CIRCULUS

nachhaltiges Batteriesystem

Interdisziplinäre Entwicklung für die ganzheitliche Batteriesystemauslegung eines nachhaltigen Batteriesystems für die Energiewende und neue Geschäftsmodelle

Schlussbericht

Umicore AG & Co. KG

Version	Version1
Laufzeit des Vorhabens	01.09.2021 – 28.02.2025
Förderkennzeichen	03ETE035C
Verbreitung	Öffentlich
Projektleitung	Jens Hack
Telefon und E-Mail	Tel.: +4915126264687
	jens.hack@eu.umicore.com
Datum	27.08.2025

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

ptj Projektträger Jülich Forschungszentrum Jülich

Autoren:

Jens Hack

Hanau, 27.08.2025
Ort, Datum

Name

Inhaltsverzeichnis

I. Kurze Darstellung 6

I.1 Aufgabenstellung 6

I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde 8

I.3 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde 8

I.3.1 Bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte 8

I.3.2 Verwendeten Fachliteratur sowie benutze Informations- und Dokumentationsdienste 8

I.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 9

II. Eingehende Darstellung 10

II.1 Verwendung der Zuwendung /erzieltes Ergebnis 10

AP1 Anforderungen 10

AP2 Konzepte 10

AP6 End-of-Life-Management 14

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 18

II.3 Notwendigkeit der Angemessenheit der geleisteten Arbeit 18

II.4 Voraussichtlicher Nutzen 18

II.5 Fortschritt bei anderen Stellen 18

II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen 19

Abkürzungsverzeichnis

BMS Batterie-Management-System

EMS Energie-Management-System

I. Kurze Darstellung

Ziel des Forschungsprojekts CIRCULUS war die interdisziplinäre und kollaborative Entwicklung sowie der reale Aufbau eines wirtschaftlichen und ganzheitlich recyclingfähigen Lithium-Ionen-Energiespeichers für den mobilen Einsatz mit anschließender stationärer Nutzung. Dabei sollte eine Minimierung von Markt- und Umsetzungshemmnissen erreicht werden. Die Recyclingfähigkeit ging in diesem Vorhaben über den Stand der Technik hinaus: Neben der Rückgewinnung der Metalle wurde auch eine wirtschaftlich und technologisch sinnvolle Rückgewinnung der enthaltenen Kunststoffe angestrebt.

I.1 Aufgabenstellung

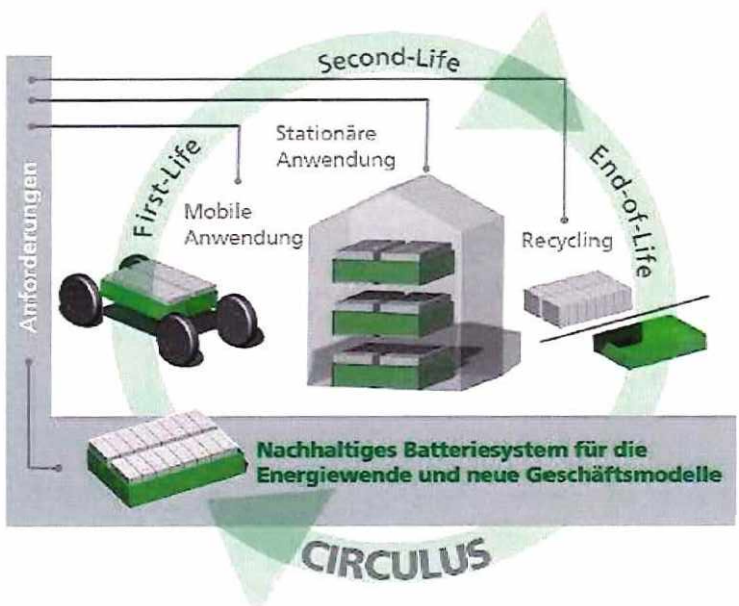

Abbildung 1: CIRCULUS Vorhaben

Für das CIRCULUS Gesamtziel „nachhaltiges Batteriesystem für die Energiewende und neue Geschäftsmodelle" wurden folgende Teilziele im Umicore Teilvorhabenadressiert:

- Der Umarbeitungsaufwand von mobil auf stationär sollte um 30 % reduziert werden
- Der Zerlege-Aufwand der zur Verfügung gestellten Batteriepacks am Ende des stationären Einsatzes sollte um 30 % reduziert werden.
- Der zeitliche und finanzielle Aufwand für die Sicherheitsbewertung sollte um 30 % reduziert werden.

