

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teil 2 – Eingehende Darstellung

Vorhabenbezeichnung: ReDesign – Entwicklung von Gestaltungsrichtlinien für die recyclinggerechte Konstruktion von Batteriesystemen im Kontext der Kreislaufwirtschaft	
Zuwendungsempfänger: Fraunhofer- Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. Ausführende Stelle: Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS	Förderkennzeichen 03XP0318B
Projektleiter Dr.-Ing. Kristian Nikolowski Autoren des Abschlussberichts Dr. Dietrich Goers, M. Sc. Farzaneh Alipour, Dr. Sebastian Hippmann, Dr.-Ing. Sandra Pavón	Laufzeit 01.12.2020 – 29.02.2024

GEFÖRDERT VOM



**Bundesministerium
für Bildung
und Forschung**

1. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse des Teilvorhabens

Das Projekt ReDesign wurde am 01.12.2020 initiiert und umfasste eine Laufzeit bis zum 31.12.2023. Wie in Abbildung 1 dargestellt, wurde aufgrund von Arbeitsrückständen in den Arbeitspaketen AP4 und AP5 eine kostenneutrale Laufzeitverlängerung bis zum 29.02.2024 beantragt und vom Fördermittelgeber genehmigt.

AP	Arbeitspaket		20	2021				2022				2023				24	Status
			Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	
1	Identifikation von Optimierungszielen der Kreislaufwirtschaft															abgeschlossen	
1.1	Systemdefinition	IK, IWF, IKTS, LUP														abgeschlossen	
1.2	Identifikation und Verknüpfung von Recyclingprozessen/-verfahren mit den Lebenszyklusphasen von Batteriesystemen und deren Komponenten	IK, IWF, IKTS, LUP														abgeschlossen	
1.3	Aufbau der Einfluss-Wechselwirkungsmatrix	IK, IWF, IKTS														abgeschlossen	
1.4	Wechselwirkungsanalyse und Ableitung von Optimierungszielen	LUP, IWF, IKTS														abgeschlossen	
2	Analyse Kreislaufführung und Batteriesysteme															abgeschlossen	
2.2	Analyse Batteriesysteme	LUP, IKTS														abgeschlossen	
2.3	Analyse Kreislaufwirtschaftsoptionen	LUP, IKTS, IWF														abgeschlossen	
2.4	Bewertung Kreislaufwirtschaftsoptionen	LUP, IK, IKTS, IWF														abgeschlossen	
2.5	Identifikation von Hemmnissen	LUP, IK, IKTS, IWF														abgeschlossen	
2.6	Ableitung von Handlungsoptionen	LUP, IK, IKTS, IWF														abgeschlossen	
3	Bereitstellung einer Tool-Box für die nachhaltigkeits- und lebenszyklusorientierte Gestaltung von Batterien															abgeschlossen	
3.1	Aktualisierung des theoretischen Modells mit realen Erkenntnissen aus der Systemzerlegung (AP 2)	IK, IWF, IKTS, LUP														abgeschlossen	
3.2	Ableiten von technischen Anforderungen an Batteriesysteme	IK, IWF, IKTS, LUP														abgeschlossen	
3.3	Ableiten von recycling-spezifischen Anforderungen aus den identifizierten Recyclingprozessen	IWF, IKTS, LUP														abgeschlossen	
3.5	Ableiten von Gestaltungsrichtlinien	IK, IWF, IKTS, LUP														abgeschlossen	
4	Entwicklung von Konzeptdemonstratoren und Übertragung auf zukünftige Batterie-Generationen															abgeschlossen	
4.1	Auswahl geeigneter Zellkomponenten und Entwicklung recyclingfähiger Zellformate	IKTS, IK, IWF														abgeschlossen	
4.2	Konzeptdemonstrator mit Li-Ionen Zellchemie	IKTS, IK, LUP														abgeschlossen	
4.3	Konzeptdemonstrator mit Festkörper-Zellchemie	IKTS, IK, LUP														abgeschlossen	
4.4	Übertragung der Erkenntnisse auf zukünftige Zellgenerationen	IKTS														abgeschlossen	
5	Systematische Entwicklung von Geschäftsmodellen für die Kreislaufwirtschaft und Ableitung von Handlungsempfehlungen															abgeschlossen	
5.3	Ableitung von Handlungsempfehlung	LUP, IK, IWF, IKTS														abgeschlossen	

Abbildung 1: Balkendiagramm der Arbeitspakete im Projekt ReDesign

Der Arbeitsschwerpunkt des IKTS lagen in der Informationsbereitstellung zu Batteriekomponenten auf Zellebene (AP1), der Analyse der verfügbaren Batteriesysteme und Identifikation von Hemmnissen (AP2), den funktionalen Zusammenhängen dieser Bestandteile, der Entwicklung von Konzeptdemonstratoren und der Übertragung auf zukünftige Batteriegenerationen (AP4) sowie der Erarbeitung von Handlungsempfehlungen (AP5).

Alle Ergebnisse wurden kontinuierlich mit den Projektpartnern in regelmäßigen Treffen und mit dem Projektträger ausgetauscht. Im Folgenden werden die Arbeiten des IKTS im Einzelnen dargestellt.

AP 1: Identifikation von Optimierungszielen der Kreislaufwirtschaft

Das Ziel des Arbeitspaketes 1 besteht in der Identifizierung von Optimierungszielen für das Batteriedesign aus einer Lebenszyklusperspektive. Dabei wird ein besonderer Fokus auf ein recycling- bzw. lebenszyklusgerechtes Design gelegt, um die Nachhaltigkeit des Produkts zu gewährleisten.

Im Rahmen des Arbeitspaketes 1 wurden folgende Teilarbeitsschritte durchgeführt auf deren Basis Teilergebnisse erzielt wurden:

UAP 1.1 Systemdefinition

Das IKTS stellte dem Projektkonsortium Informationen über das am Markt verfügbare Spektrum unterschiedlicher Zellchemien und Zellformate für Lithium- und Lithium-Ionen-Zellen (Tabelle 1) zur Verfügung. Der Fokus lag auf wiederaufladbaren Zellen, deshalb wurden die verschiedenen Aktivmaterialien und -kombinationen vertieft. Im Rahmen dessen wurden die funktionalen Zusammenhänge der jeweiligen Komponenten und Teilkomponenten auf Zellebene

beschrieben, definiert und an die Partner weitergegeben. Eine Übersicht der Zellkomponenten, deren Funktion in einer Batterie sowie der funktionalen Zusammenhänge einzelner Kennwerte ist in Abbildung 2 dargestellt.

Tabelle 1: Zusammenstellung unterschiedlicher Primär- und Sekundärbatterien [1]

	Art (ICE-Cod)	Bauform	Spannung (V)	Aufbau	Kathode	Anode	Ableiter	Elektrolyte
Sekundärbatterie (wiederaufladbar)	Lithium-Ion	Zylindrisch	3,6	Elektrode	LCO/NMC/LFP	Graphit	Cu, Al	Lithium-verbinding (LiPF ₆) in organische Lösungsmittel, z.B. EC, DEC
		Prismatisch	3,6					
		Pin/Knopf	3,6					
	Lithium-Ion-Polymer	Pouch	3,6	Elektrode	LCO/NMC/LFP	Graphit	Cu, Al	Polymer Elektrolyte
Primärbatterie (nicht aufladbar)	Lithium-Mangandioxid (C)	Knopf	3	Pellet	MnO ₂	Li	-	PC, DME, PS
	Lithium-Mangandioxid (C)	Zylindrisch	3	Pellet	MnO ₂	Li	-	PC, DME, PS
	Lithium-Carbonfluoride (B)	Knopf	3	Pellet	(CF) _n	Li	-	PC, DME, γ-GBL
	Lithium-Carbonfluoride	Zylindrisch	3	Pellet	(CF) _n	Li	-	PC, DME, γ-GBL
	Lithium thionylchlorid	Zylindrisch	3,6	Pellet	SOCl ₂	Li	-	LiAlCl ₄ /SOC ₂
	Lithium-Eisendisulfid		1,5	Pellet	FeS ₂	Li	-	-

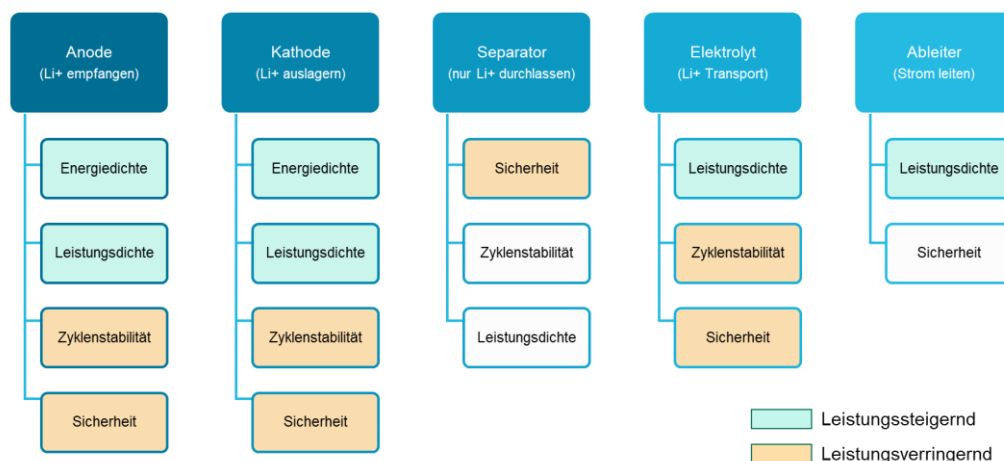


Abbildung 2: Funktionale Zusammenhänge der Zellbestandteile

UAP 1.2 Identifikation und Verknüpfung von Recyclingprozessen/- verfahren mit den Lebenszyklusphasen von Batteriesystemen und deren Komponenten

Im Rahmen dieses UAP wurden etablierte industrielle Recyclingverfahren für das stoffliche Recycling von Zellkomponenten wie Elektrodenmaterialien (Cu, Al), Elektrolyte (LiPF₆, aprotische Lösungsmittel), Separatoren (PE, PP), Gehäuse etc. evaluiert und hinsichtlich ihrer Recyclingquoten beschrieben. Der Fokus der Betrachtung lag auf Recyclingverfahren im industriellen Maßstab mit einer Produktionskapazität von mehreren tausend Tonnen pro Jahr, wie sie beispielsweise von Umicore (7.000 t/a) und Accurec (6.000 t/a) betrieben werden. [2]

Um eine bessere Vergleichbarkeit der verschiedenen Prozesse zu gewährleisten, wurde eine einheitliche Metrik für die Bewertung der Energieeffizienz, des Prozessaufwands und der Pro-

duktqualität entwickelt. Wie aus Tabelle 2 ersichtlich ist, sind die pyrometallurgischen Verfahren in der Regel mit einem geringen Aufwand verbunden. Allerdings werden lediglich Stoffgemische (Legierungen, Schlacken) von minderwertiger Qualität erzeugt. Um die Werkstoffe in ihrer ursprünglichen Qualität zu rezyklieren, ist folglich ein weiterer Aufbereitungsschritt in Form der Hydrometallurgie erforderlich.

