft schuldig sind bzgl. der Entwicklung und der Zielerreichung des Clusters.

Projekte: Werden von Forschungsstellen eingereicht und folgen dabei den Themenschwerpunkten, die für den jeweiligen Schwerpunkt, dem ein Projekt zugeordnet ist, definiert worden sind. Jedes Projekt muss klar seinen direkten oder indirekten Beitrag zur Clustermission definieren. Jedes Projekt muss auch bereit sein, die entwickelte Methodik auf Materialien und Zellen anderer Cluster anzuwenden. Dafür müssen ausreichend Ressourcen vorgesehen sein. Dies dient einerseits der Weiterentwicklung und Verifikation der Methodik und andererseits dem Erfüllen der Mission des Clusters.

Schwerpunkte: Sind thematische Unterpunkte der Themenfelder, zu denen Projektskizzen eingereicht werden können.

Themenfelder: Fassen themenverwandte Schwerpunkte zusammen, innerhalb derer ein direkter Austausch von Methoden, Daten und Erkenntnissen sinnvoll und notwendig ist, um einerseits Doppelarbeiten zu vermeiden und andererseits die Clustermission erfüllen zu können.

Übergreifendes Clusterprojekt: Zusammen mit den Koordinatoren des Clusters „Recycling / grüne Batterie“ führen die Koordinatoren die Ergebnisse aller Themenfelder aus beiden Clustern zusammen und ermöglichen damit eine holistische Bewertung von technischer Machbarkeit, Ökonomie und Ökologie von Batterienutzungen inkl. 2nd Use-Konzepten unter Berücksichtigung von Recycling und Designs für „Grüne Batterien“.

Managementkreis: Vertreter von Industrieunternehmen aus verschiedenen Branchen bilden den Managementkreis. Der Managementkreis empfiehlt die Projekte für die verschiedenen Themenfelder und wird kontinuierlich über den Fortschritt der Projekte und den Erkenntnissen des Clusters insgesamt unterrichtet. Der Managementkreis gibt Stellungnahmen gegenüber dem PTJ und dem BMBF über den Zustand der Projektarbeit ab und kann sich nach eigenem Ermessen auch in Projekte z.B. durch die Zurverfügungstellung von Daten oder Anforderungsprofilen einbringen.

Des Weiteren besteht Austausch mit dem Beirat „Batterieforschung“ sowie anderen Clusterleitungen (und Projekten) sowie weiteren öffentlich geförderten Forschungsprojekten mit thematischer Nähe zum Cluster.

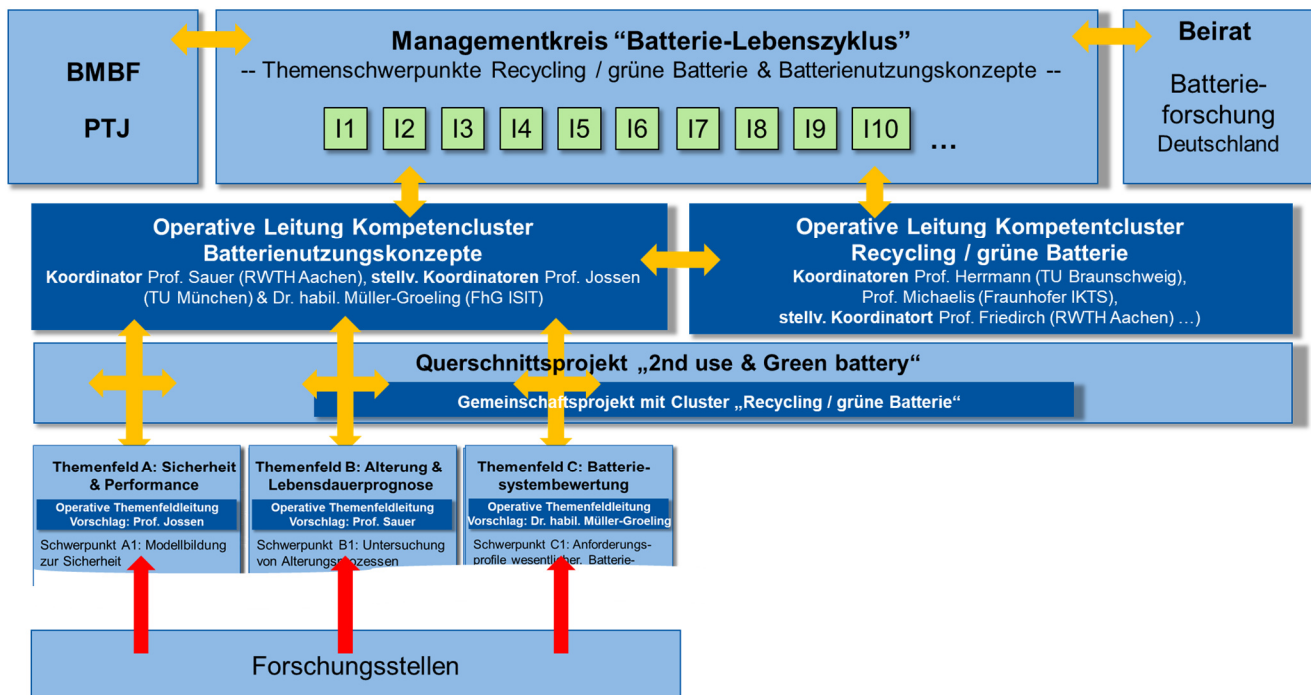


Abbildung 3: Vorgeschlagene Managementstruktur mit gemeinsamen Managementkreis mit Kompetenzcluster „Recycling / grüne Batterie“

Der Cluster wird aus einer Reihe von Projekten gebildet, die die insgesamt neun definierten Schwerpunkte thematisch abbilden sollen. Forschungsstellen können Clusterskizzen einreichen, die anschließend vom Managementkreis bewertet und dem BMBF zur Förderung empfohlen werden.

Jeder Schwerpunkt ist einem Themenfeld zugeordnet. Die Projekte innerhalb eines Themenfeldes sollen einen kontinuierlichen Austausch auf Arbeitsebene etablieren. Für jedes der drei Themenfelder ist einer der Clusterkoordinatoren verantwortlich und wird die Verbindungen der Projekte im Themenfeld mit den anderen Themenfeldern aber auch anderen Clustern und Initiativen innerhalb und außerhalb des Dachkonzepts „Forschungsfabrik Batterie“ sowie der Forschungsfertigung Batteriezelle (FFB) herstellen. Die enge Verbindung zwischen den Projekten soll durch eine gemeinsame Projektdarstellung im Internet, durch regelmäßige Treffen auf Arbeitsebene und vierteljährliche Treffen der Projektleitungen sichergestellt werden. Die Clusterkoordinatoren sind dafür verantwortlich, dass die Ergebnisse mindestens halbjährlich den Mitgliedern des Managementkreises zugänglich gemacht werden. Die eigentliche Präsentation kann dabei durchaus durch die Mitarbeiter/innen der einzelnen Projekte erfolgen.

Governance-Struktur

Um sicherzustellen, dass die Clustermission und damit die Rolle und Aufgabe des Clusters im Dachkonzept „Forschungsfabrik Batterie“ erfüllt werden kann, gibt es eine intensive Vernetzung und Kommunikation zwischen allen am Cluster beteiligten Forschungsstellen und den aktiven Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern. Nachstehend sind die wesentlichen Organe des Clusters aufgeführt. Um den Aufwand für Treffen und Abstimmung im Griff zu halten, wird einerseits massiv auf elektronische Meetingformate gesetzt werden (Reduzierung des Reiseaufwands und bessere Verfügbarkeit insbesondere der Projektleiter für relativ kurze, dafür häufigere Meetings) und bei Präsenzveranstaltungen werden Meeting auf verschiedenen Ebenen gebündelt.

Die Organe des Clusters, deren Zusammensetzung und Aufgaben im Sinne der Organisations- und Governance-Struktur sind:

Versammlung der Projektpartner: Jedes Projekt etabliert einen umfassenden Austausch zwischen den Projektpartnern und stellt sicher, dass die Schnittstellen der Arbeiten umfassend definiert sind, dass gemeinschaftlich die Projektziele adressiert werden, dass eine gemeinsame Publikationsstrategie aufgestellt und umgesetzt wird, und dass den formalen Anforderungen eines geförderten Projekts, also einerseits der Berichterstattung über den Projektfortschritt gegenüber dem Projektträger und andererseits der Berichterstattung und Diskussion von Fragestellungen und Ergebnissen mit den Mitgliedern des Managementkreises nachgekommen wird.