- Die Rückführung der konstruktiven Kunststoffe in den Wertstoffkreislauf sollte um 80 % erhöht werden.

Zum Ende des Gesamt-Vorhabens sollten folgende wesentliche Projektergebnisse und funktionsfähige Realsysteme für Demonstrationszwecke mit einem TRL 6 zur Verfügung stehen:

1. Ein interdisziplinäres Konzept bzw. ein Handlungsleitfaden – vom Entwurf eines Batteriesystems *für eine zeitlich aufeinanderfolgende mobile und stationäre* Anwendung über die Bewertung der Funktionsfähigkeit und Sicherheit in der Erst- und Zweitnutzungsphase bis zur Rückgewinnung von Metallen und Kunststoffen im Recyclingprozess.
2. Ein Prototyp eines vermarktungsnahen Batteriesystems für einen virtuellen Fahrzeugdemonstrator.
3. Basierend auf dem Batteriesystem aus Punkt 2: Ein Prototyp eines vermarktungsnahen stationären Quartierspeichers aus gealterten Li-Ionen-Fahrzeugbatterien in einem Wohngebiet, um die regional (z. B. durch Photovoltaikanlagen) erzeugte Energie effizient und ressourcenschonend in der Region verfügbar zu halten.

Für das Vorhaben wurden marktübliche Li-Ionen-Zellen verwendet, um Markteintrittsbarrieren zu verringern und die Übertragbarkeit des Gesamtkonzepts für spätere und weitere Anwendungen sicherzustellen.

Liste der Arbeitspakete mit Beteiligung Umicores

AP-Nr.	**Erläuterungen**	**Beitrag Umicore**
1	Anforderungen	Detaillierte Anforderungen technischer und organisatorischer Natur, bezüglich Batteriedemontage, End-of-Life Management (Transport, Testung, Sicherheitsrisiken usw.) wurden definiert und ins Konsortium eingebracht
2	Konzepte	Bewertung der möglichen Batteriesysteme hinsichtlich Demontierbarkeit und Weiterverwendbarkeit.
6	End-of-Life-Management	Grundlegenge Analyse des Recyclingdemonstrators, sowie Referenzsystemen bezüglich der Kreislaufführung der Batteriemodulen. Wirtschaftliche, sowie technische Analysen, sowie Vergleiche der Sicherheit auf Modul- und Packebene.

I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Umicore war hauptsächlich im AP6 End-of-Life-Management aktiv. Die Themen waren: a) Reuse (Wiederverwendung in der gleichen Anwendung), b) 2nd-life (Weiterverwendung in einer anderen Anwendung) und c) Die Rückführung der Kunststoffe. Dabei wurden mehrere Demontagetests an marktrepräsentativen Batteriesystemen durchgeführt, einschließlich Massenbilanzierungen. Dabei sollten zuverlässige Aussagen entstehen, die zur Ableitung von Design-Vorschlägen führen, die letztlich zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit der Demontage- bzw. Reparaturprozessen von Batteriesystemen führen sollen.

I.3 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

I.3.1 Bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte

Die Batteriedemontage läuft größtenteils manuell ab, da eine hohe Varianz an Batteriesystemen, die momentan im Umlauf sind, eine Automatisierung erschwert. Der Stand der Technik kann hauptsächlich aus Umicores Batteriedemontage Arbeitsabläufen entnommen werden. Des Weiteren sind keine Konstruktionen oder Verfahren bekannt, die zur Anwendung hätten kommen.