Tabelle 2: Vergleichsmatrix verschiedener Recyclingverfahren bezüglich Energieeffizienz, Prozessaufwand und Produktqualität; Bewertungsmaßstab von wenig vorteilhaft (+) bis sehr vorteilhaft (+++) hinsichtlich der Bezugsgröße

	Mechanisch/ Thermisch	Direktes Recycling	Pyro-Metallurgie	Hydro-Metallurgie
Reifegrad	Industriell	Pilotmaßstab	Industriell	Industriell
Energieeffizienz	++	+++	+	++
Prozessaufwand	+	+	+++	+
Produktqualität	++	++	+	+++
Beispiel für Recyclingunternehmen (Land) [3]	AkkuSer Oy (Finnland)	On To Technology (USA) Duesenfeld (Deutschland)	Umicore (Belgien) Accurec (Deutschland)	Recupyl (Frankreich)

Ein vielversprechender Ansatz ist das „Direkte Recycling“, welches derzeit jedoch erst im Pilotmaßstab umgesetzt wird. Die Anlagenkonzepte der Firma Duesenfeld GmbH zum Recycling von inline-Produktionsabfällen und Fehlchargen sind in diesem Kontext als vielversprechend zu bewerten.

In Bezug auf die etablierten Recyclingrouten wird ersichtlich, dass für sämtliche Verfahren eine mechanisch/thermische Vorbehandlung erforderlich ist. Die mechanisch/thermische Vorbehandlung hat einen direkten Einfluss auf die Recyclingfähigkeit der Batteriekomponenten. Es besteht die Möglichkeit, dass Materialien durch die Beanspruchung so stark geschädigt oder zerstört werden, dass eine direkte Wiederverwendung nicht möglich ist. Zudem werden die Materialeigenschaften durch die Vorbehandlung gezielt für den nachfolgenden Prozessschritt verändert. für ein stoffliches Recycling bleibt daher in der Regel nur der Weg über die drei Stufen:

- I. mechanische Vorbehandlung
- II. Pyrometallurgie
- III. Thermische Behandlung

UAP 1.3 Aufbau der Einfluss- Wechselwirkungsmatrix

Im Rahmen der Zusammenarbeit aller Projektpartner wurde in diesem UAP eine sogenannte Einfluss-Wechselwirkungs-Matrix erstellt, in der die Konstruktionsebenen Zelle, Modul und System den Lebenszykluswirkungen gegenübergestellt werden. Der Fokus des IKTS lag dabei auf der detaillierten Beschreibung aller materialorientierten Eigenschaften der Komponenten auf Zellebene (Elektroden, Gehäuse etc.) sowie deren Zuordnung zu den identifizierten lebenszyklusrelevanten Parametern in der Matrix. In einem nächsten Schritt wurde die Betrachtung der Wechselwirkungen gemeinsam mit den Projektpartnern auf die Modul- und Systemebene ausgeweitet.

UAP 1.4 Wechselwirkungsanalyse und Ableitung von Optimierungszielen

Im Rahmen des UAP 1.4 wurden am IKTS geeignete Messgrößen zur Bestimmung der Recyclingeffizienz, -qualität und- kosten auf Zellebene definiert (z.B. Demontierbarkeit, Materialreinheit/- Zusammensetzung, Anzahl der Prozessschritte) und gemeinsam mit den beteiligten Projektpartnern Ansätze für verbesserte Kreislaufwirtschaftsoptionen erarbeitet. Beispielfhaft seien an dieser Stelle Steck- bzw. Schraubverbindungen am Gehäuse sowie eine erweiterte Modulkennzeichnung mit Angaben zu Zelltyp und Zellchemie genannt.

AP 2: Analyse Kreislaufführung und Batteriesysteme

Innerhalb des Arbeitspakets 2 erfolgt eine Analyse des strukturellen und prozeduralen Aufbaus ausgewählter Batteriesysteme. Zudem wird die zugehörige kaskadierte Kreislaufwirtschaftsoption untersucht, um potenzielle Hindernisse für die Produktgestaltung zu identifizieren. Im Rahmen des Arbeitspakets 2 wurden am IKTS folgende Teilarbeitsschritte durchgeführt, auf deren Basis Teilergebnisse erzielt wurden:

UAP 2.2 Analyse Batteriesysteme

Innerhalb dieses Unterauftragspakets erfolgt die Demontage der im UAP 2.1 beschafften Batteriesysteme. Dabei werden konstruktive Merkmale, insbesondere hinsichtlich Form, Größe sowie Anschluss, erfasst. Im Anschluss wurden die gewonnenen Zellen am IKTS einer "Post-mortem-Analyse" (PMA) unterzogen, welche in Gloveboxen unter Argonatmosphäre durchgeführt wurde. Gegenstand der Betrachtung war dabei die Kokam-Pouchzelle (SLPB 526495x2), wobei auch andere Zellen von Kokam (SLPB120216216HR2) und Samsung (prismatische Zelle mit 94 Ah) analysiert wurden. Im Rahmen der Demontage wurden die Zellen unter Einhaltung der erforderlichen Sicherheitsvorkehrungen geöffnet, um eine Entnahme aller enthaltenen Komponenten, wie Elektroden, Separatoren, Gehäusekomponenten, Ableiter und ähnlicher Elemente, zu ermöglichen. Des Weiteren wurden die verwendeten Materialien sowie die konstruktiven Verbindungen der Einzelbestandteile untereinander dokumentiert. In Abbildung 3 ist das allgemeine Vorgehen einer PMA für verschiedene Zelltypen dargestellt. Es ist ersicht-

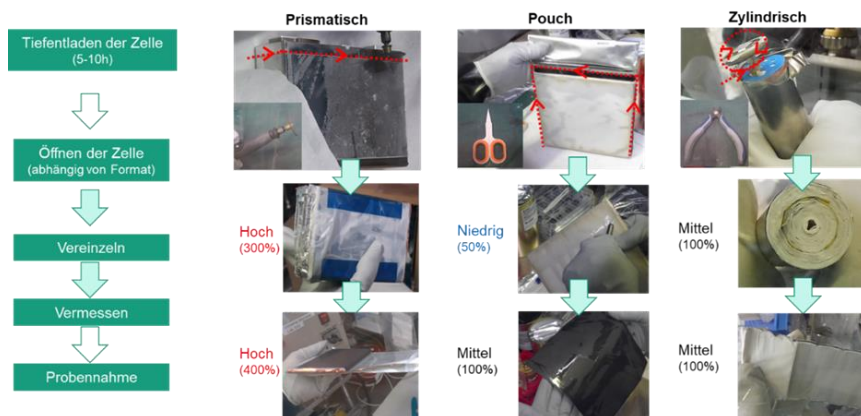


Abbildung 3: Vorgehensweise bei einer Post-mortem-Analyse (PMA) bis zur Probenahme für verschiedene Zelltypen; Prozentangaben geben den Zeitaufwand im Vergleich zur Demontage einer zylindrischen Zelle an

lich, dass sich der zeitliche Aufwand für eine PMA je nach Zelltyp zum Teil erheblich unterscheidet.

Im Anschluss an die Probenahme erfolgte eine elektrochemische Charakterisierung der entnommenen Elektrodenproben, u.a. um Spannungslagen zu ermitteln, Rückschlüsse auf die Zusammensetzung zu ziehen, die spezifische Kapazität zu bestimmen sowie den Zustand des

Materials zu beurteilen (SOH). Die Ermittlung des SOH stellt einen wesentlichen Aspekt bei der Evaluierung von Kreislaufwirtschaftsoptionen dar (UAP 2.4).

UAP 2.3 Analyse Kreislaufwirtschaftsoptionen

Die in UAP 2.2 bei den Zellöffnungen gewonnenen Erkenntnisse über die Demontage- und Trennbarkeit der Komponenten sowie weiterer, in den Arbeitspaketen erarbeiteter Kriterien werden im Rahmen von UAP 2.3 evaluiert und systematisch aufgearbeitet. Die durchgeführten Analysen ergaben, dass sich Wartungsoptionen auf Batteriesysteme mit langlebigen und hochwertigen Zellen, wie sie beispielsweise in Traktionsbatterien, Notfall- und stationären Batterien zum Einsatz kommen, ökonomisch sinnvoll gestalten lassen (vgl. Abbildung 4). Die für weniger Ladezyklen und Energiedichten ausgelegten kleinen Batterien werden vornehmlich in Elektronikkleingeräten verbaut. In Anbetracht der Konstruktionsvielfalt sowie der zu erwartenden geringen Lebensdauer in einer Folgeanwendung (2nd-Life) erweist sich eine Wartung oder Ertüchtigung dieser Zellen aus ökonomischer Perspektive als wenig attraktiv. In der Folge konzentrierten sich die weiteren Arbeiten im Projekt ReDesign (AP 4) daher auf größerformatige Zellen, deren Einsatz auch nach der Erstnutzungsphase bei einem SOH (state-of-health) von 80–90% eine Weiternutzung im 2nd-Life ermöglicht, etwa als stationäre Energiespeicher.