Versammlung des Themenfeldes: Unter der Leitung des jeweils zuständigen Koordinators tagen mindestens 3 mal im Jahr die Leitungen der Projekte des Themenfeldes. Diese Treffen dienen der Abstimmung der Arbeiten, dem gegenseitigen Bereitstellen von Daten und Informationen sowie der Abstimmung von Untersuchungen an neuen Materialien und Zellen, die aus anderen Clustern oder Fabrikmodulen kommen. Zusätzlich werden sich auf der inhaltlichen Ebene die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Projekte in geeigneter Weise austauschen. Die können elektronische Austauschplattformen sein, gemeinsame Workshop oder auch der wechselseitige Aufenthalt bei anderen Forschungsstellen, die in dem Themenfeld aktiv sind.

Versammlung des Clusters: Unter Leitung der Cluster-Koordinatoren findet einmal im Jahr ein zweitägiges Projekttreffen mit allen Teilnehmern des Clusters statt. Auf diesen Treffen können sich auch die Mitglieder des Managementkreises ein umfassendes Bild vom Stand und den Erkenntnissen der Clusterprojekte machen. Auf den Veranstaltungen werden in verschiedenen Formaten Erkenntnisse ausgetauscht, Zusammenarbeiten abgesprochen oder die Zeitpläne für die Bereitstellung von Proben und Prüflingen für andere Projekte. Für die verschiedenen Veranstaltungsteile wird jeweils ein/e Verantwortliche/r benannt, der die Vorbereitung übernimmt und im Vorfeld auch die Ziele der jeweiligen Gesprächsrunde herausarbeitet.

Versammlung der Koordinatoren: Die Koordinatoren tauschen sich monatlich über den Zustand und Fortschritt der Arbeiten in den Projekten und Themenfeldern aus. Die Koordinatoren monitor den Fortschritt der Projekte entsprechend der dort erstellten Roadmaps und den gemeinsam erstellten Plänen bzgl. Veröffentlichungen, Austausch mit anderen Clustern und Erreichung der Clustermissionsziele. Die Koordinatoren stehen zudem im stetigen Kontakt mit den Leitungen der Forschungsfertigung Batteriezelle (FFB) und anderen Clustern und Initiativen innerhalb des Dachkonzepts „Forschungsfabrik Batterie“. Dadurch soll vor allem sichergestellt werden, dass dort entwickelte neue Materialien oder Zellen in die Projekte dieses Clusters eingespeist und charakterisiert werden können. Einerseits dient dies der Weiterentwicklung der Methoden, die in den verschiedenen Projekten entwickelt werden, und andererseits soll im Sinne der Clustermission schnelle Rückmeldungen an die Entwickler der Materialien und der Produktionsprozesse gegeben werden, um die „Verkürzung der Innovationszyklen und der time-to-market für neue Materialien und Zellen“ zu erreichen.

Managementkreis: Der gemeinsame Managementkreis mit dem Cluster „Recycling / grüne Batterie“ bewertet den Fortschritt der Projekte und des Clusters insgesamt und berät die Projekt- und Clusterleitung, den PTJ und das BMBF in Bezug auf die Ausrichtung der Projekte. Zudem unterstützen die Industrievertreter die Projekte des Clusters bei der Datenbeschaffung und z.B. bei der Ausarbeitung von Definitionen für Key Performance Parametern. Nachstehend finden sich weitere Aufgaben und Arbeitsmodi der Mitglieder des Managementkreises.

Die **Aufgaben und der Arbeitsmodus des Managementkreises** können wie folgt beschrieben werden. Zusätzlich gilt die Standardvereinbarung zwischen PTJ/BMBF und den persönlichen Mitgliedern des Managementkreises, die auch die Geschäftsordnung für den Managementkreis und die Geheimhaltungsvereinbarung enthält. Teil dieser Vereinbarung ist auch, dass der Managementkreis eine/n Vorsitzende/n auf ihrem Kreis wählt.

- Beratung des BMBF bzgl. der Sinnhaftigkeit von Zielen, Projekten und Ergebnissen des Clusters
- Begutachtung der Projektskizzen für den Cluster und Ausarbeitung von Empfehlungen an das BMBF
- Kontinuierliche Weiterentwicklung und Anpassung der strategischen Ziele des Clusters entsprechend des sich ändernden Rahmbedingungen bzgl. Technologien und Markt
- Definition und Identifikation der Fragestellungen und Mitarbeit bei Anwendungsspezifikationen
- Regelmäßige Präsentation der Ergebnisse der Clusterprojekte auf Managementtreffen (2x im Jahr, möglichst verbindliche Teilnahme der Mitglieder des Managementkreises)
- Einmaliger Workshop nach Start der Projekte mit allen Projektleitern/innen der Clusterprojekte um ein einheitliches Verständnis der Mission des Clusters zu erreichen.
- Evaluations-Feedback durch Mitglieder des Managementkreises nach halbjährigen Gesamtsitzungen
- Einladung der Mitglieder des Managementkreises zu Arbeitstreffen der Themenfelder, der Projekte und des Gesamtclusters als Angebot, Teilnahme ggf. je nach Thema und Interesse (nicht verpflichtend für Mitglieder des Managementkreises; anders als für die Treffen des Managementkreises können die Mitglieder des Managementkreises für diese Treffen auch Vertreter benennen, sofern diese die gleichen Geheimhaltungsvereinbarungen unterschreiben)
- Abgleich von Ergebnissen, Annahmen, Parametern, etc. der Clusterprojekte mit den Erkenntnissen und Roadmaps der Unternehmen
- Vermittlung von Kontakten zu anderen Unternehmen und Personen in Unternehmen, die wertvollen Input für die Clusterprojekte liefern könnten
- Die Mitglieder des Managementkreises erhalten direkten Zugang zu Arbeitsdokumenten und Publikationen auf der gemeinsamen Dokumentenplattform der Clusterprojekte
- Aus der Teilnahme am Managementkreis ergeben sich keine Nutzungs-, Patent- oder Lizenzrechte an Ergebnissen der Clusterprojekte

Es wird angestrebt während der Laufzeit zusammen mit anderen Clustern zwei Mal eine jeweils einwöchige „Sommerschule“ für die wissenschaftlichen Mitarbeiter/innen des Clusters zu organisieren. Diese Veranstaltungen sind Teil der Projektarbeit, weil hier ein intensiver und tiefgehender Austausch über Methoden und Erkenntnisse aus verschiedenen Clustern erfolgen wird. Gleichzeitig sollen hier auch Kontakte geknüpft werden, auf deren Basis dann enge Zusammenarbeit entstehen sollen.

Kooperation mit weiteren Clustern

Das Dachkonzept „Forschungsfabrik Batterie“ umfasst aktuell die nachfolgend aufgeführten Cluster und Fabrikmodule. Dargestellt wird jeweils auch, welche Schnittstellen und Anknüpfungspunkte zu den verschiedenen Modulen und Clustern bestehen oder bestehen könnten:

- **Cluster ExcelBattMat** (hervorgegangen aus den Excellent Battery Zentren)
Im Cluster ExcelBattMat werden neue Materialien entwickelt. Für neue Materialien können wir die Bewertung und Charakterisierung bzgl. verschiedener Anwendungen durchführen und damit die iterative Weiterentwicklung beschleunigen. Zudem gibt es im Cluster eine Reihe von Teilprojekten, die sich auch

mit Modellierung und Alterung beschäftigen. Hier sollen die Synergien genutzt werden und wo möglich ein Austausch von Daten und Modellen erfolgen.

- **Cluster FestBatt**

Der Cluster fokussiert sich auf die Entwicklung von Festkörperelektrolyten für Lithium-Ionen-Batterien. Auch hier kann unser Cluster Prototypenzellen mit den neuentwickelten Festkörperelektrolyten charakterisieren und Anwendungsfelder identifizieren. Insbesondere kann auch ein Abgleich der Eigenschaften mit dem Stand der Technik in verschiedenen Anwendungen erfolgen.

- **Cluster ProZell**

Im Cluster ProZell werden neue Produktionsverfahren und –maschinen entwickelt. Zellen, die auf den Pilotanlagen des Clusters entstehen, werden im Cluster „Batterienutzungskonzepte“ analysiert und charakterisiert. Dabei stehen hier insbesondere die Analyse der Alterungsprozesse und die Lebensdauerprognose im Vordergrund. Von besonderer Bedeutung ist die schnelle Analyse und Prognose, damit diese Erkenntnisse für die Weiterentwicklung der Produktionsanlagen und der Einstellung der Prozessparameter genutzt werden können.

- **Cluster Intelligente Batteriezellproduktion**

Im Cluster „Intelligente Batteriezellproduktion“ werden neue Produktionskonzepte entwickelt. Der Cluster „Batterienutzungskonzepte“ kann die produzierten Zellen aus Prototypenanlagen charakterisieren und damit eine direkte Rückmeldung bzgl. der Qualität der Zellen geben. Damit wird eine direkte Rückkopplungsschleife gebildet, die zur beschleunigten und zielgerichteten Entwicklung der Produktionsprozesse führt.