I.3.2 Verwendeten Fachliteratur sowie benutze Informations- und Dokumentationsdienste

Die für die Umsetzung des Projekts CIRCULUS eingesetzte Expertise basierte ausschließlich auf den umfangreichen Erfahrungen der Umicore AG im Bereich der Batteriedemontage. Dabei griff das Unternehmen auf fundierte Erkenntnisse zurück, die im Rahmen des zuvor durchgeführten LiBri-Projekts (BMBF) und GHOST EU Projekts gewonnen worden waren. Diese Erfahrungen bildeten das Fundament für die Entwicklung effizienter Demontageprozesse und ermöglichten es, praxisnahe Anforderungen frühzeitig in die Projektplanung und -durchführung zu integrieren. Durch die enge Anbindung an reale industrielle Abläufe konnte das Projekt CIRCULUS von Beginn an auf erprobte Methoden, Verfahren und bewährtes Know-how zurückgreifen, was die Zielerreichung maßgeblich unterstützte.

I.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Projekt erfolgte keine Zusammenarbeit mit anderen Stellen, sondern es wurde nur mit den Konsortialpartnern zusammengearbeitet.

II. Eingehende Darstellung

II.1 Verwendung der Zuwendung /erzieltes Ergebnis

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Arbeitspakete (AP) mit Beteiligung der Umicore AG für das Gesamtprojekt zusammengefasst:

AP1 Anforderungen

Im Rahmen des Arbeitspakets 1 erarbeitete das Konsortium gemeinsam die Randbedingungen sowie die daraus resultierenden technischen und wirtschaftlichen Anforderungen an ein modulares Batteriesystem. Ziel war es, das System sowohl für mobile als auch für stationäre Anwendungen nutzbar zu machen und gleichzeitig ein effizientes Recycling der Metall- und Kunststoffkomponenten am Ende der Lebensdauer (End-of-Life, EoL) zu ermöglichen. Umicore konnte aktiv sämtliche Aspekte und Anforderungen bezüglich effizienter Kreislaufführung und Recycling von Lithium Ionen Batteriesystemen in die Anforderungsliste einfließen lassen. Die Grundlage für das zu entwickelnde nachhaltige Batteriesystem bildete eine umfassende Anforderungsliste, in der alle relevanten Daten gesammelt und strukturiert dokumentiert wurden. Die Anforderungen wurden dabei in verbindliche Sollgrößen und optionale Wunschgrößen unterteilt. Ein besonderer Schwerpunkt lag auf der Vereinheitlichung und Vereinfachung der thermischen, elektrischen und mechanischen Schnittstellen für beide Anwendungsbereiche. Darüber hinaus definierte das Konsortium die Anforderungen an die benötigten Batteriezellen. Diese Aufgabe erhielt eine hohe zeitliche Priorität, da die Zellen frühzeitig für Laborarbeiten zur Untersuchung der Zellalterung benötigt wurden.
Als Ergebnis entstand eine gemeinsame Anforderungsliste mit klar formulierten Soll- und Wunschgrößen. Zusätzlich wurden diese Größen konkret dargestellt und erläutert, um eine effiziente Kreislaufwirtschaft zu unterstützen.

AP2 Konzepte

Im Arbeitspaket 2 sollten Konzepte ausgearbeitet werden, die die in AP1 erarbeiteten Anforderungen berücksichtigen. Ziel war also die Bewertung der Entwürfe für die Entwicklung eines nachhaltigen Batteriesystems Der Meilenstein M1 ist zum 31. August 2022 abgeschlossen worden. Ziel war es zu diesem Meilenstein mindestens ein Konzept zu nominieren. Dieses

wurde erarbeitet mithilfe eines morphologischen Kastens (Abbildung 2), der im Konsortium *erarbeitet wurde.*

Bei der Konkretisierung und Auswahl der beiden Batteriekonzepte – Quartierspeicher und Mobiler Demonstrator – hat sich ergeben, dass die beiden Konzepte nicht absolut deckungsgleich ausgeführt werden können. Der Mobile Demonstrator setzt alle möglichen Punkte des Idealen Speichers, die sich aus dem Morphologischen Kasten (Abbildung 2) ergeben, um. Der Quartierspeicher setzt nur einen Teil der Punkte um, da für den reellen Einsatz einer Großbatterie – mit dem entsprechenden Gefahrenpotential – Komponenten verwendet werden müssen, die bereits ihre Eignung und Zuverlässigkeit bewiesen haben und somit die Betriebssicherheit und Funktion des Quartierspeichers sicherstellen.