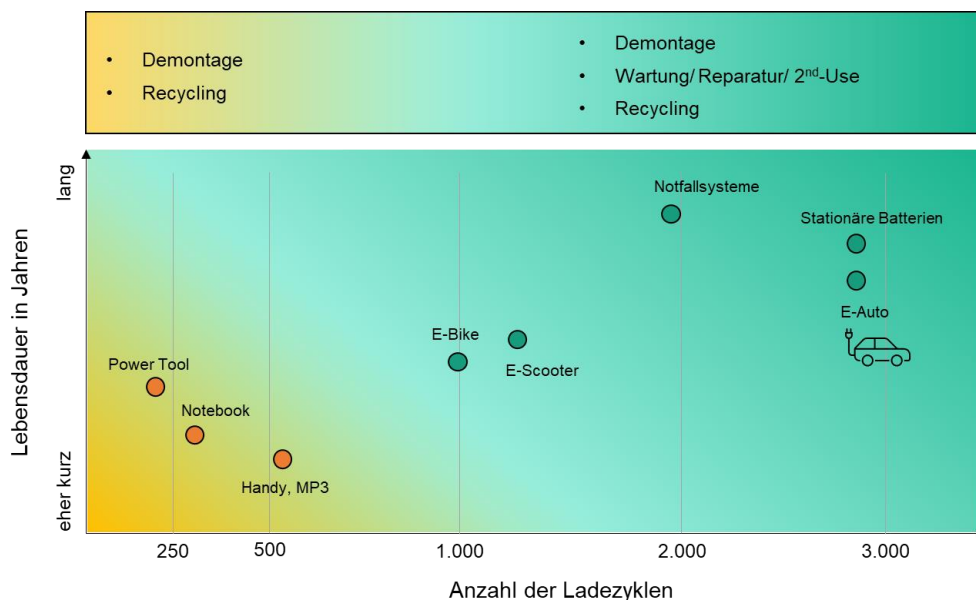


Abbildung 4: Unterteilung von Kreislaufwirtschaftsoptionen auf LIB in Abhängigkeit ihrer Lebensdauer und Zyklenstabilität. [3]

Eine Verlängerung der Lebensdauer von Batterien kann durch Maßnahmen wie Reparatur, Wartung oder die Weiternutzung in einem anderen Anwendungsgebiet erreicht werden. Dies wird als "2nd-Use" bezeichnet und umfasst beispielsweise die Umwandlung von Traktionsbatterien zu stationären Energiespeichern. Diese Ansätze tragen wesentlich zur Verbesserung der Ökobilanz von Batterien bei. Dennoch muss am Ende des gesamten Lebenszyklus eine Demontage der Batteriesysteme erfolgen, um diese in ihre Einzelteile zu zerlegen. Aufgrund des hohen Zeit- und Kostenaufwands, der mit einer manuellen Demontage einhergeht, werden bei den etablierten Recyclingverfahren Aufbereitungsmaschinen wie Brecher oder Schneidmühlen eingesetzt, um den hohen Materialfluss bewältigen zu können. Im Anschluss erfolgt eine Separation der verschiedenen Batteriekomponenten mittels unterschiedlicher Sortierverfahren, wie Magnetscheider und Sichter. Diese ist jedoch nicht so selektiv wie die manuelle Demontage. In Abhängigkeit der konstruktiven Ausgestaltung des Batteriesystems ergeben sich divergierende Herausforderungen und Hemmnisse im Rahmen des Materialrecyclings. Die auf Zellebene bestehenden Hemmnisse werden in UAP 2.5 näher erörtert.

UAP 2.4 Bewertung Kreislaufwirtschaftsoptionen

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wird der Fokus auf die Anwendung der Kreislaufwirtschaftsoptionen von leistungsstarken Traktionsbatterien gelegt, deren SOH einen Wert zwischen 70 und 80 Prozent aufweist.

Der Zusammenhang ergibt sich aus der erwarteten Lebensdauer und den damit verbundenen ökonomischen Möglichkeiten, die Lebenszeit dieser in der Regel hochpreisigen Zellen und Systeme zu maximieren. In Bezug auf das Erreichen des End-of-Life-Zeitpunkts eines Batteriesystems bestehen grundsätzlich zwei Möglichkeiten für das weitere Vorgehen. Zum einen besteht die Möglichkeit, ein Second Life anzustoßen, welches durch geeignete Maßnahmen der Wartung bzw. Reparatur initiiert wird. Mit Erreichen des finalen Lebensendes einer Batterie ist gemäß EU-Batterieverordnung ein stoffliches Recycling obligatorisch. Beide Optionen profitieren von exzellenten Demontage-Möglichkeiten der Batterie. Im Falle eines Second-Life-Konzepts ermöglicht dies den Austausch einzelner Zellen, Peripherie oder des BMS mit geringen Zeitaufwänden. Im Falle der Rückführung in den Stoffkreislauf erfolgt zunächst eine Demontage, welche eine Trennung der konstruktiven Teile des Batteriesystems, der WEEE (Waste of Electrical and Electronic Equipment) sowie der eigentlichen Batteriezellen gewährleistet. Unter optimalen Voraussetzungen kann durch eine Anpassung des Batteriedesigns der Batteriewickel mit den Wertmetallen schnell und einfach aus dem Gehäuse entnommen werden, sodass ein sauberer Stoffstrom als Grundlage für einen geschlossenen Stoffkreislauf entsteht.

Das Konsortium hat die Priorisierung der Optionen wie folgt festgelegt: (1) Erweiterung von Wartungsmöglichkeiten, (2) Verlängerung der Batterielebensdauer und (3) Steigerung der Recyclingeffizienz. Als neuer Punkt wurde die (4) Standardisierung sowohl in der Zellchemie als auch elektronischen und konstruktiven Schnittstellen aufgenommen. Dies impliziert nicht, dass bestimmte Batteriezellchemien ausgeschlossen oder andere monopolisiert genutzt werden sollen. Im Falle der End-of-Life-Behandlung ist jedoch zu gewährleisten, dass lediglich sortenreine Batteriezellen einer mechanischen Vorbehandlung unterzogen werden. Die Standardisierung von Schnittstellen bildet die Grundlage für die Automatisierung von Demontagemöglichkeiten, wodurch ein effizientes Recycling von Traktionsbatterien im End-of-Life-Fall ermöglicht wird. Dieser Ansatz bietet zudem ökonomische Vorteile, da der Bedarf an manueller Arbeit durch speziell geschultes Personal reduziert wird. Ein weiterer Vorteil ist die gesteigerte Arbeitssicherheit, da das Risiko von Unfällen durch Elektrizität oder Batteriechemikalien minimiert wird. In Konsequenz der Vorgaben der Batterieverordnung erübrigt sich eine Analyse

des Nutzens von Kreislaufwirtschaftsoptionen, da in diesem Kontext die Aspekte der Reparaturfähigkeit sowie des stofflichen Kreislaufs der Wertmetalle bereits durch gesetzliche Vorgaben geregelt sind. In Abbildung 5 ist eine schematische Übersicht über die Recyclingfähigkeit

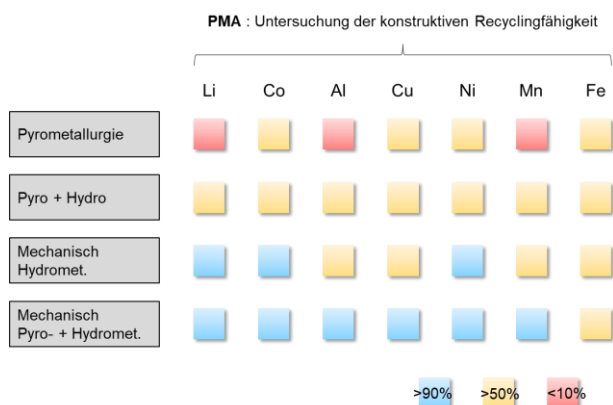


Abbildung 5: Recyclingfähigkeit der Hauptbestandteile (Metalle) einer Lithium-Ionen-Batterie bei Einsatz unterschiedlicher Recyclingprozesse

der wichtigsten Metalle einer Lithium-Ionen-Batterie in Abhängigkeit des verwendeten Recyclingverfahrens dargestellt.

UAP 2.5 Identifikation von Hemmnissen

Am IKTS werden die bestehenden Hemmnisse auf Zellebene bezüglich der Kreislaufwirtschaftsoptionen (Recycling, Wartung) ermittelt und an die Projektpartner für die Bearbeitung von AP 3 weitergegeben.

Die durch PMAs identifizierte Hemmnisse, bezogen auf die Recycling-Freundlichkeit von State-of-the-Art-Batteriezellen, wurden in weiteren PMAs an Zellen großformatiger Pouchzellen eines Automobil-OEM bestätigt. Die Demontage der Zellen erfolgte durch Kollegen der Universität Bayreuth, welche die Materialien anschließend dem IKTS zur weiteren Analyse zur Verfügung stellten. Die größten Schwierigkeiten hinsichtlich des Recyclings treten bei der Entnahme einzelner Zellen aus dem Zellpack bzw. Modul auf. Auf Basis der ermittelten Hemmnisse wurden im Rahmen von AP 4 Vorschläge für konstruktive Verbesserungen auf Zellebene erarbeitet.