- **Cluster Recycling / grüne Batterie**

Die Zusammenarbeit mit dem Cluster Recycling / grüne Batterie ist durch den gemeinsamen Managementkreis, die enge thematische Abstimmung und das gemeinsame Querschnittsprojekt institutionalisiert. Insbesondere im Bereich der Lebenszyklusanalyse werden wichtige Daten ausgetauscht. Zudem liefert der Cluster „Batterienutzungskonzepte“ Bewertungen für Batterien in Anwendungen, die im Sinne der Circular Economy helfen zu entscheiden, welchen Verwertungsweg die Batterien gehen können.

- **Cluster Analytik / Qualitätssicherung**

Die „Diagnostik“ im Cluster „Analytik / Qualitätssicherung“ bezieht sich auf eine in-line Diagnostik während des Produktionsprozesses. Im Cluster „Batterienutzungskonzepte“ ist die Diagnostik eine Zustandsbestimmung während der Nutzungsphase an der vollständigen Zelle oder Batterie.

Bei den Themen „Alterung“ und „Sicherheit“ wird sich der Cluster „Analytik / Qualitätssicherung“ schwerpunktmäßig einerseits mit der Entwicklung neuer Diagnoseverfahren und der Untersuchungen von Prozessen auf Materialebene andererseits beschäftigen. Im Vordergrund steht die Aufklärung und Beschreibung von Alterungsprozessen. Der Cluster „Batterienutzungskonzepte“ beschäftigt sich mit der Alterung auf Elektroden- und Zellebene mit dem Ziel, Modelle zu entwickeln, die Lebensdauern in der eigentlichen Nutzung vorhersagen sollen. Die beiden Cluster werden sich hier entsprechend der Längenskalen, auf denen die Betrachtung stattfinden, unterscheiden.

- **Fabrikmodule „Material“, „Zelle und Prozesse“ und „Batteriezellfertigung“**

Die Fabrikmodule fassen thematisch nahe beieinanderliegende Cluster und weitere Förderinitiativen des BMBF zusammen. Daraus entsteht ein noch größerer Pool an Wissen, Daten, Materialien und Zellen, die zur gegenseitigen Befruchtung der Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten dienen können. Die Themen der Zusammenarbeit sind entsprechend denen, die bei den vorstehenden Clustern erläutert worden sind.

Die Clusterkoordinatoren werden mit den Koordinatoren aller anderen Clustern ein Auftaktgespräch führen, um die Schnittstellen und die Möglichkeiten der Zusammenarbeit intensiv zu diskutieren. Auf der Basis sollen Roadmaps für die Zusammenarbeit entstehen, die dann mit den Leiterinnen und Leitern der Projekte des Clusters Batterienutzungskonzepte verfeinert werden. Dabei geht es insbesondere darum, aus den verschiedenen Clustern und Modulen Materialien und Zellen zur Charakterisierung zu übernehmen und zum anderen Erkenntnisse und Daten für die Gesamtbewertung und Charakterisierung auszutauschen. Der Cluster Batterienutzungskonzepte versteht sich dabei als Unterstützer der Arbeiten und Entwicklungen in den anderen Clustern.

Mit allen Clustern soll über die Weiterentwicklung eines digitalen Passes für die Batterien, der diese über die gesamte Lebensdauer von der Herstellung der Materialien bis zum Recycling begleitet. Ein entsprechendes Konzept wird im Cluster ExcelBattMat bereits entwickelt, soll aber nun noch erheblich erweitert werden. Dazu ist es notwendig, mit allen Forschungsstellen, die an den verschiedenen Clustern beteiligt sind, und insbesondere auch Vertretern der Industrie entlang der gesamten Wertschöpfungskette ein gemeinsames Konzept zu entwickeln und implementieren. Dazu sollen zunächst Konsultationen mit Industrieunternehmen, die an verschiedenen Stellen der Wertschöpfungskette tätig sind, geführt werden. Daraus ergibt sich der Bedarf an Informationen, der idealerweise im digitalen Pass bereitgestellt werden muss. In einem oder mehreren Workshops mit Vertretern aus der Industrie, Verbänden und Forschung soll dann ein Vorschlag unter den Aspekten Umsetzbarkeit, Daten- und Vertraulichkeitsschutz sowie technische Realisierung diskutiert und verabschiedet werden.

4. Kompetenzen

Nachfolgend wird ein Überblick über Forschungsstellen gegeben, die in Deutschland im thematischen Umfeld des Kompetenzclusters „Batterienutzungskonzepte“ tätig sind. Die Auflistung erhebt weder Anspruch auf Vollständigkeit noch ergibt sich aus der Reihenfolge der Einträge in der Liste in irgendeiner Weise eine Wertung über die Qualität oder den Umfang der Arbeiten an den verschiedenen Einrichtungen. Aus der Aufführung in der Liste ergibt sich kein Anspruch auf Berücksichtigung in Projekten des Clusters sowie auch Forschungsstellen, die nicht aufgeführt sind, Projektskizzen einreichen können. Bei der Beschreibung der Tätigkeiten und der handelnden Personen der einzelnen Forschungsstellen handelt es sich um eine Zusammenstellung der Autoren dieses Rahmenplans, die ebenfalls keinen Anspruch auf Vollständigkeit und Richtigkeit erhebt.

Professur für Elektrische Energiespeicher, Hochschule Landshut, Prof. Pettinger

Die Professur für Elektrische Energiespeicher an der Hochschule Landshut ist für die wissenschaftliche Leitung des Technologietransferzentrums Energie der Hochschule Landshut verantwortlich und beschäftigt sich mit Technologien der Zellfertigung, sowie neuartigen hochenergetischen und schnellladefähigen Anodenmaterialien.

Institut für Innovative Mobilität (IIMo), FH Ingolstadt, Dr. Meinert Lewerenz

An der FH Ingolstadt werden umfangreiche Untersuchungen vor allem zur Lebensdauer und zur Diagnostik von Lithium-Ionen-Batterien vor allem für automobiler Anwendungen durchgeführt. Dafür steht auch eine umfassende Laborausstattung zur Verfügung.

Institut für Energie- und Klimaforschung – Grundlagen der Elektrochemie (IEK 9), Forschungszentrum Jülich, Prof. Rüdiger Eichel

Der Bereich „Grundlagen der Elektrochemie (IEK 9)“ des Forschungszentrum Jülich beschäftigt sich mit leistungsstarken und ressourceneffizienten Materialien und Komponenten zur elektrochemischen Energiespeicherung, insbesondere Festkörper- und Metall-Luft-Batterien. Umfangreiche Kompetenzen bestehen im Bereich der Analytik und insbesondere auch der in-situ Beobachtung von Prozessen in elektrochemischen Systemen. Ein Schwerpunkt in der Diagnostik ist NMR.

Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT, Pfinztal, Prof. Jens Tübke

Batterien, Brennstoffzellen, elektrochemische Sensoren und Analysensysteme sind die Arbeitsschwerpunkte des Produktbereichs Angewandte Elektrochemie des Fraunhofer-Instituts für Chemische Technologie. Die zivilen und wehrtechnischen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten reichen von der Materialcharakterisierung und –optimierung bis zur Methodenentwicklung und der Herstellung von Prototypen. Umfangreiche Test- und Entwicklungsmethoden für Brennstoffzellen, Batterien und Komponenten werden entwickelt und als Serviceleistung angeboten.

Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg, Dr. Matthias Vetter

Das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE beschäftigt sich neben der Photovoltaik mit Batteriematerialien, -zellen, -modulen und -systemen gängiger und zukünftiger Technologien. Das Fraunhofer ISE verfügt über umfangreiches Equipment zum Testen von Batterien, um IKT-Plattformen für den Betrieb von verteilten Speichersystemen und vielen Daten über den Betrieb von Speichern in mobilen und stationären Anwendungen.

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe, Prof. Martin Wietschel, Dr. Axel Thielmann

Das Fraunhofer ISI untersucht in zahlreichen Forschungsprojekten unterschiedliche Faktoren der Elektromobilität und hat über die Jahre ein umfangreiches Know-how entwickelt. Zu den Schwerpunkten gehören Sektorkopplung, Markthochlaufszenarien, neue Mobilitätskonzepte und Geschäftsmodelle, Nutzerakzeptanz im privaten und gewerblichen Bereich, Aufbau der Infrastruktur, Roadmaps für Energiespeicher, Antriebskonzepte mit

Schwerpunkt auf Lithium-Ionen-Batterien sowie die Bedeutung der Elektromobilität für Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt.