Komponenten/Eigenschaften	Differenzierung	Lösung 1	Lösung 2	Lösung 3	Lösung 4	Lösung 5
Modulebene						
Zelle	Format	Rund		Prismatisch	Pouch	
	Bezeichnung/Abmessungen	18650	21700			
	Ort der Terminals	gleiche Seite	gegenüberliegende Seiten	Mantel ist ein Pol*		
	Kapazität [Ah]	2,5	3	3,5	4,0	5.0
	Chemie	NMC*	NCA	LFP		
Modul-Spannung, max [V]		unter 60	100	24		
Zellfixierung	Orientierung	Stehend	Liegend	über Kopf		
	Art	Gekapselt/vergossen	Cell2Pack/Retainer	überschrumpft	gekühlter Zellhalter (Funktionsintegration)	
	Material	Kunststoff*	Metall	Komposit	Elastomer	Klebstoff
Zellkontaktierung	Fügetechnologie	Widerstandsbuckel-schweißen	Laserschweißen	Bonden (Laserschweißen/Ultraschall)	Anpresskontaktierung	Schraubverbindung (Schraubensicherung nötig)
	Busbar (Verbinder) - Material	Stahl	Nickel	Kupfer	SigmaClad ("Sandwich-Bauweise")	Aluminium
Kühlung	Art	Flüssigkühlung	Luftkühlung	keine Kühlung	PCM	
	Isolationsmaterial	Gap Pads	Gap Filler	Gap Folien (aufgelegt, einseitig verklebt)	Heat Pipes	
	Art	Polkühlung	Mantelkühlung			
	Kühlmedium	Kühlmittel	Kältemittel	PCM	Luft	
Modulverschaltung						
	Kontaktierung "Power-Abgang"	Schraubverbingung Schraubdome	Steckverbindung Anderson-Stecker	Klemmung CDU-Stecker (Lamellen-Klemmung)	Nicht lösbar	
	Kontaktierung Modul-Modul-Verschaltung	ohne Toleranzkompensation Cu-Schiene	Toleranzkompensation Cu-Lamellen	Alu-Schiene	Stahl-Schiene	keine Kontaktierung (CelltoPack)
Temperaturmessung	Ort	Zellmantel	Zellpol	Zell-Areal (über Verbinderfläche) - über Einleger	Über Platine (Mittelabgriff)	
	Art	NTC	Infrarot*	Thermoelemente		
	Anzahl	3	4	keine	so viel wie nötig	
Mittelspannungsmessung		angelötete Litzen	Schweißpads	Federkontakt/Messerkontakt	Steckkontakt (Kabelschuh)	Niet
Modul-Gehäuse	Material	Kunststoff (Thermoplast, Duroplast, verstärk, nicht verstärkt, Sandwich)	Metal	Kunststoff-Metal-Mix		
	Teileanzahl	1	2	3	oder mehr	
	stapelbar	ja	nein			
	Wartung/Öffnung	möglich	nicht möglich			
	Verbindungsart der Teile	trennbar	nicht trennbar	trennbar und wiederverbindbar		
	Farbe	schwarz (elektr. Leitfähiger, weniger isolierend)	naturfarben			
	Flammschutz	Additivbeimischung bei Kunststoffen	Feuer-resistente Gap-Pads	Verguss	spez. Zellhalter (z.B. CaloryTech)	
	IP-Schutzklasse	IP 21 meist ausreichend für mobiele Anw.	IP6K9K für 2nd use sinnvoll (HV)			
	Hebepunkt	Module (Hebepunkte kenntlich gemacht)				

Abbildung 2: Morphologischer Kasten Batteriekonzepte

Es wurden somit zum Meilenstein M1 die im Folgenden beschriebenen zwei Demonstrator-Konzepte nominiert:

Konzept 1 - Quartierspeicher

Der Quartierspeicher umfasst insgesamt 32 Batterie-Module, die in drei eigenständigen Batterie-Blöcken zusammengefasst werden. Jeder Block besitzt ein komplettes Master-Slave BMS und ist auch unabhängig von den anderen Blöcken einsatzbereit. Einer der drei Master BMS übernimmt die Funktion eines Gateways, d.h. stellt die Schnittstelle zum übergeordneten EMS (Energie-Management-System) dar. Diese Gateway-Funktion wird im Rahmen des Circulus-Projektes von BMZ eigens zur Nutzung im Quartierspeicher entwickelt. In Vergangenheit hat BMZ hierzu eine komplexe und zusätzliche Steuereinheit eingesetzt (Abbildung 3). Die gesamten Funktionen dieser Steuereinheit sollen nun über einen der drei Master übernommen werden, was das System insgesamt kompakter und weniger komplex macht.