Eine wesentliche Herausforderung stellt auf allen Ebenen die selektive Trennung der einzelnen Komponenten dar. Eine unzureichende Trennung der Zellkomponenten führt zu einem erhöhten Aufwand in den Reinigungsschritten, da mehr Prozessschritte erforderlich sind, um die geforderten Produktqualitäten der Rezyklate zu erreichen. Die Problematik der Trennung zeigt sich insbesondere bei der Demontage von Zellwickeln und -stapeln. Um eine Auftrennung der Komponenten vor den nachfolgenden Mahlschritten zu erreichen, ist eine effiziente Trennung der Anodenblätter, Kathodenblätter und Separatorblättern erforderlich. Ein weiteres Hemmnis besteht in der Abtrennung der Wickel bzw. Stapel vom Zellgehäuse (Abbildung 6). Insbesondere die festen Schweißverbindungen zu den Zellterminalen verhindern eine unproblematische Entnahme von Wickeln und Stapeln. Erste Lösungsansätze dazu wurden in AP 4 erarbeitet.

	Wiederverwertbare Teile	Hemmnisse
	<ul style="list-style-type: none"> Elektronikschratt Kabelverbindungen Module 	<ul style="list-style-type: none"> Entfernung Verbinder Keine Daten über Zustand der Batterie Gaserzeugung HF (aus Elektrolyt) Brandgefahr
	<ul style="list-style-type: none"> Gehäuse Tab Zelle 	<ul style="list-style-type: none"> Entfernung von Klebstoff, Lötstellen. Keine Daten über Zustand des Moduls
		<ul style="list-style-type: none"> Saubere Entfernung von Anode und Kathode Kontaminierung und Mischung Polymere-Bestandteile Wechselnde Zusammensetzungen und Materialien

Abbildung 6: Systematischer Überblick über recyclebare Komponenten einer Lithium-Ionen-Batterie auf System-, Modul- und Zellebene zusammen mit den potenziellen Hemmnissen

UAP 2.6 Ableiten von Handlungsoptionen

In einer Matrix wurden alle Hemmnisse und Designmerkmale erfasst, um daraus Handlungsmöglichkeiten abzuleiten. Es wurden verschiedene Designs für die einzelnen Bestandteile einer Batterie entwickelt. Dazu gehören Material, Zelle und Modul/Pack. Für jede Option wurde bewertet, wie sie sich auf die Leistung der Zelle, die Sicherheit und das Recycling auswirkt. Außerdem wurde untersucht, wie gut sie sich umsetzen lässt. Dabei ging es um Kosten, Standardisierung, Sortierung und Deassemblierungsoptionen. Diese Matrix ist die Grundlage für AP3.

Recyclinggerechtes Design bedeutet, dass man zum Beispiel darauf achtet, dass man umweltfreundlichere Lösungsmittel benutzt, dass man auf verschweißte Verbindungen verzichtet und dass man die einzelnen Teile einer Zelle oder eines Moduls so anordnet, dass man sie gut wiederverwenden kann.

AP3: Bereitstellung einer Toolbox für die Nachhaltigkeits- und lebenszyklusorientierte Gestaltung von Batterien

Das Ziel von Arbeitspaket 3 besteht in der Ableitung von zielführenden Gestaltungsrichtlinien auf Basis der identifizierten Optimierungspotenziale, welche aus der Wechselwirkung von Material und Zelldesign mit den Lebenszykluswirkungen resultieren. Der Fokus liegt dabei nicht nur auf der Erarbeitung von Richtlinien, sondern insbesondere auf der Bereitstellung einer Toolbox für die nachhaltigkeits- und lebenszyklusorientierte Gestaltung von Batterien.

In Bezug auf das Arbeitspaket 3 wurden folgende Teilarbeitsschritte durchgeführt, auf deren Basis Teilergebnisse erzielt wurden:

UAP 3.1 Aktualisierung des theoretischen Modells mit realen Erkenntnissen aus der Systemzerlegung (AP2)

In Kooperation mit den Projektpartnern hat das IKTS die Informationen aus der Zelldemontage (AP2.2) in aufbereiteter Form zur Verfügung gestellt. Das aktualisierte Systemmodell aus AP1 findet im Anschluss Verwendung bei der Beschreibung von Stoffkreisläufen der untersuchten Batteriesysteme.

UAP 3.2 Ableiten von technischen Anforderungen an Batteriesysteme

Im Rahmen der Überarbeitung des Modells nach UAP 3.1 wurde eine Zuordnung aller Bauteile zu technischen Anforderungen vorgenommen sowie die Abhängigkeiten spezifischer Anforderungen und die entsprechenden Abhängigkeiten der Komponentenanforderungen auf Zellebene beitragen. Im Anschluss wurden diese im Gesamtmodell implementiert.

UAP 3.3 Ableiten von recyclingspezifischen Anforderungen an Batteriesysteme

Am IKTS wurde eine umfangreiche Recherche zu den bereits etablierten Recyclingverfahren für Lithium-Ionen-Batterien durchgeführt, um deren materialspezifische Anforderungen besser zu verstehen. Zudem wurde eine Marktrecherche bezüglich aktueller Zellchemien und Batte-

riedesigns verschiedener Automobilhersteller initiiert. Die durchgeführte Recherche zielte darauf ab, eine Prognose zu den zukünftigen relevanten Stoffströmen für den LIB-Recyclingprozess zu treffen. Im weiteren Verlauf der Arbeiten im UAP 3.3 erfolgte eine möglichst quantitative Bewertung der ermittelten Recyclingverfahren hinsichtlich der vorhandenen Zellchemie, um die Effizienz verschiedener Recyclingprozesse untereinander vergleichen zu können. Das Ziel der Arbeiten am IKTS bestand in der Umsetzung der spezifischen Anforderungen von Recyclingprozessen auf Zellebene in Bewertungsalgorithmen. Dabei werden sowohl material-spezifische Einflüsse (unterschiedliche Zellchemien) als auch konstruktive Einflüsse (unterschiedliche Zellformate) in der Bewertung integriert.

UAP 3.5 Ableiten von Gestaltungsrichtlinien

Die Verknüpfung der Anforderungen mit den Bauteilen bzw. Funktionen aus UAP 3.2 sowie den Lebenszyklusoptionen aus UAP 3.4 bildet die Grundlage für die Ableitung von Designrichtlinien in Bezug auf die jeweilige Recyclingtiefe (Aufbereitung, Aufarbeitung, Verwertung).

Auf Basis der bisherigen Erkenntnisse werden in diesem UAP allgemeine Gestaltungsrichtlinien abgeleitet. Das IKTS befasst sich mit den Gestaltungsrichtlinien auf Zellebene. Dazu werden konstruktive und stoffliche Richtlinien für Zellen erarbeitet, die hinsichtlich ihrer Kreislaufwirtschaftsoptionen optimiert sind. Dies umfasst beispielsweise Wartungs- und Recyclingmöglichkeiten.

AP4: Entwicklung von Konzeptdemonstratoren und Übertragung auf zukünftige Batterie- Generationen

Im Arbeitspaket 4 sollen zwei virtuelle Demonstratoren für nachhaltige, recyclinggerecht konzipierte Zellen (konventionelle Li-Ionen-Technologie und Festkörperzelle) entwickelt werden. Ziel ist die Veranschaulichung der Designelemente, der Aufbau funktionsfähiger Muster war nicht vorgesehen. Folgende Teilarbeitsschritte wurden im Arbeitspaket 4 durchgeführt und darauf aufbauend Teilergebnisse erzielt:

UAP 4.1 Auswahl geeigneter Zellkomponenten und Entwicklung recyclingfähiger Zellformate

Am IKTS wurden aufbauend auf den Erkenntnissen der Arbeiten in UAP 2.2 (PMA) und UAP 2.5 (Hemmnisse) verschiedene Optionen hinsichtlich recyclinggerechter Materialien für Zellkomponenten und -formate erarbeitet und bewertet. Darüber hinaus werden Aspekte der Leistungsfähigkeit, Sicherheit und Wartungsfreundlichkeit der Entwicklungsbatterie in die Bewertung einbezogen.

Hinsichtlich des Zellformats zeichnet sich eine Tendenz zu Hardcase Zellen (prismatisch oder zylindrisch) ab, da diese ein stabiles Zelldesign ermöglichen, das den hohen Sicherheitsanforderungen für EV-Batterien entspricht und mit Greifrobotern (Automatisierung in Batterieproduktion und Recycling) leichter gegriffen und transportiert werden kann. Pouch- Zellen hingegen ermöglichen zwar eine einfachere Demontage, werden aber hauptsächlich in Einweganwendungen eingesetzt. Wichtige Punkte für ein recyclingfähiges Zellformat sind:

- Eine Optimierung der Recycling- und Wartungsfähigkeit lässt sich durch eine gezielte Auswahl magnetischer Gehäusewerkstoffe sowie den Einsatz von Bauteilen mit deutlich divergierender Dichte erzielen. So kann etwa eine äußere Schutzschicht aus Materialien höherer Dichte zum Einsatz kommen, während leichte Materialien im Inneren die strukturelle Integrität gewährleisten. Dies kann sowohl die Gesamtleistung und Sicherheit der Batterie positiv beeinflussen als auch die Möglichkeit einer effizienteren

Trennung der einzelnen Komponenten im Bereich des mechanischen Recyclings verbessern.