Fraunhofer-Institut für Siliziumtechnologie ISIT, Itzehoe, Prof. Müller-Groeling, Dr. Andreas Würsig

Das Fraunhofer ISIT zählt zu den modernsten Forschungseinrichtungen für Leistungselektronik, Mikrosystemtechnik und Batteriezelltechnologie in Europa. Die Entwicklung von Batterie-Zellen und -Systeme sind seit über 20 Jahren ein wesentliches Arbeitsgebiet der Gruppe „Batterien für Spezialanwendungen“ am ISIT. Im Fokus stehen dabei neue Materialien bzw. Materialrezepturen für Elektroden, neue Elektrolytsysteme und neue Separatoren. Ebenso sind weiterentwickelte Fertigungsprozesse, die zu einer Verbesserung der Zellperformance, einer Kostensenkung und/oder einer Verringerung umweltbelastender Emissionen führen, Gegenstand der Forschungsarbeiten. Dieses breite Kompetenzspektrum erlaubt es dem ISIT, Lithium-Zellen sehr anwendungsspezifisch, also für unterschiedliche Einsatzgebiete, anzupassen. Für die am ISIT entwickelten Zellen werden auch Modul und Systemkonzepte entwickelt, mit besonderem Focus auf das BMS und neuen Kühlkonzepten. Dafür steht auf ISIT ein umfangreiches Equipment zur Fertigung von Zellen und Systemen sowie zu deren Charakterisierung bereit.

Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM, Kaiserslautern, Dr. Jochen Zausch

Das Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM behandelt im Bereich elektrischer Energiespeicher unter anderem die Modellierung und Simulation von Lithium-Ionen-Batterien.

Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI, Dresden, Dipl.-Ing. Richard Kratzing

Das Fraunhofer IVI beschäftigt sich im Bereich der Elektromobilität mit der Batteriesystementwicklung, dem Energiemanagement und Ladetechnologien vor allem für Anwendungen im Bereich öffentlicher Verkehrsmittel.

Helmholtz-Institut Münster (HIMS), Forschungszentrum Jülich (IEK 12), Aachen, Prof. Dirk Uwe Sauer

Helmholtz-Institut Münster (HIMS), Forschungszentrum Jülich (IEK 12), Aachen/Jülich, Prof. Egbert Figgemeier

Helmholtz-Institut Münster (HIMS), Forschungszentrum Jülich (IEK 12), Münster, Prof. Jens Leker

Das HIMS wird von Prof. Martin Winter geleitet. Standorte des Instituts sind Münster, Jülich und Aachen. Das HIMS verfügt über eine umfassende Expertise im Bereich Batteriematerialien und hat seinen Schwerpunkt im Bereich Elektrolyte. Untersucht werden flüssige, keramische, polymere und hybride Elektrolyte. Weiterhin gibt es umfassende Untersuchungen im Bereich Alterung und Charakterisierung neuer Materialien bis hin zur wirtschaftlichen Bewertung von Material- und Produktionskonzepten. Das HIMS hat umfassenden Zugang zu den experimentellen Einrichtungen an den Standorten in Münster, Jülich und Aachen.

Institut für Angewandte Materialien – Angewandte Werkstoffphysik (IAM-AWP) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Prof. Hans Jürgen Seifert, Dr. Carlos Ziebert

Im IAM-AWP-Kalorimeterzentrum beschäftigt sich das KIT mit Themen der Standardisierung von kombinierten elektrochemisch-kalorimetrische Messmethoden und deren Weiterentwicklung für „Routinemessungen“ in Forschung und Industrie (pränormative Entwicklung der Methodik und der Spezifikationen) als wichtiger Beitrag zur Qualitätssicherung von Lithium-Ionen-Batterien.

Institut für Angewandte Materialien – Lehrstuhl für Elektrochemische Energiewandlung und Speichersystemtechnik, KIT Karlsruhe, Prof. Ulrike Krewer, Dr. Andre Weber

Die Arbeitsgruppe um Ulrike Krewer (bis 1.4. InES/TU Braunschweig) und das KIT/IAM-WET befassen sich seit Jahren mit der modellbasierten Analyse und dynamischen Diagnose von Li-Ionen-Batterien und weiteren elektrochemischen Zellen. In der Analyse stehen insbesondere komplexe Reaktionen und Degradation an und in Elektroden im Fokus sowie die Wechselwirkung von Reaktion, Transport und Verlusten in den komplexen Strukturen. Neben der Weiterentwicklung dynamischer Messmethoden wie EIS und Nichtlineare Frequenzganganalyse, wird

methodisch insbesondere die Strukturanalyse mittels FIB/SEM und XRD und ein breites Portfolio von eigens entwickelten Modellen von der mikroskopischen Oberfläche bis zur Zellebene eingesetzt.

Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA), Lehrstuhl für Elektrochemische Energiewandlung und Speichersystemtechnik (ISEA), RWTH Aachen, Prof. Dirk Uwe Sauer

Schwerpunkte sind Untersuchung und quantitative Modellierung von Alterungsprozessen und Lebensdauererwartung, Batteriediagnostik in Hardware und Software, Batteriepackdesign, Integration von Batteriesystemen in Fahrzeuge aller Art und in Stromnetze für USV-Funktionen, Netzstabilisierung und Integration erneuerbarer Energien. Die Arbeitsgruppe betreibt eigene Demonstrationsanlagen und Fahrzeuge zur Erprobung von Batterien. Die Arbeitsgruppe verfügt über umfangreiche Analysemethoden für Post-Mortem-Analysen und über 1200 Prüfkreise für Batteriezellen aller relevanter Größen und Batteriesystemen mit bis zu 1000 V und 240 kW.

Lehrstuhl für Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen, Prof. Achim Kampker

Am PEM werden Produktionstechnologien und Fabrikkonzepte entwickelt. Mit dieser Expertise unterstützt das PEM auch die Entwicklung und den Ausbau der FFB in Münster. Des Weiteren arbeitet das PEM im Bereich der Sicherheit von Batteriesystemen auf Modul- und Packebene.

Fachgebiet Elektrische Energiespeichertechnik, TU Berlin, Prof. Julia Kowal

Das Fachgebiet Elektrische Energiespeichertechnik beschäftigt sich mit der elektrischen, thermischen und Lebensdauer-Modellierung, der Charakterisierung bezüglich Performance, thermischem Verhalten und Alterung sowie Post-Mortem-Analysen.

Lehrstuhl für Elektrische Energiespeichertechnik (EES), TU München, Prof. Andreas Jossen

Der Lehrstuhl für Elektrische Energiespeichertechnik (EES) der TU München beschäftigt sich mit der gesamten Wertschöpfungskette elektrischer Energiespeicher von der Zelle über das System und Management bis zur Anwendung. Für den Cluster wichtige Arbeitsschwerpunkte sind die Modellierung von Zellen und Systemen (auch zur Sicherheit), Methoden der Batteriediagnostik sowie die Bewertung, die Optimierung und die Auslegung von Batteriespeichersystemen. Im Bereich der Speichersystemmodellierung sowie dem Aufbau stationärer Speicher hat der Lehrstuhl langjährige Erfahrungen. So wurde bereits in 2014 in einem Großprojekt ein Prototyp-Batterie-Containerspeicher unter Leitung des Lehrstuhls entwickelt und ins Feld gebracht. Zur Bewertung des Batterieeinsatzes in stationären Anwendungsfällen entwickelt der Lehrstuhl Optimierungs- und Simulationstools.

Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik (FTM), TU München, Prof. Lienkamp

Der Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der TU München (FTM) arbeitet an den Herausforderungen und Anforderungen der Elektromobilität, insbesondere an elektrischen Antriebssystemen mit Hochvoltbatterien. Der Lehrstuhl verfügt über umfangreiches Equipment zur Durchführung von Batterietests und zur Erfassung von Betriebs- und Belastungsdaten von Batterien in Fahrzeugen.

Lehrstuhl Elektrische Energiesysteme, Universität Bayreuth, Prof. Michael Danzer

Der Lehrstuhl Elektrische Energiesysteme der Universität Bayreuth beschäftigt sich mit der zuverlässigen und langlebigen Anwendung von mobilen und stationären Batterien und Brennstoffzellen.

Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen – elenia, TU Braunschweig, Prof. Michael Kurat

Das Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen – elenia der TU Braunschweig arbeitet unter anderem an der Batterietechnik von der Zelle bis zum System für die Elektromobilität.

Institut für Partikeltechnik iPAT, TU Braunschweig, Prof. Arno Kwade

Das Institut für Partikeltechnik iPAT der TU Braunschweig behandelt als Teilbereich die Batterieverfahrenstechnik von der Grundlagenforschung bis zu Prozess- und Fertigungstechnik. Das Institut verfügt über umfangreiche Ausstattung im Bereich Batteriezellherstellung, Recycling, Batteriecharakterisierung und Post-Mortem-Analyse.