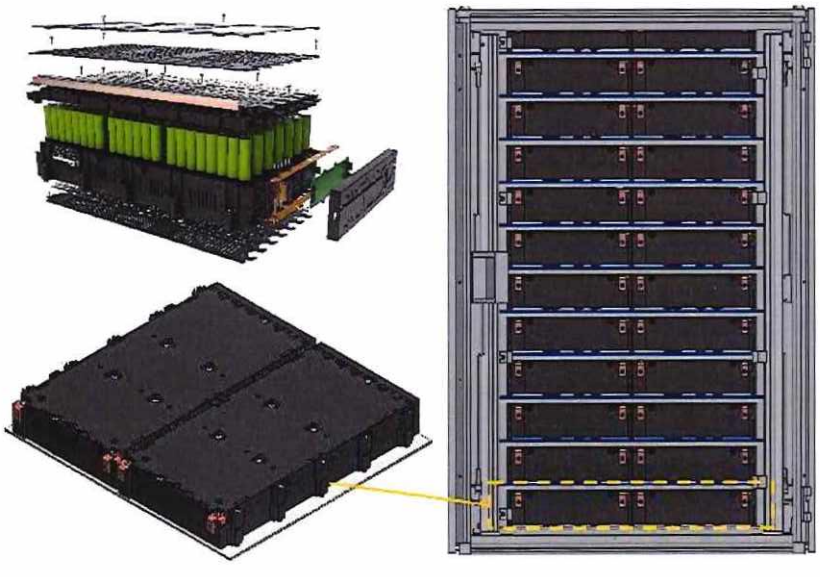

Abbildung 3: Batteriemodul (oben links) und Quartierspeicher

Konzept 2 – Mobiler Demonstrator

Der mobile Demonstrator (Abbildung 4) wird für das Circulus-Projekt mehrfach aufgebaut. So werden für die Erfüllung der LBF-Arbeitspakete eine Komplettbatterie des Referenzsystems und ein kompakter Ausschnitt dieses Systems als transportables Ausstellungsstück umgesetzt. Die Komplettbatterie dient – dem Projektziel entsprechend – der Beispiel-Demontage bei Umicore. Hier soll untersucht werden, inwiefern die Verbesserung z.B. der vereinfachten Demontage oder die geänderten Materialien, das Recycling vereinfachen bzw. verbessern. Der Aufbau der Teilbatterie, also einem Ausschnitt, soll, wie oben erwähnt mit dem Ausstellungsstück alle innovativen Ansätze des „Idealen Batteriesystems" für Dritte veranschaulichen.