- Visuelle und maschinenlesbare Kennzeichnung für die Überwachung und Rückverfolgbarkeit von Batterien, um Informationen über die CO₂-Intensität ihrer Herstellungsprozesse und die Herkunft der verwendeten Materialien, ihre Zusammensetzung, einschließlich Rohstoffe und gefährliche Chemikalien, ihre Reparatur, Wiederverwendung und Zerlegung sowie die Behandlungs-, Recycling- und Verwertungsverfahren, denen die Batterie am Ende ihrer Lebensdauer unterzogen werden kann, bereitzustellen. (teilweise bereits in der neuen EU-Batterieverordnung¹ behandelt).
- Verwendung von leicht lösbaren elektrischen Anschlüssen/Kontakten und Sicherheitselementen, die durch Schraubanschlüsse ersetzt werden können. Bei Batterien mit Schraubanschlüssen ist es wichtig, dass die elektrischen Anschlüsse leicht zugänglich und austauschbar sind, aber gleichzeitig langfristig gute elektrische Verbindungen gewährleisten. Lösbare Anschlüsse ermöglichen eine einfache Wartung und den Austausch defekter Teile, müssen aber auch unbefugtes Lösen durch nicht geschultes Personal verhindern können. Dies ist besonders wichtig, um die Betriebssicherheit zu gewährleisten und Unfälle oder Schäden zu vermeiden. Weitere Bestandteile des Zeldesigns sind Sicherheitselemente wie Überstrom-/Überspannungsschutz, Temperatursensoren, Gasableitungssysteme und thermische Abschaltssysteme. Bei der Konstruktion von Batteriesystemen sollte darauf geachtet werden, dass die verwendeten Schraubverschlüsse sicher, zuverlässig und möglichst universell sind.
- Lithium-Ionen Zellen sind normalerweise hermetisch verschlossen, lediglich durch extensive Gas- und Temperaturentwicklung erfolgt eine irreversible, aber kontrollierte Zellöffnung zum Abblasen von Gas und Verminderung von Sach- und Personenschäden. Verschlossene, durch Fachpersonal im Bedarfsfall zur Verfügung stehende Zellöffnungen sind nicht vorgesehen. Im Rahmen des ReDesign-Projekts wurden gealterte zylindrische Zellen nachträglich mit einer Bohrung versehen, um im Betrieb der Zellen verbrauchten Elektrolyten zu ersetzen und damit einen Weiterbetrieb der Zellen mit „frischem“ Elektrolyten zu ermöglichen. Die Versuchsergebnisse zeigten jedoch, dass mit dieser Maßnahme die Zellperformance nicht verbessert werden konnte. Prinzipiell kann die Wiederauffüllung verbrauchter Elektrolyte jedoch eine Wartungsoption darstellen, insbesondere wenn Details zur optimalen Elektrolytzusammensetzung durch den Zellhersteller bekanntgegeben werden. In den Konzeptdemonstratoren wurde deshalb u.a. für die Elektrolytauffüllung eine verschließbare Zellöffnung vorgesehen (vgl. Feature 2 im Folgekapitel).

Gegenwärtig erfolgt die Entwicklung, der Bau und der Handel von Li-Ionen-Batterien in der Regel ohne Berücksichtigung von Aspekten des Recyclings. In Anbetracht der zu erwartenden Zunahme der Produktion von Elektrofahrzeugen in den kommenden Jahren ist die Einführung eines skalierbaren, geeigneten Recyclingsystems von entscheidender Bedeutung. Die Sammlung von EoL-Batterien erfolgt zunächst durch den Hersteller oder ein etabliertes Sammelsystem. Die Etablierung eines skalierbaren und effizienten Recycling-Systems erfordert die Sortierung der Zellen nach ihrer Zellchemie und Bauform. Durch *Vereinheitlichung/Standardisierung* auf eine überschaubare Vielfalt kann der Prozess der Sortierung und somit auch die Metallrückgewinnung in den Folgeprozessen optimiert werden. Im Folgenden werden die entsprechenden Eigenschaften für recyclebare Zellen/Module vorgestellt:

- Die Verwendung eines wasserlöslichen Bindemittels für Anoden- und Kathodenmassen erlaubt eine einfache Trennung des Stromabnehmers vom Aktivmaterial, ohne den Einsatz umweltschädlicher Chemikalien wie NMP.
- Eine Verringerung des Kobalt-Gehalts im Kathodenmaterial (Ni-reiches NCM, NCA) führt zu einer Reduktion der Materialkosten sowie einer Steigerung der Energiedichte. Der Einsatz von LFP in Zellen mit einer ausgezeichneten Lebensdauer, hoher Sicherheit und niedrigen Kosten stellt eine weitere Möglichkeit dar.
- Alternative Designs, wie die Zickzack-Falten (Z-Folding) der Elektroden für Pouch-Zellen, sowie die Verwendung von Klebepunkten, ermöglichen eine Reduktion des Zeitaufwands für die Demontage von mehreren Stunden auf ca. 15 Sekunden bei Einsatz von Demontage-Robotern [7].
- Weniger, aber größere Zellen können die Demontage und Wartung erleichtern, indem sie folgende Aspekte adressiert:
 - Die Demontage erfolgt mit einer vereinfachten Handhabung, da weniger Einzelzellen entfernt werden müssen. Dies führt zu einer Reduktion der Arbeitsschritte und einer Prozessvereinfachung.
 - Eine Reduzierung der Verkabelung ist aufgrund der geringeren Anzahl an Zellen möglich. Dies führt zu einer Verringerung der erforderlichen Anschlüsse. Dies führt zu einer Verringerung der Komplexität sowie des Risikos von Fehlern während der Demontage.
 - Die Verwendung größerer Zellen ermöglicht eine effizientere Nutzung des verfügbaren Raums. Die Reduktion der Anzahl an Zellen führt zu einer Verringerung der Zwischenräume, die gefüllt werden müssen, was eine Erhöhung der volumetrischen Energiedichte zur Folge hat. Dies ermöglicht den Einsatz von kleinen Batteriemodulen bzw. -packs.
 - Größere Zellen weisen in der Regel eine bessere Wärmeableitung auf, was zu einer effizienteren Regulierung der Batterietemperatur und einer Verlängerung der Batterielebensdauer beitragen kann.
 - Der Einsatz größerer Zellen führt zu einer Reduktion der Materialkosten, da das Gehäusematerial sowie die Anschlüsse im Vergleich zu vielen kleineren Zellen weniger Material benötigen. Dies führt zu einer Reduktion der Kosten.

Größerformatige Zellen stellen jedoch bzgl. der Ausfallraten während der Fertigung einen Kostennachteil dar, da erhebliche Verluste (Material und Personaleinsatz) mit jeder im Verlauf der Produktion ausgefallenen Zelle auftreten können.

Es sei jedoch darauf verwiesen, dass mit der Wahl eines größeren Zellformats auch gewisse Nachteile einhergehen können, beispielweise ein erhöhtes Gefahrenpotenzial. Die Entscheidung für ein bestimmtes Zellformat ist von einer Vielzahl von Faktoren abhängig, wobei neben den spezifischen Anwendungsbereichen auch die angestrebte Leistungsfähigkeit der Batterie zu berücksichtigen ist.

UAP 4.2 Konzeptdemonstrator mit Li-Ionen Zellchemie

Im Rahmen des vorliegenden UAP wurden am IKTS sämtliche Spezifikationen der Zellkomponenten sowie des Prototyps auf Basis der Li-Ionen-Zellchemie erstellt. Die Elektroden- und Zellspezifikationen wurden auf Basis der selektierten Komponenten sowie des entwickelten Zellformats (AP1) abgeleitet. Des Weiteren wurden die im vorherigen AP definierten Wartungsintervalle und Lebensdauern sowie weitere messbare Bewertungskriterien abgeschätzt. Im Ergebnis wurde ein gedruckter Demonstrator entwickelt, um das mit dem Produktrecycling compatible Design zu veranschaulichen.

Die Abbildungen 7 und 8 veranschaulichen die virtuellen Prototypen als Neukonzipierung des Zelldesigns/Zellformats einer konventionellen L-Ionen-Zellen sowie einer Festkörperzelle mit optimaler Recycling- bzw. Kreislauffähigkeit. Zudem werden die beiden per 3D-Druck hergestellten Modelle präsentiert.

Als wesentlicher Aspekt im Rahmen des Zelldesigns wurde eine direkt auf das Gehäuse aufgebrachte, langlebige Zellkennzeichnung identifiziert (vgl. Feature ①, beispielhaft dargestellt als QR-Code für die prismatische Zelle). Die Batterieverordnung hat signifikante Auswirkungen auf Wirtschaftsakteure, die mit der Inverkehrbringung, Inbetriebnahme oder dem Recycling von Batterien befasst sind. Zu den betroffenen Wirtschaftsakteuren zählen demnach Hersteller, Inverkehrbringer, Sammler sowie Recycler. Sie sind dazu verpflichtet, bestimmte Nachhaltigkeits-, Sorgfaltspflichten, Sicherheitsanforderungen, Kennzeichnungs- und Informationspflichten zu erfüllen. Eine bemerkenswerte Neuerung ist der ab 2027 für leichte Verkehrsmittel-Batterien (LV-Batterien), Industriebatterien mit einer Kapazität von mehr als 2 kWh sowie Elektrofahrzeugbatterien obligatorisch einzuführende Batteriepass. Der Pass beinhaltet Angaben zum jeweiligen Batteriemodell und erlaubt eine lückenlose Rückverfolgung. Des Weiteren stellt die neue EU-Batterieverordnung die erste Verordnung dar, welche die Einführung eines digitalen Produktpasses fordert. Der Zweck des Produktpasses besteht in der Reduzierung von Umweltbelastungen. Zu diesem Zweck sind Hersteller verpflichtet, sämtliche Emissionen, die bei der Herstellung, Nutzung und Entsorgung ihrer Produkte entstehen, zu dokumentieren.