Professur für Mess- und Sensortechnik, Uni Chemnitz, Prof. Olfa Kanoun

Die Professur für Mess- und Sensortechnik der Uni Chemnitz beschäftigt sich im Bereich der Batteriezellen mit der Diagnose mittels Impedanzspektroskopie zur Entwicklung physikalisch-chemischer Modelle. Der Schwerpunkt der Arbeiten liegt hierbei bei der Messmethodik.

Professur für Energiespeichersysteme, TU Dresden, Prof. Thilo Bocklisch

Die Professur für Energiespeichersysteme der TU Dresden arbeitet an der Systemintegration von Energiespeichern, hybriden Energiespeichersystemen und der Sektorkopplung zwischen Strom-, Wärme- und Verkehrssektor.

Das Institut für Elektrische Energiesysteme, Leibniz-Universität Hannover, Prof. Richard Hanke-Rauschenbach

Das Institut für Elektrische Energiesysteme beschäftigt sich im Forschungsgebiet „Speichersysteme für elektrische Energie“ mit Methoden zur Technologieauswahl, Auslegung und Charakterisierung von Speichern, aber auch mit Hybrid-Speichersystemen.

Juniorprofessur für Elektrische Netze und Erneuerbare Energien, Uni Magdeburg, Jun.- Prof. Ines Hauer

Der Lehrstuhl Elektrische Netze und Erneuerbare Energien der Uni Magdeburg arbeitet an der technisch und ökonomisch sinnvollen Integration erneuerbarer Energien und Speichern in das Stromnetz

MEET Batterieforschungszentrum, Universität Münster, Prof. Martin Winter

Im MEET Batterieforschungszentrum der Universität Münster werden Batteriezellen über ihren gesamten Lebenszyklus, von der Synthese der Materialien über die semiautomatische Zellfertigung, die Zyklisierung sowie das Recycling, untersucht und mittels einer sehr breit aufgestellten Analytik und Messausstattung in Tiefe analysiert. Am MEET wurden im großen Umfang Methoden entwickelt und angewendet, die es ermöglichen sicherheitsrelevante Prozesse und Zustände sowie die Vielzahl an Alterungsprozessen innerhalb einer Batteriezelle zu charakterisieren. Hierzu zählen u.a. die quantitative und die orts aufgelöste Bestimmung von Li-Plating, Untersuchungen zu physikalischen und chemischen Einflussfaktoren auf die Zellalterung und Sicherheitsuntersuchungen mit Bezug auf den Alterungszustand der Zellen.

Institut für Photovoltaik, Lehrstuhl für Elektrische Energiespeichersysteme, Uni Stuttgart, Prof. Peter Birke

Die Abteilung Elektrische Energiespeichersysteme des Instituts für Photovoltaik beschäftigt sich mit der Elektroden- und Zellherstellung, der Charakterisierung und Modulintegration sowie Power to X. Bei der Charakterisierung stellen Untersuchungen zur Lebensdauer und zur Sicherheit einen wichtigen Schwerpunkt dar.

Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoffforschung Baden-Württemberg (ZSW), Ulm, Dr. Olaf Böse

Das ZSW betreibt ein Batterietestzentrum mit ca. 35 Mitarbeitern in drei Teams: Batterietests (nicht zerstörend), Sicherheitstest und Systemtechnik. Elektrische, thermische, mechanische und sicherheitstechnische Untersuchungen von elektrochemischen Zellen, Modulen und Energiespeichersystemen bis zur Leistungsklasse von 350 kW können am ZSW durchgeführt. Zerstörende Tests betreiben werden in drei Bunkern mit nachgeschalteter Rauchgasreinigung, in denen u.a. Untersuchungen zur Propagationsunterdrückung durchgeführt werden können. Die zerstörenden Tests sind auf 5 kWh Energieinhalt der Speicher limitiert. Für die Untersuchung des „thermal runaways“ von Zellen stehen drei Autoklaven zur Verfügung, in denen Energiefreisetzungen, Gaskinetik und -zusammensetzungen bestimmt werden können. Das ZSW verfügt zudem zu einem der best-ausgestatteten Labors für Post-Mortem-Labors und einer langjährigen Erfahrung bei der Entwicklung von Batteriematerialien und der Untersuchung von Alterungsprozessen.

5. Ideen-, IP- & Technologietransfer - Verwertungsplan

Die zentrale Mission des Clusters „Batterienutzungskonzepte“ ist die **„Verkürzung der Innovationszyklen und der time-to-market für neue Materialien und Zellen“** durch Vergleich von Eigenschaften und Anforderungsprofilen der Anwendungen, die Bewertung von Alterung, Lebensdauer, Performance und Sicherheit, die Entwicklung von Basiskonzepten für die Diagnostik, die entwicklungsbegleitende Analyse von Ökobilanzen und Rohstoffverfügbarkeiten sowie die Analyse der Skalierbarkeit in Richtung großer Batteriezellen und Batteriepacks. Damit ist die Rolle in der Innovationspipeline „Batterie“ des Dachkonzepts Forschungsfabrik Batterie auch direkt definiert. Aufgabe dieses Clusters ist es, neue Materialien und Zellen, die in der Innovationspipeline entstehen, so früh wie möglich einem umfassenden Praxistest zu unterziehen. Dazu gehört die Analyse der Eigenschaften von Batteriezellen und -systemen mit Hilfe von digitalen Zwillingen schon bevor die Systeme überhaupt hergestellt worden sind. Sobald Materialproben oder ganze Zellen aus der FFB oder anderen Clustern und Initiativen des Dachkonzepts „Forschungsfabrik Batteriezelle“ vorliegen, werden diese intensiv bzgl. ihrer Sicherheitseigenschaften und ihrer Alterung untersucht. Sicherheit, Lebensdauer und Performance werden dann an den Anforderungen in den verschiedenen Anwendungsbereichen gespiegelt. Auf Basis dieser Daten kann frühzeitig festgestellt werden, ob eine Materialentwicklung oder ein Produktionsprozess eine Chance haben, Batterien hervorzubringen, die im Wettbewerb mit bestehender Technologie eine Chance haben werden, um sich durchzusetzen. Davon werden alle Unternehmen entlang der Wertschöpfungskette vom Rohmaterial bis zur Anwendung ganz erheblich profitieren, denn es vermeidet teure Fehlentwicklungen und ermöglicht zum frühestmöglichen Zeitpunkt die Entwicklungsrichtungen so zu steuern, dass wettbewerbsfähige Produkte entstehen. Zudem werden entsprechende Erkenntnisse sehr zeitnah mit der Produktionsreife neuer Zellen vorliegen. Entsprechend früh können die Arbeiten zur Integration der Batteriezellen in Anwendungen beginnen. Dies gilt sowohl für Weiterentwicklungen der aktuellen Technologie als auch für neue Technologiegenerationen z.B. mit neuen Kathodenmaterialien, Festkörperelektrolyten oder metallischen Anoden. Wir erwarten, dass dieser Cluster die Entwicklungen nicht nur frühzeitig in Richtung Anwendungserfolg lenkt, sondern die time-to-market und damit auch die Entwicklungszeiten z.B. der Produktionsprozesse erheblich gegenüber heute verkürzt. Dies soll es ermöglichen, dass der Erfahrungs- und Technologierückstand gegenüber vor allem asiatischen Wettbewerbern der deutschen Industrie in wenigen Jahren abgebaut werden bzw. stark verringert werden kann.

Die Clusterkoordinatoren werden die Forschungsstellen der verschiedenen Projekte kontinuierlich ermuntern, nach Möglichkeiten zur Patentierung von Erkenntnissen und Identifizierung von Themen, die für die Gründung von Start-ups geeignet sind, Ausschau zu halten und ihre jeweiligen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter aktiv dabei zu unterstützen. Sowohl die TU München als auch die RWTH Aachen verfügen über hochentwickelte Strukturen, um Ausgründungen und Start-ups zu unterstützen. Die Cluster-Koordinatoren werden wenigstens einmal im Jahr auf einem Gesamtclustertreffen Referentinnen und Referenten einladen, die über praktische Erfahrungen und Tipps für Ausgründungen und Sicherung von IP den Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Clusterprojekte berichten. Wir werden uns insbesondere auch bemühen weibliche Role-Models zu finden, die über ihre Erfahrungen vortragen können. Der Anteil weiblicher Gründerinnen ist erheblich unter dem der Absolventinnen in den Ingenieurwissenschaften.