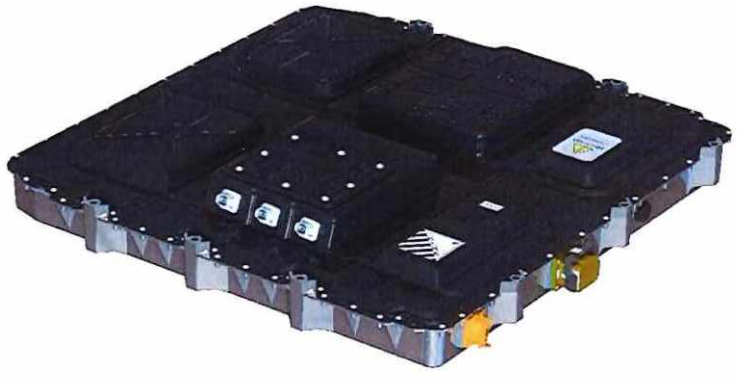

Abbildung 4: Mobiler Demonstrator

AP6 End-of-Life-Management

Für eine effiziente Kreislaufwirtschaft ist eine Demontage von (EoL-)Li-Ionen-Traktionsbatteriesystemen auf die kleinstmöglichen Einheiten anzustreben. Denn durch die Demontage lassen sich höchste Reinheitsgrade der einzelnen Batteriefraktionen erzielen. Zudem sind Recyclingprozesse ohne die Trennung von Fraktionen energieintensiver und erfordern eine größere Menge an Prozessschritten und Hilfsstoffen.
Nach heutigem Stand sind keine einheitlichen Bauformen von Batterien zu erwarten. So unterscheiden sich Batteriesysteme in Bauart, Zelltyp, Zellanordnung, Kühlsystem und Verbindungsstrukturen deutlich. Daher erfolgt deren Demontage momentan von Hand mit manuellen oder maschinellen Werkzeugen. Es müssen Verbindungen unterschiedlicher Art gelöst werden. Hierbei ist sicherzustellen, dass vorhandene elektrische Ladungen nicht zu Kurzschlüssen oder Beeinträchtigungen von Bauteilen bzw. Personen führen.

Im Rahmen des Arbeitspakets 6 wurden Demontagetests an zwei marktrepräsentativen Batteriesystemen durchgeführt, einschließlich Massenbilanzierungen. Die unterschiedlichen

Batteriekonstruktionen wurden dabei auf ihre sicherheitsrelevanten Merkmale, auf die Einfachheit der Separation und auf einen zerstörungsfreien Zugriff der einzelnen Komponenten analysiert. Die Ergebnisse wurden für die Erarbeitung technischer Lösungen des zu entwickelnden nachhaltigen Batteriesystems (AP2) verwendet.

Hierbei wurden auch die zeitlich aufwändigsten Schritte identifiziert. Diese sind in erster Linie die Zerlegung der Stacks und Trennung der Module (15% der Gesamtzeit), Abisolierung der Kontakte (15% der Gesamtzeit) sowie die Fraktionierung/Separation der einzelnen Materialien (14% der Gesamtzeit). Ohne die Module bestand in diesem Fall das Batteriesystem aus 94% Metall (91% Stahl, 1% Aluminium, 2% Kupfer) und 6% Kunststoff und Kompositmaterialien inkl. Elektronik.

Beim zweiten Batteriesystem, lag der Fokus zunächst auf der Zerlegung der Module bis zur Zellebene. Hierbei handelt es sich um ein System mit zylindrischen Zellen (Rundzellen), welche in sehr ähnlicher Form auch in den Prototypen zum Einsatz kommen sollen. Es ist zunächst festzustellen, dass dieser Zerlegeschritt allein mit mehr als vier Stunden pro Modul zu veranschlagen ist. Die einzelnen Zellen sind i.d.R. verklebt/ verschäumt und lassen sich kaum zerstörungsfrei trennen. Daher wird davon abgeraten, derartige verklebte Modulsysteme auf Zellebene zu zerlegen.

Als Zwischenergebnis wurden im Rahmen des AP6 weitere Ursachen für eine erschwerende Durchführung der Demontage identifiziert. Hierzu zählen: im System verklebte Module, außen verklebte Gehäuse, übertriebener Einsatz von Wärmeleitpasten oder eine nicht ausreichende Modularität (z.B. bei Cell-to-Pack Systemen). Alle gewonnenen projektrelevanten Erkenntnisse wurden mit den Projektpartnern geteilt.

Demontage Referenzsystem - Ergebnisse

Februar 2024 wurde das Referenzsystem, welches von BMZ zur Verfügung gestellt wurde, bis auf Modulebene demontiert und die einzelnen Arbeitsschritte analysiert.

Das Batterie-System ließ sich zerstörungsfrei und ohne besondere Gefährdung für eine geschulte Fachkraft bis auf die Modulebene zerlegen. Die gesamte Zerlegungszeit betrug etwa 80 Minuten und keiner der Arbeitsschritte war problembehaftet, wie es zum Beispiel bei Verklebungen der Fall gewesen wäre.

Eine zerstörungsfreie Demontage der Module auf Zellebene ließ sich nicht durchführen, insbesondere weil die Drahtbonden der Kontaktierungsplatten zu tief in die Zelle eingeschweißt sind. Diese Problematik wurde an BMZ weitergegeben, damit entsprechende Verbesserungen am mobilen Demonstrator vorgenommen werden konnten.

Demontage Recycling-Demonstrator - Ergebnisse

Im Juni 2024 wurde dann der Recycling-Demonstrator insbesondere hinsichtlich der Demontierbarkeit auf Zellebene untersucht.