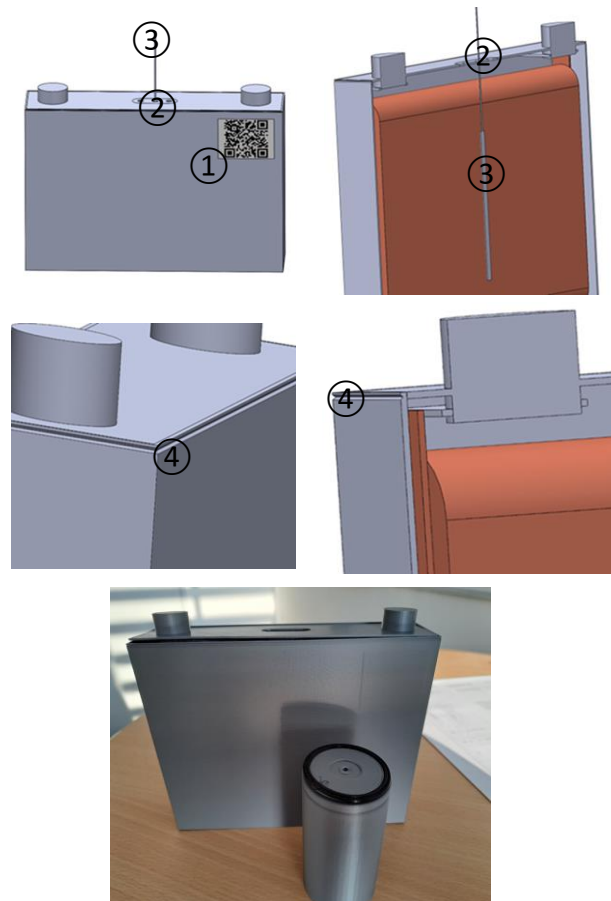


Abbildung 7: Konzeptentwurf (oben) für Prismatische Zelle und 3D-gedruckte Demonstratoren (unten) der prismatischen und zylindrischen Zelle

Ein gemeinsames Designelement beider Hardcase-Varianten ist eine im Deckelbereich angebrachte Durchführung, auch als Feature ② bezeichnet. Die zuvor erwähnte Durchführung kann im Rahmen der Zellmontage unter anderem zum Einfüllen des Elektrolyten genutzt werden. Im Anschluss an die Zellformierung, bei der die Zellen entgast wurden, wird die Öffnung verschlossen, bleibt aber (für geschultes Personal) weiterhinöffnungsfähig. Dies kann beispielsweise durch Einsetzen eines Heißkleberpfropfens oder durch Verschluss mit einer Schraubdichtung (mit Spezialkopf) und als Sicherheitsdruckventil erfolgen. Im zweiten Beispiel ist es durch diese Umsetzung dann möglich, in sehr stark gealterte Zellen neuen Elektrolyten zu füllen, um die Nutzungsphase der Zelle zu verlängern (bevorzugte Zirkulationsmöglichkeit).

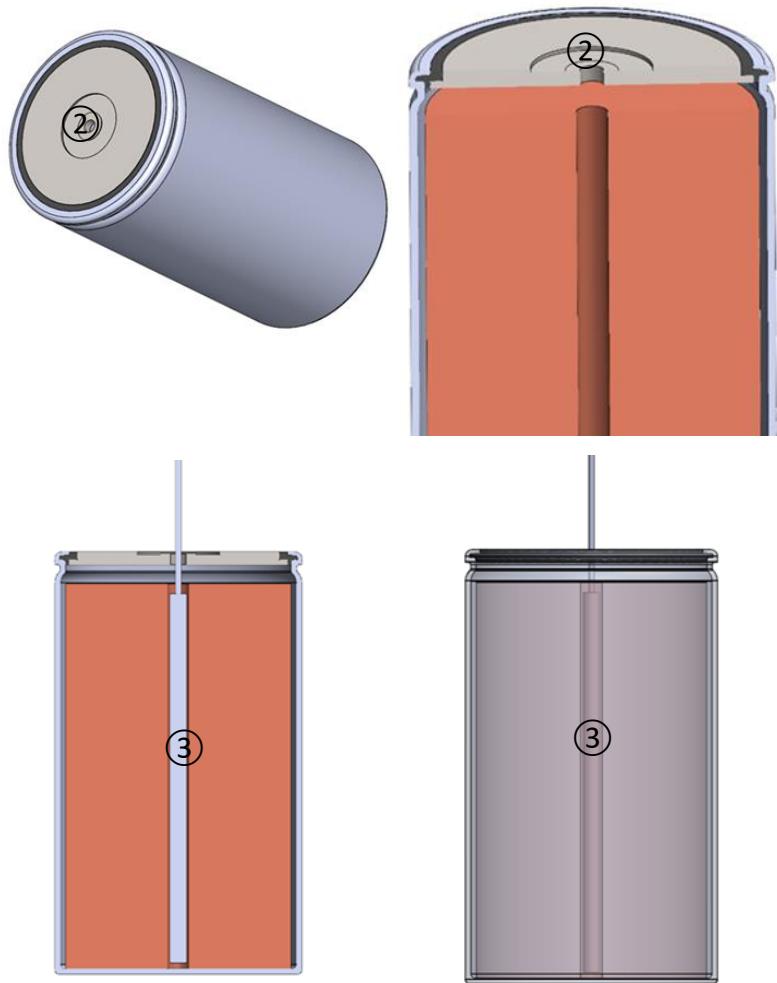


Abbildung 8: Konzeptentwurf zylindrische Zelle

Die Durchführung könnte, wie am Beispiel der prismatischen Zelle demonstriert, auch aus mehreren Durchbrüchen bestehen, sodass verschiedene Optionen zur Integration unterschiedlicher Zellsensorik zur Verfügung stehen. Eine Referenzelektrode (Feature ③) erlaubt eine unabhängige Detektion des Potentials der Anode und Kathode, sodass sich das BMS nicht nur auf die gemessene Zellspannung zwischen den Zellterminalen, sondern auch auf die Einzelpotentiale der Elektroden stützen kann. Dies erlaubt eine optimierte Kontrolle der zulässigen Betriebsbedingungen der Zelle, wodurch unter anderem ein schnelleres und sicheres Laden der Zellen auch bei niedrigen Temperaturen ermöglicht wird. Es kann angenommen werden, dass eine gezielte Zellsensorik die Lebensdauer von Zellen signifikant verlängern wird. Die Wiederverwertung der Zellsensorik erfolgt durch ein "Herausziehen" durch die Durchführungen.

In Vorversuchen am IKTS konnte festgestellt werden, dass zylindrische Zellen eine höhere Wahrscheinlichkeit für Probleme mit abgerissenen Ableiterfahnen aufweisen, wenn der Zellwickel entfernt wird. Des Weiteren wurde festgestellt, dass die Trennung des Wickels bzw. des Stapels vom Gehäuse ein generelles Hindernis darstellt. Um das Recycling zu optimieren, wurde eine umlaufende Sollbruchstelle (Feature ⑤) für die prismatische Zelle integriert. Diese befindet sich innerhalb der Deckelanordnung, welche nach dem Stand der Technik durch Laserschweißen mit dem Gehäuseboden verbunden ist. Bei einer automatischen Demontage

der Zelle wird die Deckelbaugruppe zusammen mit den Zellwicklungen/-stapeln aus der Bodenbaugruppe herausgezogen, wodurch eine Trennung ermöglicht wird. Als alternative Möglichkeit zur Öffnung der Zelle kann die Zerkleinerung ganzer Zellen, Zellenstapel bzw. Wicklung und Gehäuseteile nach dem Stand der Technik hinsichtlich der Trennung der Komponenten optimiert werden. Dazu kann die Verwendung von Becher- und Deckelmaterialien aus magnetischem Material in Betracht gezogen werden, was zu einer saubereren Trennung der eisenhaltigen Gehäusematerialien von den Aktivmaterialien, Folien und dem Separator nach der Zerkleinerung führt. Dies wiederum erhöht die Möglichkeiten der Wiederverwendung der Batteriematerialien und erleichtert das Recycling (Reduzierung von Verunreinigungen).

Die Abbildung 9, welche in Kooperation mit den Projektpartnern konzipiert wurde, präsentiert zwei Moduldemonstratoren, die für den 2nd-Use und den Recyclingprozess vorgesehen sind. U. a. wurde eine lösbare Verbindung der Zellen zur Wiederverwendung oder Reparatur integriert. Die Sicherung der elektrischen Verbindungen erfolgt durch Federkontakte, sodass auch bei großen Toleranzen oder Ausrichtungsfehlern der Zellen eine einwandfreie Kontaktierung gewährleistet ist (vgl. Abbildung 4a). Bei der Demontage der Module werden gleichzeitig alle elektrischen Verbindungen getrennt, so dass die Sicherheit des Personals deutlich erhöht wird.

Wie in Abbildung 4b dargestellt, können die Verbindungen bei Variante „b“ im Demontageprozess leicht abgetrennt werden, da es sich um Abreißkontakte handelt. Die Verwendung gefalteter Geometrien für die Kontaktbleche führt zu einer erhöhten Stabilität, gekrümmte Strukturen weisen eine höhere Steifigkeit und Resistenz gegenüber Verformungen auf. In Bezug auf Abreißkontaktbleche besteht die Möglichkeit, diese in Batteriemodulen zu verschweißen, um eine zuverlässige elektrische Verbindung sicherzustellen, und gleichzeitig ein Abreißen der Kontaktleisten während des Demontageprozesses ermöglichen.