Zum Verwertungsplan gehört ein ambitionierter Publikationsplan. Alle Projekte werden dazu angehalten, ihre Ergebnisse regelmäßig in wissenschaftlichen Journalen zu veröffentlichen. Angestrebt wird eine Rate von mindestens 2 Journalveröffentlichungen pro FTE über drei Jahre Projektlaufzeit. Daraus ergibt sich eine Zielgröße für den Cluster im Bereich von mindestens 80 bis 100 Veröffentlichungen. Wir streben „golden open access“-Veröffentlichungen an und hoffen, dass das Projekt DEAL bis zum Start der Veröffentlichung aus den Projekten mit allen großen internationalen Wissenschaftsverlagen zum Abschluss gebracht werden kann. Die intensive Veröffentlichungstätigkeit soll auch den Anspruch einer Spitzenposition der deutschen Forschungslandschaft im Bereich der Batteriesystemtechnik und Batterienutzung stärken.

Gleichzeitig ist es aber auch das Ziel, die Erkenntnisse des Clusters einerseits einer breiten Öffentlichkeit zugänglich zu machen und zum anderen in weiten Bereichen der Industrie zu verbreiten. Die Öffentlichkeit soll vor allem aufgeklärt werden über Themen wie Batteriesicherheit, erzielbare Lebensdauern, verbleibende Rest- oder Wiederverkaufswerte von Batterien nach einigen Jahren Nutzung z.B. in Elektrofahrzeugen oder ökologische Gesamtbelastung und Materialbedarf für den Bau- und Betrieb von Batteriespeichersystemen. Dazu werden wir gezielt Informationen für Journalistinnen und Journalisten aufarbeiten, Gesprächspartner für Hintergrundgespräche vermitteln und versuchen, Artikeln in allgemeinen Zeitungen und Zeitschriften zu platzieren.

Handel-, Gewerbe- und Industrieunternehmen sollen vor allem durch Fachbeiträge auf Konferenzen, Workshops oder Messen über die Ergebnisse des Clusters unterrichtet werden. Vorträge und Beiträge sollen auf Fachtagungen zum Thema Batterie gehalten werden, es sollen aber gezielt z.B. Branchenfachveranstaltungen (z.B. in den Bereichen Automobil, Telekommunikation, Logistik, Flurförderzeuge, maritime Anwendungen, Energieversorgung) bedient werden. Es sollen auch Standardpräsentationsmaterialien erstellt werden, die z.B. auch zur in-house Schulung in Unternehmen verwendet werden können. Dazu sollen alle Projekte des Clusters beitragen.

Zusätzlich werden die Projekte des Clusters einen „Wissens- und Kompetenztransfer durch Köpfe“ ermöglichen. In den Projekten werden eine Reihe von Promotionen entstehen, aber auch Studierende im Rahmen ihrer Bachelor- und Masterarbeiten oder als wissenschaftliche Hilfskräfte werden an die Batterithemen herangeführt. Eine Vielzahl der Forschungsstellen, die den Cluster tragen werden, sind mit Professuren an Hochschulen und Universitäten verbunden, sodass auch sichergestellt ist, dass die neuesten Erkenntnisse ganz direkt in die Lehre überführt werden können.

6. Finanzierung & Kostenplan

In der nachstehenden Tabelle sind die Schwerpunkte der drei Themenfelder aufgeführt. Für jeden Bereich sind die vorgesehenen Arbeitsumfänge in Full Time Equivalents (FTE) angegeben. Diese sind als Richtwert zu sehen und basieren auf der Annahme, dass ein FTE Kosten von 150.000 €/Jahr verursacht (Personalkosten, wissenschaftliche Hilfskräfte, Overheads, Reisekosten, Verbrauchsmaterial, Kleininvestitionen). Die Zahl basiert auf der Annahme einer Mischung von Forschungsstellen mit unterschiedlichen Overheadkosten. Die genaue Zahl der FTE pro Schwerpunkt wird sich aus den Projektskizzen und deren Bewertung durch den Managementkreis ergeben. Die Umfänge sind so veranschlagt, dass die Mission des Clusters insgesamt erreicht werden kann. Der Aufwand von Schwerpunkt B2 ist am höchsten angesetzt, weil hier sehr umfangreiche und langlaufende Untersuchungen an einer Vielzahl von Batteriezellen durchgeführt werden müssen. Auch im Schwerpunkten A2 werden experimentelle Untersuchungen zur Sicherheit von Batterien durchgeführt.

Wir gehen von drei Jahren Laufzeit der Projekte aus. Nur das Querschnittsprojekt hat eine Laufzeit von 3,5 Jahren, um sicherzustellen, dass das Querschnittsprojekt spätestens mit dem ersten Projekt des Clusters starten kann und mit dem letzten Projekt endet. Zusätzlich wird Zeit benötigt, um nach Abschluss aller Clusterprojekte die Ergebnisse noch final zu konsolidieren.

Themenfeld A Sicherheit & Performance 13 bis 15 FTE	Themenfeld B Alterung und Lebensdauer- prognose 14 bis 16 FTE	Themenfeld C Batteriesystembewertung 12 bis 14 FTE
Schwerpunkt A1 – Modellbildung zur Sicherheit 3 bis 5 FTE	Schwerpunkt B1 – Untersuchung von Alterungsprozessen 4 bis 6 FTE	Schwerpunkt C1 – Anforderungsprofile wesentl. Batterieanwendungen 3 bis 5 FTE
Schwerpunkt A2 – Untersuchungen und Charakterisierung sicherheitsrelevanter Prozesse mittels herkömmlicher und neuartiger Messmethoden 5 bis 7 FTE	Schwerpunkt B2 – Beschleunigte Alterungstests und Lebensdauerprognosen 6 bis 8 FTE	Schwerpunkt C2 – Bewertung und Konzeption neuer Material-, Zell- und Batteriesysteme 4 bis 6 FTE
Schwerpunkt A3 – Diagnose von sicherheitskritischen Zuständen 3 bis 5 FTE	Schwerpunkt B3 – Diagnostik zur Alterung 2 bis 4 FTE	Schwerpunkt C3 – Analyse von Technologien für die Realisierung von 2nd-Life-Nutzungskonzepten 3 bis 5 FTE
Querschnittsprojekt „2nd Use & Green Battery“ Zu diesem Cluster: 4 FTE		

Tabelle 1: Übersicht über die Schwerpunkte und Themenfelder und den vorgeschlagenen Umfang der einzelnen Bereiche.