Bei der Demontage des Recycling-Demonstrators war vor allem die Zerlegbarkeit von Modulebene auf Zellebene zentraler Untersuchungsgegenstand.

In Abbildung 5 ist rechts das Modul mit den neu konzipierten Zellverbindungen dargestellt. Diese Verbindungen konnten mithilfe einer Zange zerstörungsfrei von den Zellen entfernt werden, wodurch eine manuelle Demontage auf Zellebene möglich wurde. Die hierfür benötigte Zeit beträgt etwa 20 Minuten. Es besteht jedoch die Möglichkeit, die Demontagezeit von Modul auf Zelle auf etwa 5 Minuten zu verkürzen, wenn die Kontaktierungen in einem zusammenhängenden Element integriert wären. In diesem Fall könnte die gesamte Platte in einem Schritt abgezogen werden.

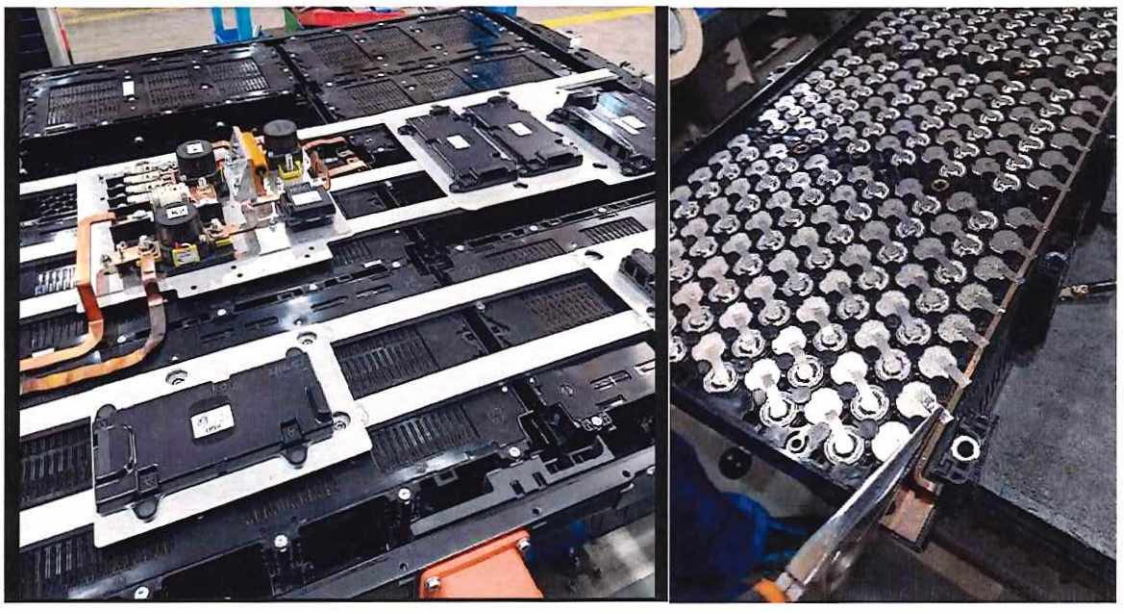

Abbildung 5: : Links: der Recycling-Demonstrator in der vom Fraunhofer LBF entwickelten Gehäusewanne. Rechts: das demontierte Modul mit den neu konstruierten Zellverbindungen

Die Demontagezeit des Demonstrators für eine sichere Zerlegung von Pack- auf Modulebene konnte durch die Umsetzung der folgenden Designmerkmale und -eigenschaften entscheidend reduziert werden:

- Demontagefreundliche Zellverbindungen
- Abnahme der Mittelspannung
- Demontagefreundliche Bodenwannenkonstruktion
- Lösbare Deckelverschraubungen

Durch folgende, weitere Verbesserungsvorschläge könnte die Demontagezeit weiter verringert werden:

- Reduktion der Schraubenanzahl (Modulverschraubung in der Bodenwanne)
- Verbesserung der Steckverbindung zu BMS und S-Box
- Integration von Hebepunkten an den Modulen

Durch diese Verbesserungen konnte der Zerlegeaufwand insgesamt um bis zu 38 % reduziert werden, somit ist das Teilziel von 30 % an Reduktion der Demontagezeit erreicht.