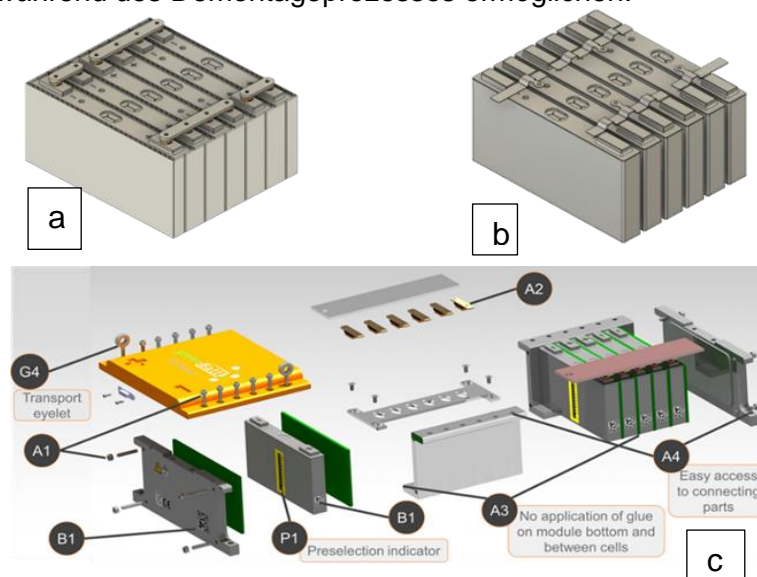


Abbildung 9: a) Konzept für Wiederverwendung b) Konzipiert für Materialrecycling c) Moduldemonstrator

UAP 4.3 Konzeptdemonstrator mit Festkörper- Zellchemie

Im Vergleich zu UAP 4.2 erfolgt die Auswahl von Komponenten sowie die Erstellung einer adäquaten Zellvorlage, um zu demonstrieren, dass diese Zellformate auch für die nächste Generation von Batterien, beispielweise Festkörperbatterien, geeignet sind. Unter den derzeit hergestellten SSBs findet sich das planare Zellformat, welches sowohl als prismatische Zelle als auch als Pouch-Zelle realisiert werden kann, am häufigsten. Bei planaren Zellen bleibt die

strukturelle Integrität der Festelektrolyte erhalten. Für den Einsatz in Elektrofahrzeugen ermöglicht diese Geometrie eine einfache Stapelung der Zellen und Vorteile beim Aufbau von Batteriepacks.

Die Kapazität sowie die Ausgangsspannung können durch eine Reihenschaltung bzw. eine Parallelschaltung zylindrischer Zellen erhöht werden. Sie enthalten ein sicheres und stabileres Batteriegehäuse, welches unter genau definierten Produktionsparametern gefertigt wird. Zylindrische Formate sind besonders für Systeme mit hohem Polymeranteil geeignet (bezieht sich auf Elektrodenbinder), wobei der Aufbau zylindrischer Zellen mit sulfidischen Festkörperelektrolyten prinzipiell auch möglich ist¹. Da den meisten Festelektrolyten jedoch eine hinreichende mechanische Flexibilität fehlt, sind zylindrische Zellen potenziell weniger geeignet. Hybride Festelektrolyte sind ebenfalls vielversprechend, da sie in eine Reihe bestehender Fertigungsverfahren (Rolle-zu-Rolle oder Extrusionsverfahren) integrierbar sind. In der Tabelle 3 werden verschiedene Festelektrolyte für Festkörperbatterien mit ihren jeweiligen Vor- und Nachteilen dargestellt. Der jeweils vielversprechendste Festelektrolyt wurde hinsichtlich seiner Materialeigenschaften und elektrochemischen Performance angegeben.

Die in diesem Projekt vorgestellten Komponenten für eine Festkörperbatterie bestehen z.B. aus zwei verschiedenen Elektrolyten: einem Oxid-Elektrolyten für die Anodenseite mit Li-Metall und einem Sulfid-Elektrolyten für die Kathodenseite. Das für Li-Ionen Zellen gezeigte Zelldesign aus UAP 4.2 ist prinzipiell auch für Festkörperbatterien denkbar.

Für die oxidischen Elektrolyte wurden Li-La-Zr-Oxide (LLZO), die in der Granatstruktur kristallisieren, aufgrund der mittleren Ionenleitfähigkeit, des bereiten elektrochemischen Fensters und der guten Verträglichkeit mit Li-Metall-Anoden ausgewählt. Bei den sulfidischen und polymeren Elektrolyten sind Argyrodite bzw. Kompositpolymere aufgrund der hohen Ionenleitfähigkeit, der hohen thermischen Stabilität und des guten Grenzflächenkontaktes für zukünftige Festkörperbatterien gut geeignet.

Tabelle 3: verschiedene Festelektrolyte

SEEs-Type	Vorteile	Nachteile	Beispiel-Elektrolyte
Oxid	<ul style="list-style-type: none"> • breites elektrochemische Stabilitätsfenster • weniger reaktiv als Sulfid basierte Elektrolyte • Härte und Verformungsstabilität • gute Stabilität mit Li-Metall 	<ul style="list-style-type: none"> • mittlere Ionenleitfähigkeit • Verbesserung des Oberflächenschutzes der Elektrolyte mit zusätzlichen Materialien 	LLZO [4]
Sulfid	<ul style="list-style-type: none"> • hohe Ionenleitfähigkeit • Verformbarkeit • gute Flexibilität • gute mechanische Eigenschaften 	<ul style="list-style-type: none"> • kleines thermodynamisches Stabilitätsfenster • begrenzte Stabilität gegenüber Li-Metall • Empfindlich gegenüber Luftbestandteilen 	Argyrodit LPS, LISICON, LGPS[5]
Polymer	<ul style="list-style-type: none"> • hohe Verformbarkeit • höhere Energiedichte • Vermeidung der Verwendung von ätzenden Lösungsmitteln 	<ul style="list-style-type: none"> • niedrige Ionenleitfähigkeit bei Raumtemperatur • mangelnde Temperaturstabilität 	Komposit polymer Elektrolyt [6]

¹ Siehe z.B. <https://www.ipa.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/das-eckige-muss-rund-werden.html>

UAP 4.4 Übertragung der Erkenntnisse auf zukünftige Zellgenerationen

Auf Basis der beiden Prototypen erfolgte eine Untersuchung der Übertragbarkeit auf zukünftige Zellen sowie auf in der Literatur diskutierte Zellformate und -generationen. Die Übertragbarkeit umfasst sämtliche Zellkomponenten, beginnend beim Aktivmaterial bis hin zum Zellgehäuse/Modul, wobei auch der ökologische Fußabdruck berücksichtigt wird. Im Rahmen dieses Arbeitspakets erfolgte eine Evaluierung der entwickelten Konzepte hinsichtlich ihrer Zukunftsfähigkeit sowie ihrer Recyclingfähigkeit und verschiedener Kreislaufwirtschaftsoptionen. Rundzellen ermöglichen eine effiziente Ausnutzung des Zellvolumens und weisen eine gute Stabilität auf. Allerdings zeigen sich bei einer Zusammenschaltung einer Vielzahl dieser Rundzellen zu einem Batteriepack geringere Platzausnutzungen. Deshalb wurde beispielsweise von BYD das sechseckige Zellformat eingeführt. Die Anordnung der Zellen ohne Zwischenräume ermöglicht entweder die Erhöhung der Elektrolytmenge zur Verlängerung der Lebensdauer oder die Steigerung der volumetrischen Energiedichte der Batterie. Die hexagonale Form führt zudem zu einer Stabilitätssteigerung des Batteriepacks, was sich in verbesserten Crasheigenschaften niederschlägt.[7]

Die zuvor genannten Eigenschaften lassen sich auf ein sechseckiges Zellformat (vgl. Abbildung 10) übertragen, wodurch eine höhere Stabilität sowie die Möglichkeit eines Cell-to-Pack (CTP)-Designs gewährleistet werden. Die CTP-Methode stellt eine Überwindung des traditionellen Aufbaus aus Zellen und Modulen dar. Die Zellen werden direkt in das Batteriepack integriert, sodass separate Module nicht erforderlich sind. Dies hat Auswirkungen auf den gesamten Lebenszyklus der Batterie, sowohl positiv als auch negativ. Beispielsweise kann die Energiedichte durch den direkten Einbau der Zellen in das Batteriepack verbessert werden, wobei bis zu 40 % der Bauteile eines konventionellen Batteriepacks eingespart werden können. Obgleich die CTP-Technologie diverse Vorzüge bietet, obliegt es den Herstellern, sicherzustellen, dass die geltenden Sicherheitsstandards jederzeit eingehalten werden. Die direkte Integration der Zellen erfordert eine sorgfältige Gestaltung, um potenzielle Risiken wie Batteriebrände zu minimieren. Mit dem Wegfall der modularen Bauweise geht die Möglichkeit verloren, einzelne Module oder Zellen bei einem Defekt zu tauschen. Dies stellt jedoch eine vielversprechende Möglichkeit dar, die Reichweite eines Fahrzeugs zu erhöhen. Die CTP-Technologie trägt dazu bei, die Leistungsdichte der Batteriepacks zu erhöhen.

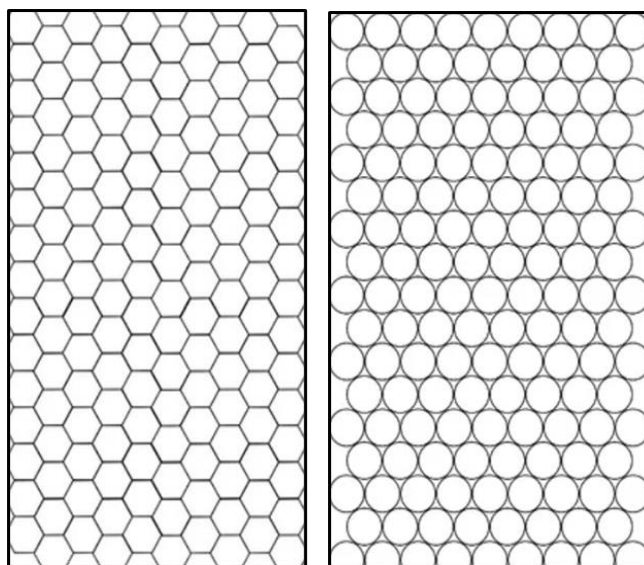


Abbildung 10: (Links)sechseckigen Hexagon-Zelle von BYD (rechts) Rundzellformat Ansicht von oben [7]

AP 5: Systematische Entwicklung von Geschäftsmodellen für die Kreislaufwirtschaft und Ableitung von Handlungsempfehlungen

Im Rahmen dieses Arbeitspakets erfolgt eine systematische Identifikation, Beschreibung und Bewertung von ökologisch orientierten Geschäftsmodellen sowie die Ableitung von Handlungsempfehlungen für die Gestaltung lebenszyklusorientierter bzw. grüner Batterien. Im Rahmen von UAP 5.3 (Erstellung von Handlungsempfehlungen) ist das IKTS involviert.