Anhang

Literatur- / Quellenverzeichnis

[1]	Rheinfeld, Alexander; Sturm, Johannes; Frank, Alexander; Kosch, Stephan; Erhard, Simon V.; Jossen, Andreas (2020): Impact of Cell Size and Format on External Short Circuit Behavior of Lithium-Ion Cells at Varying Cooling Conditions: Modeling and Simulation. <i>J. Electrochem. Soc.</i> 167 (1), S. 13511. DOI: 10.1149/2.0112001JES.
[2]	Rheinfeld, Alexander; Sturm, Johannes; Noel, Andreas; Wilhelm, Jörn; Kriston, Akos; Pfrang, Andreas; Jossen, Andreas (2019): Quasi-Isothermal External Short Circuit Tests Applied to Lithium-Ion Cells: Part II. Modeling and Simulation, <i>J. Electrochem. Soc.</i> 166 (2), A151-A177. DOI: 10.1149/2.0071902jes.
[3]	Hildebrand, S.; Friesen, A.; Haetge, J.; Meier, V.; Schappacher, F.; Winter, M. (2016): Delayed Thermal Runaway Investigation on Commercial 2.6 Ah NCM-LCO Based 18650 Lithium Ion Cells with Accelerating Rate Calorimetry, <i>ECS Transactions</i> 74 (1), S. 85–94. DOI: 10.1149/07401.0085ecst.
[4]	Gillich, Elisabeth I.; Jossen, Andreas (2019): Modeling Thermal-Runaway Propagation – Effect of Venting. In: Cambridge Enertech (Hg.): Battery Safety Summit, 10th Annual. Alexandria, VA, 22.10.-25.10.2019. Alexandria, United States of America.
[5]	Kolp, Elisabeth I.; Jossen, Andreas (2018): Thermal Modelling of Thermal Runaway Propagation in Lithium-Ion Battery Systems. In: European Commission (Hg.): Workshop: Safer Li-Ion Batteries by Preventing Thermal Propagation? JRC Exploratory Research Workshop
[6]	Golubkov, Andrey W.; Fuchs, David; Wagner, Julian; Wiltche, Helmar; Stangl, Christoph; Fauler, Gisela et al. (2014): Thermal-runaway experiments on consumer Li-ion batteries with metal-oxide and olivin-type cathodes. In: <i>RSC Adv</i> 4 (7), S. 3633–3642. DOI: 10.1039/C3RA45748F
[7]	Ruiz, V.; Pfrang, A.; Kriston, A.; Omar, N.; van den Bossche, P.; Boon-Brett, L. (2017): A review of international abuse testing standards and regulations for lithium ion batteries in electric and hybrid electric vehicles, <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> . DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.195
[8]	R. Raj, J. Wolfenstine: Current limit diagrams for dendrite formation in solid-state electrolytes for Li-ion batteries, <i>J. Power Sources</i> 343 (2017) 119-126
[9]	Hyung-Joo Noh, Sungjune Youn, Chong Seung Yoon, Yang-Kook Sun, Comparison of the structural and electrochemical properties of layered $\text{Li}[\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z]\text{O}_2$ ($x = 1/3, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$ and 0.85) cathode material for lithium-ion batteries, <i>Journal of Power Sources</i> , Volume 233, 2013, Pages 121-130,
[10]	Eliud Cabrera-Castillo, Florian Niedermeier, Andreas Jossen, Calculation of the state of safety (SOS) for lithium ion batteries, <i>Journal of Power Sources</i> , Volume 324, 2016, Pages 509-520, ISSN 0378-7753, https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.05.068 .
[11]	Lluc Canals Casals, B. Amante García, Camille Canal, Second life batteries lifespan: Rest of useful life and environmental analysis, <i>Journal of Environmental Management</i> , Volume 232, 15 February 2019, Pages 354-363, https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.046
[12]	Andreas Podias, Andreas Pfrang, Franco Di Persio, Akos Kriston, Silvia Bobba, Fabrice Mathieux, Maarten Mesagie, Lois Boon-Brett, Sustainability Assessment of Second Use Applications of Automotive Batteries: Ageing of Li-Ion Battery Cells in Automotive and Grid-Scale Applications, <i>World Electr. Veh. J.</i> 2018, 9(2), 24, https://doi.org/10.3390/wevj9020024
[13]	Robert Reinhardt, Ioannis Christodoulou, Santiago Gassó-Domingo, Beatriz Amante García, Towards sustainable business models for electric vehicle battery second use: A critical review, <i>Journal of Environmental Management</i> , Volume 245, 1 September 2019, Pages 432-446, https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.095
[14]	E.Martinez-Laserna, I. Gandiaga, E. Sarasketa-Zabala, J.Badedá, D.-I.Stroe, M.Swierczynskie, A.Goikoetxea, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 93, October 2018, Pages 701-718, Battery second life: Hype, hope or reality? A critical review of the state of the art, https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.035
[15]	Matthieu Dubarry, Bor Yann Liaw, Development of a universal modeling tool for rechargeable lithium batteries, <i>Journal of Power Sources</i> , Volume 174, Issue 2, 6 December 2007, Pages 856-860, https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.06.157
[16]	Jurgen Garche, Klaus Brandt, Electrochemical Power Sources: Fundamentals, Systems, and Applications, 1st Edition, Li-Battery Safety, 2019
[17]	Dirk Magnor, Dirk Uwe Sauer, Optimization of PV Battery Systems Using Genetic Algorithms, 10th International Renewable Energy Storage Conference, IRES 2016, 15-17 March 2016, Düsseldorf, Germany

[18]	Holger C. Hesse, Michael Schimpe, Daniel Kucevic, Andreas Jossen, Lithium-Ion Battery Storage for the Grid—A Review of Stationary Battery Storage System Design Tailored for Applications in Modern Power Grids, <i>Energies</i> , MDPI, Open Access Journal, vol. 10(12), pages 1-42, December 2017
[19]	Maik Naumann ; Cong Nam Truong ; Michael Schimpe ; Daniel Kucevic ; Andreas Jossen ; Holger C. Hesse, SimSES: Software for techno-economic Simulation of Stationary Energy Storage Systems, International ETG Congress 2017, Bonn, Germany, 2017, pp. 1-6.
[20]	Robert Schröder, Muhammed Aydemir, Günther Seliger, Comparatively assessing different shapes of lithium-ion battery cells, <i>Procedia Manufacturing</i> 8 (2017) 104 – 111
[21]	D.Kucevic, B.Tepe, S.Englberger, A.Parlikar, M.Muehlbauer, O.Bohlen, A.Jossen, H.Hesse, Standard Battery Energy Storage System Profiles: Analysis of various Applications for Stationary Lithium-Ion Battery Energy Storage Systems using a Holistic Simulation Framework
[22]	Lewerenz M, Sauer DU (2018) Evaluation of cyclic aging tests of prismatic automotive LiNiMnCoO ₂ -Graphite cells considering influence of homogeneity and anode overhang. <i>Journal of Energy Storage</i> 18: 421–434. doi: 10.1016/j.est.2018.06.003
[23]	Takei K, Kumai K, Kobayashi Y et al. (2001) Cycle life estimation of lithium secondary battery by extrapolation method and accelerated aging test. <i>Journal of Power Sources</i> 97-98: 697–701. doi: 10.1016/S0378-7753(01)00646-2
[24]	Käbitz S, Gerschler JB, Ecker M et al. (2013) Cycle and calendar life study of a graphite LiNi _{1/3} Mn _{1/3} Co _{1/3} O ₂ Li-ion high energy system. Part A: Full cell characterization. <i>Journal of Power Sources</i> 239: 572–583. doi: 10.1016/j.jpowsour.2013.03.045
[25]	Lewerenz M, Münnix J, Schmalstieg J et al. (2017) Systematic aging of commercial LiFePO ₄ Graphite cylindrical cells including a theory explaining rise of capacity during aging. <i>Journal of Power Sources</i> 345: 254–263. doi: 10.1016/j.jpowsour.2017.01.133
[26]	Lewerenz M, Dechent P, Sauer DU (2019) Investigation of capacity recovery during rest period at different states-of-charge after cycle life test for prismatic Li(Ni _{1/3} Mn _{1/3} Co _{1/3})O ₂ -graphite cells. <i>Journal of Energy Storage</i> 21: 680–690. doi: 10.1016/j.est.2019.01.004
[27]	Wilhelm J, Seidlmayer S, Keil P et al. (2017) Cycling capacity recovery effect: A coulombic efficiency and post-mortem study. <i>Journal of Power Sources</i> 365: 327–338. doi: 10.1016/j.jpowsour.2017.08.090
[28]	Lewerenz M, Fuchs G, Becker L et al. (2018) Irreversible calendar aging and quantification of the reversible capacity loss caused by anode overhang. <i>Journal of Energy Storage</i> 18: 149–159. doi: 10.1016/j.est.2018.04.029
[29]	Ecker M, Nieto N, Käbitz S et al. (2014) Calendar and cycle life study of Li(NiMnCo)O ₂ -based 18650 lithium-ion batteries, <i>J. Power Sources</i> 248: 839–851. doi: 10.1016/j.jpowsour.2013.09.143
[30]	Barré A, Deguilhem B, Grolleau S et al. (2013) A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications, <i>J. Power Sources</i> 241: 680–689. doi: 10.1016/j.jpowsour.2013.05.040
[31]	Dubarry M, Truchot C, Liaw BY (2012) Synthesize battery degradation modes via a diagnostic and prognostic model. <i>J. Power Sources</i> 219: 204–216. doi: 10.1016/j.jpowsour.2012.07.016
[32]	Mussa AS, Klett M, Behm M et al. (2017) Fast-charging to a partial state of charge in lithium-ion batteries: A comparative ageing study, <i>J. Energy Storage</i> 13: 325–333. doi: 10.1016/j.est.2017.07.004
[33]	Evertz M, Horsthemke F, Kasnatscheew J et al. (2016) Unraveling transition metal dissolution of Li _{1.04} Ni _{1/3} Co _{1/3} Mn _{1/3} O ₂ (NCM 111) in lithium ion full cells by using the total reflection X-ray fluorescence technique, <i>J. Power Sources</i> 329: 364–371. doi: 10.1016/j.jpowsour.2016.08.099
[34]	Tröltzsch U, Kanoun O, Tränkler H-R (2006) Characterizing aging effects of lithium ion batteries by impedance spectroscopy. <i>Electrochimica Acta</i> 51(8-9): 1664–1672. doi: 10.1016/j.electacta.2005.02.148
[35]	Waldmann T, Iturrondobeitia A, Kasper M et al. (2016) Review—Post-Mortem Analysis of Aged Lithium-Ion Batteries: Disassembly Methodology and Physico-Chemical Analysis Techniques. <i>J. Electrochem. Soc.</i> 163(10): A2149-A2164. doi: 10.1149/2.1211609jes
[36]	Gabrielli, Claude. „Once upon a Time There Was EIS“. <i>Electrochimica Acta</i> 331 (Januar 2020): 135324. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.135324 .
[37]	Farmann, Alexander, Wladislaw Waag, Andrea Marongiu, und Dirk Uwe Sauer. „Critical review of on-board capacity estimation techniques for lithium-ion batteries in electric and hybrid electric vehicles“. <i>J. Power Sources</i> 281 (2015): 114–30. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.01.129 .
[38]	Lewerenz, Meinert, Andrea Marongiu, Alexander Warnecke, und Dirk Uwe Sauer. „Differential voltage analysis as a tool for analyzing inhomogeneous aging: A case study for LiFePO ₄ Graphite cylindrical cells“. <i>J. Power Sources</i> 368 (2017): 57–67. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.09.059 .