Die Demontagekosten von Lithium-Ionen-Traktionsbatterien werden hauptsächlich durch den hohen Aufwand an manuellen Zerlegetätigkeiten verursacht. Diese Kosten können zum einen durch die Verringerung des tatsächlichen Zeitaufwands reduziert werden, zum anderen durch Maßnahmen, die den Personalaufwand verringern. Diese könnten organisatorischer Natur sein, wie z.B. Verringerung von Rüstzeiten/ Wartezeiten, effizientere Transportwege und/oder Transporttechnologien, zum anderen durch (Teil-)Automatisierung der Demontage und Entladung bzw. einzelner Arbeitsschritte.

Deshalb wurden im Vorhaben die (rein technische) Anwendbarkeit von weiteren Trenntechnologien, wie Laserschneiden, Wasserstrahlschneiden oder Sägen untersucht.
Die Untersuchungen zeigen, dass keine der drei Technologien für sämtliche Batteriepacks designflexibel und vollumfänglich anwendbar ist. Für einzelne Teilaspekte erscheinen die Technologien jedoch anwendbar. Für einfache, gerade Schnitte durch dickes, heterogenes Material ist die Bandsäge anwendbar. Wasserstrahlschneiden erweist sich für diesen Teilaspekt als technisch nicht geeignet, da der Wasserstrahl für Schnitte durch komplexe Bauformen (sich ändernde Materialquerschnitte und Materialzusammensetzungen längs des Schnittes) ungeeignet ist. Bei einem Laserschneidprozess wäre der Laser an verschiedene Bauformen adaptierbar, jedoch wäre der Energieaufwand für sehr dicke Materialquerschnitte exorbitant hoch.
Für komplexe Schneidaufgaben, die keine oder nicht ausschließlich gerade Schnitte erfordern, wie z.B. das gezielte „ausschneiden" von Bauteilen, wie Module, Zellen, Schrauben etc. sind Wasserstrahl und Laserschneidverfahren geeignet, jedoch keine Bandsäge. Auch hier jedoch mit den o.g. Einschränkungen bzgl. komplexer Schnittprofile.
Mit keiner der untersuchten Demontage-/ Schneidtechnologien gelingt es, eine designflexible Reduzierung der Demontagekosten unter den aktuellen technischen Rahmenbedingungen zu erzielen. Darüber hinaus führen die hohen Investitionskosten für Laser- und

Wasserstrahlschneidtechnologien sowie die bestehenden Sicherheitsrisiken während des Schneidprozesses bei allen Varianten dazu, dass der Einsatz dieser Technologien weder ökonomisch noch praktisch vertretbar ist.

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Tabelle 1: Schlusskalkulation gemäß Verwendungsnachweis. Quelle: Eigene Darstellung.

1	2	3	4
Position Gesamtvor-kalkulation	**Entstandene Kosten** insgesamt bis einschl. 2025	**Anerkannte Kosten** insgesamt bis einschl. 2025	**Gesamtvorkalkulation**
0813	463,07		5.000,00
0823	0,00		0,00
0837	213.119,48		224.919,34
0838	778,53		1.700,00
0847	0,00		0,00
0848	0,00		0,00
0850	0,00		0,00
0856	0,00		0,00
0860	0,00		0,00
Summe:	214.361,08		231.619,34

II.3 Notwendigkeit der Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Teilvorhaben durchgeführten Arbeiten sowie die dafür aufgewandten Ressourcen waren notwendig und angemessen. Sie entsprachen der im Projektantrag formulierten Planung. Alle wesentlichen im Arbeitsplan formulierten Aufgaben wurden erfolgreich bearbeitet. Darüber hinaus waren keine zusätzlichen Ressourcen für das Projekt notwendig.

II.4 Voraussichtlicher Nutzen

Siehe Erfolgskontrollbericht.

II.5 Fortschritt bei anderen Stellen

Dem Zuwendungsempfänger sind, während und nach der Projektlaufzeit, keine Fortschritte auf dem Gebiet von CIRCULUS bei anderen Stellen bekannt.

II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Es erfolgten keine Veröffentlichungen zum Vorhaben CIRCULUS durch die Umicore AG & Co. KG