UAP 5.3 Ableitung von Handlungsempfehlungen

Die Erkenntnisse aus dem Projekt wurden genutzt, um Empfehlungen für die Entwicklung von Batterien zu geben, die sich an den verschiedenen Phasen ihres Lebenszyklus orientieren. Die Erkenntnisse wurden so aufbereitet, dass sie als Grundlage für Richtlinien dienen können. Die Empfehlungen wurden zunächst auf Basis technischer Ergebnisse entwickelt und anschließend innerhalb des Clusters abgestimmt. Dabei wurden auch die Ergebnisse anderer GreenBatt-Projekte berücksichtigt und bewertet. Die Ergebnisse können auch auf neue Batterietechnologien wie die Festkörperbatterie übertragen werden.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden Methoden und Werkzeuge aus dem modellbasierten Service Systems Engineering für ein Matching zwischen Gestaltungsoptionen für Batteriesysteme und darauf basierenden alternativen, zirkulären Geschäftsmodellen eingesetzt. In einem ersten Schritt erfolgte eine Analyse bestehender Geschäftsmodelle (Benchmark), um Bestandteile und Erfolgsfaktoren zu identifizieren. In der Folge wurden generische, zirkuläre Geschäftsmodelle im Sinne eines morphologischen Kastens erarbeitet, sodass eine Kombination verschiedener Geschäftsmodellbestandteile und Erfolgsfaktoren möglich ist. Die auf diese Weise generierten generischen Geschäftsmodelle wurden an die spezifischen Anforderungen hinsichtlich der Kreislaufführung der Batterie sowie der in diesem Kontext entwickelten Toolbox angepasst. Im Anschluss erfolgte eine detaillierte Ausarbeitung der Geschäftsmodelle hinsichtlich ihrer Marktfähigkeit, wobei insbesondere der Kundennutzen und die Wirtschaftlichkeit berücksichtigt wurden. Abschließend erfolgte eine Evaluierung der neu entwickelten Geschäftsmodelle. Die ökologische Beschreibung und Bewertung von Geschäftsmodellen erfolgt unter Zuhilfenahme von Ansätzen des Consequential Life Cycle Sustainability Assessment. Die Anwendung dieser Methode erlaubt eine umfassende ökologische Evaluierung von Geschäftsmodellen, sodass im Ergebnis diejenigen Geschäftsmodelle identifiziert werden können, die unter Berücksichtigung aller systemischen Aspekte die geringsten Umweltwirkungen aufweisen.

Das IKTS unterstützte die Projektpartner (Universität Bayreuth) bei der Formulierung der Handlungsempfehlungen für das Material- und Stoffrecycling, insbesondere auf Zellebene. Handlungsempfehlungen auf Zellebene sind sehr begrenzt, da Materialien im Sinne des Recyclings schwer zu ersetzen sind. Alternative Materialien greifen häufig zu stark in die Zellperformance ein, was die Akzeptanz bei den Batterieherstellern und Endanwendern erschwert.

Das Ziel der Handlungsempfehlung ist Identifizierung neuer Geschäftsmodelle zur Förderung der Kreislaufwirtschaft. Kreislaufwirtschaft bezieht sich auf die Schließung von Materialkreisläufen. Potenzielle Geschäftsmodelle zur Förderung der Kreislaufwirtschaft wurden identifiziert und im Kontext des nachhaltigen und wiederverwertbaren Batteriedesigns strukturiert. Ein beispielhaftes Geschäftsmodell für ein entwickeltes Batteriesystem beinhaltet ein recyclingfreundliches Design und Reparaturmöglichkeiten, wobei das Eigentum während der Nut-

zungsphase beim Hersteller verbleibt. Durch die Maximierung des Nutzens aus dem Recycling durch effizienten Prozess und die Minimierung der Reparaturkosten kann eine langfristige Nutzung der Batterien den Erfolg des Geschäftsmodelles garantieren.

Literaturverzeichnis

- [1] D. Handobukku **2010**. Tōkyō: Ōmusha
- [2] H. Pinegar, Y.R. Smith, J. Sustain. Metall. **2019**, 5, 402-416, DOI: 10.1007/s40831-019-00235-9
- [3] F. Larouche, F. Tedjar, K. Amouzegar, G. Houlachi, P. Bouchard, G.P. Demopoulos, K. Zaghbi, **2020**, 13, DOI: 10.3390/ma13030801 1. Zwischenbericht ReDesign 11
- [3] Reddy, Mogalahalli V.; Julien, Christian M.; Mauger, Alain; Zaghbi, Karim (2020): Sulfide and Oxide Inorganic Solid Electrolytes for All-Solid-State Li Batteries: A Review. In: *Nanomaterials (Basel, Switzerland)* 10 (8). DOI: 10.3390/nano10081606.
- [4] Zhang, Z.; Wang, X.; Li, X.; Zhao, J.; Liu, G.; Yu, W. et al. (2023): Review on composite solid electrolytes for solid-state lithium-ion batteries. In: *Materials Today Sustainability* 21, S. 100316. DOI: 10.1016/j.mtsust.2023.100316.
- [5] Ngai, Koh Sing; Ramesh, S.; Ramesh, K.; Juan, Joon Ching (2016): A review of polymer electrolytes: fundamental, approaches and applications. In: *Ionics* 22 (8), S. 1259–1279. DOI: 10.1007/s11581-016-1756-4.
- [6] Online verfügbar unter <https://www.auto-motor-und-sport.de/tech-zukunft/patent-batterie-eckige-rundzelle-byd/>.
- [7] Next Energy, Volume 1, Issue 2, June 2023, 100023

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Abrechnung Mittel wurde separat von Fraunhofer gestellt.

3. Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Während der Projektlaufzeit wurden bereits mehrere Veröffentlichungen in renommierten Zeitschriften erstellt und die Ergebnisse auf Konferenzen präsentiert (siehe Kapitel 5). Mehrere Projektanträge stützen sich auf die im Projekt konzipierte Zelldurchführung, die für die Integration von Zellsensorik und Referenzelektroden eingesetzt werden soll. Die Projekte umfassen das Thema „smarte Batterie“, durch den Einsatz der Zellsensorik und Referenzelektroden wird eine verlängerte Nutzungsdauer der Zellen angestrebt, da potenziell kritische Betriebszustände konsequent vermieden werden können. Die Bearbeitung dieses Themas hat ein Doktorand übernommen. Die ebenfalls als Teilergebnis dieses Projekts konzipierte Demontagefähigkeit / Recyclingfreundlichkeit der prismatischen Zelle diente als Grundlage für eine flexibel aufbaubare Aluminium-Ionen Zelle im Projekt „BALU“.

Wir planen weiterhin, auf Basis der Ergebnisse neue Forschungsprojekte zu initiieren und strategische Partnerschaften mit Industriepartnern einzugehen, um die Ergebnisse in marktfähige Produkte umzusetzen.

4. Während der Laufzeit bekannt gewordene, relevante Ergebnisse Dritter

Während der Laufzeit sind keine relevanten Ergebnisse Dritter bekannt geworden.

5. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Fachartikel

Lfd. Nr.	Autoren	Titel	Journal, Volume, Issue, Page	DOI	Datum
1	S. Hansen, T. Röther, M. Men-nenga, C. Helbig, G. Ohnemüller, F. Vysoudil, C. Wolf, B. Rosemann, S. Pavón, A. Michaelis, T. Vietor, F. Döpfer, C. Herrmann, M. Danzer	A structured approach for the compliance analysis of battery systems with regard to the new EU Battery Regulation	Full paper, Elsevier	10.1016/j.resconrec.2024.107752 Kadi4Mat ID: cd50e63a-3c3a-4d27-8334-2ac7ac60b670	08.06. 2024
2	F. Vysoudil, S. Hansen, M. Mennenga, M. Fukuda, G. Ohnemüller, T. Rüter, D. Goers, J. Koller, K. Nikolowski, B. Rosemann, M. Wolter, M. Danzer, F. Döpfer, C. Hermann, T. Vieter	Procedure Model to Support the Recycling-Oriented Design of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles	EcoDesign for Sustainable Products, Services and Social Systems I (pp.383-397)	10.1007/978-981-99-3818-6_26	2024

Konferenzbeiträge

Lfd. Nr.	Autoren	Titel	Typ (Poster, Präsentation)	Konferenz/Tagung	Datum
1	Sebastian Hippmann, C. Wolf, M. Fukuda, D. Goers, K. Nikolski, S. Pavón, M. Partsch, A. Michaelis	Design-for-Recycling principles for Li-ion battery cells with increased recyclability	Präsentation	ICBR 2022	15.09.2022
2	F. Vysoudil, S. Hansen, A. Dlugosch, C. Herrmann, T. Vietor	Potentials of design modifications to improve the recyclability of lithium ion batteries for mobile applications - An investigation to quantify recycling-oriented design guidelines by means of statistical entropy	Poster	IBPC 2022	
3	T. Rüter, C. Plank, M. Danzer	Reduction of battery module equivalent circuit models using a distribution of relaxation times analysis	Poster	ModVal 2022	
4	T. Rüter, M. Danzer	Study of inhomogeneities in different battery pack configurations for circular economy decisions	Poster	Batterieforum 2022	
5	G. Ohnemüller, B. Rosemann, J. Koller, F. Döpfer	ReDesign-Teilvorhaben Uni Bayreuth	Poster	IBPC 2021	