[39]	Lewerenz, Meinert, Stefan Käbitz, Marcus Knips, Jens Münnix, Johannes Schmalstieg, Alexander Warnecke, und Dirk Uwe Sauer. „New Method Evaluating Currents Keeping the Voltage Constant for Fast and Highly Resolved Measurement of Arrhenius Relation and Capacity Fade“. J. Power Sources 353 (Juni 2017): 144–51. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.03.136 .
[40]	Smith, A. J., J. C. Burns, S. Trussler, und J. R. Dahn. „Precision Measurements of the Coulombic Efficiency of Lithium-Ion Batteries and of Electrode Materials for Lithium-Ion Batteries“. Journal of The Electrochemical Society 157, Nr. 2 (2010): A196. https://doi.org/10.1149/1.3268129
[41]	Lin, Xinfan. „Theoretical Analysis of Battery SOC Estimation Errors Under Sensor Bias and Variance“. IEEE Transactions on Industrial Electronics 65, Nr. 9 (September 2018): 7138–48. https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2795521
[42]	Willenberg, Lisa K., Philipp Dechent, Georg Fuchs, Dirk Uwe Sauer, und Egbert Figgemeier. „High-Precision Monitoring of Volume Change of Commercial Lithium-Ion Batteries by Using Strain Gauges“. Sustainability 12, Nr. 2 (11. Januar 2020): 557. https://doi.org/10.3390/su12020557
[43]	Baumhöfer, Thorsten, Manuel Brühl, Susanne Rothgang, und Dirk Uwe Sauer. „Production caused variation in capacity aging trend and correlation to initial cell performance“, J. Power Sources 247 (2014): 332–38. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.08.108
[44]	Lim, Changwon, Pranab K. Sen, und Shyamal D. Peddada. „Accounting for Uncertainty in Heteroscedasticity in Nonlinear Regression“. Journal of Statistical Planning and Inference 142, Nr. 5 (Mai 2012): 1047–62. https://doi.org/10.1016/j.jspi.2011.11.003
[45]	Severson, Kristen A., Peter M. Attia, Norman Jin, Nicholas Perkins, Benben Jiang, Zi Yang, Michael H. Chen, u. a. „Data-Driven Prediction of Battery Cycle Life before Capacity Degradation“. Nature Energy 4, Nr. 5 (Mai 2019): 383–91. https://doi.org/10.1038/s41560-019-0356-8
[46]	Lim, Changwon, Pranab K. Sen, und Shyamal D. Peddada. „Accounting for Uncertainty in Heteroscedasticity in Nonlinear Regression“. Journal of Statistical Planning and Inference 142, Nr. 5 (Mai 2012): 1047–62. https://doi.org/10.1016/j.jspi.2011.11.003
[47]	Andre, D., Appel, C., Soczka-Guth, T., & Sauer, D. U. (2013). Advanced mathematical methods of SOC and SOH estimation for lithium-ion batteries. J. Power Sources, 224, 20-27
[48]	Richardson, R. R., Birkel, C. R., Osborne, M. A., & Howey, D. A. (2018). Gaussian process regression for in situ capacity estimation of lithium-ion batteries. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 15(1), 127-138
[49]	Richardson, R. R., Osborne, M. A., & Howey, D. A. (2017). Gaussian process regression for forecasting battery state of health. J. Power Sources, 357, 209-219
[50]	Severson, K. A., Attia, P. M., Jin, N., Perkins, N., Jiang, B., Yang, Z., ... & Bazant, M. Z. (2019). Data-driven prediction of battery cycle life before capacity degradation. Nature Energy, 4(5), 383-391
[51]	M.N. Obrovac, V.L. Chevrier, Alloy negative electrodes for Li-ion batteries, Chemical Reviews. 114 (2014) 11444–11502. doi:10.1021/cr500207g
[52]	J.R. Dahn, Phase diagram of Li _x C ₆ , Physical Review B. 44 (1991) 9170–9177. doi:10.1103/PhysRevB.44.9170
[53]	M.M. Thackeray, J.R. Croy, E. Lee, A. Gutierrez, M. He, J.S. Park, B.T. Yonemoto, B.R. Long, J.D. Blauwkamp, C.S. Johnson, Y. Shin, W.I.F. David, The quest for manganese-rich electrodes for lithium batteries: Strategic design and electrochemical behavior, Sustainable Energy and Fuels. 2 (2018) 1375–1397. doi:10.1039/c8se00157j
[54]	L.Y. Beaulieu, T.D. Hatchard, A. Bonakdarpour, M.D. Fleischauer, J.R. Dahn, Reaction of Li with Alloy Thin Films Studied by In Situ AFM, J. Electrochem. Soc., 150 (2003) A1457. doi:10.1149/1.1613668
[55]	J. Cannarella, C.B. Arnold, Stress evolution and capacity fade in constrained lithium-ion pouch cells, Journal of Power Sources. 245 (2014) 745–751. doi:10.1016/j.jpowsour.2013.06.165
[56]	L.Y. Beaulieu, K.W. Eberman, R.L. Turner, L.J. Krause, J.R. Dahn, Colossal Reversible Volume Changes in Lithium Alloys, Electrochemical and Solid-State Letters. 4 (2001) A137–A140. doi:10.1149/1.1388178
[57]	K. Zhao, M. Pharr, J.J. Vlassak, Z. Suo, Fracture of electrodes in lithium-ion batteries caused by fast charging, Journal of Applied Physics. 108 (2010) 1–7. doi:10.1063/1.3492617
[58]	Lelie, M.; Braun, T.; Knips, M.; Nordmann, H.; Ringbeck, F.; Zappen, H.; Sauer, D. U., „Battery Management System Hardware Concepts: An Overview“, Applied Sciences, vol. 8, p. 534, 2018, 10.3390/app8040534
[59]	Raijmakers, L.H.J.; Danilov, D. L.; van Lammeren, J.P.M.; Lammers, M.J.G.; Notten, P.H.L., “Sensorless battery temperature measurements based on electrochemical impedance spectroscopy“, J. Power Sources, vol. 247, p. 539-544, 2014, https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.09.005

[60]	Fleming, J.; Amietszajew, T.; McTurk, E.; Towers, D. P.; Greenwood, D.; Bhagat, R., "Development and evaluation of in-situ instrumentation for cylindrical Li-ion cells using fibre optic sensors", <i>HardwareX</i> , vol. 3, p. 100–109, 2018, 10.1016/j.ohx.2018.04.001
[61]	Waldmann, T.; Bisle, G.; Hogg, B.-I.; Stumpp, S.; Danzer, M. A.; Kasper, M.; Axmann, P.; Wohlfahrt-Mehrens, M., „Influence of Cell Design on Temperatures and Temperature Gradients in Lithium-Ion Cells: An In Operando Study“, <i>J. Electrochem. Soc.</i> , vol. 162, p. A921-A927, 2015, 10.1149/2.0561506jes
[62]	Raccichini, R.; Amores, M.; Hinds, G., "Critical Review of the Use of Reference Electrodes in Li-Ion Batteries: A Diagnostic Perspective", <i>Batteries</i> , vol. 5, p. 12, 2019, 10.3390/batteries5010012
[63]	Ladpli, P.; Kopsaftopoulos, F.; Chang, F.-K., „Estimating state of charge and health of lithium-ion batteries with guided waves using built-in piezoelectric sensors/actuators, <i>J. Power Sources</i> , vol. 384, p. 342–354, 2018, 10.1016/j.jpowsour.2018.02.056
[64]	M. Wentker, M. Greenwood, Jens Leker, A Bottom-Up Approach to Lithium-Ion Battery Cost Modeling with a Focus on Cathode Active Materials, <i>Energies</i> 12(2019) 504
[65]	L. J. Aldering, J. Leker, C. H. Song, Analysis of technological knowledge stock and prediction of its future development potential: The case of lithium-ion batteries, <i>Journal of Cleaner Production</i> , 223(2019) 301-311
[66]	M. Wentker, M. Greenwood, M. Chofer Asaba, J. Leker, A raw material criticality and environmental impact assessment of state-of-the-art and post-lithium-ion cathode technologies, <i>J. Energy Storage</i> , 26(2019) 101022
[67]	Johannes Betz, Georg Bieker, Paul Meister, Tobias Placke, Martin Winter, Richard Schmuch, Theoretical versus Practical Energy: A Plea for More Transparency in the Energy Calculation of Different Rechargeable Battery Systems, <i>Adv. Energy Mater.</i> 2019, 9, 1803170