



CIRCULUS

nachhaltiges Batteriesystem

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

Schlussbericht

Fraunhofer LBF

Version	V3
Laufzeit des Vorhabens	01.09.2021 – 28.02.2025
Förderkennzeichen	03ETE035A
Verbreitung	Öffentlich
Projektleitung	Eva-Maria Stelter
Telefon und E-Mail	Tel.: +49 6151 705-8265 eva-maria.stelter@lbf.fraunhofer.de
Datum	07.07.2024

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Autoren:

Eva-Maria Stelter

Dominik Spancken

Abteilungsleiter
Marc Wallmichrath

Projektleiterin
Eva-Maria Stelter

Inhaltsverzeichnis

I.	Kurze Darstellung	6
I.1	Aufgabenstellung	6
I.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	7
I.3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	8
I.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	12
I.4.1	Bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte	12
I.4.2	Verwendeten Fachliteratur sowie benutzte Informations- und Dokumentationsdienste	12
I.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	21
II.	Eingehende Darstellung	22
II.1	Verwendung der Zuwendung /erzieltes Ergebnis	22
II.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	40
II.3	Notwendigkeit der Angemessenheit der geleisteten Arbeit	40
II.4	Voraussichtlicher Nutzen	40
II.5	Fortschritt bei anderen Stellen	40
II.6	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen	45

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung des CIRCULUS Vorhabens.....	7
Abbildung 2: CIRCULUS Arbeitspakete.....	8
Abbildung 3: Zusammenarbeit mit den jeweiligen beteiligten Partnern im Vorhaben	9
Abbildung 4: E-Go Traktionsbatterie (Vogel Communications Group, 2021).....	12
Abbildung 5: CAD-Modell des mobilen Demonstrators für Messen.....	24
Abbildung 6: Konstruktionsvarianten Bodenbereich. Oben links: globale Modulbefestigung (Platte). Oben rechts: Variante der globalen Modulbefestigung (Platte). Unten: Ausgewählte lokale Lösung.	26
Abbildung 7: Konstruktionsvarianten Flanschbereich. links: Lokale Befestigung. Rechts: Globale Befestigung.	26
Abbildung 8: Konstruktionsvarianten Seitenwänden zur Fahrzeuganbindung. links: metallische Winkelanbindung/Bänder. Rechts: Verstärkung der Decklage und dem Kern.....	27
Abbildung 9: Vollständiges FE-Modell (links) und reduzierte Darstellung des FE-Modells ohne Batteriehaube (rechts)	28
Abbildung 10: Schematischer Schichtaufbau des Batteriewannenkerns in 4-lagiger Ausführung	28
Abbildung 11: Verschiebung des Batteriewannenkerns (4-lagiges FE-Modell) in mm, Verformungsfaktor: 1	29
Abbildung 12: Spannung nach Mises des Batteriewannenkerns (4-lagiges FE-Modell) in MPa, Verformungsfaktor: 1	29
Abbildung 13: Komponentenfertigung der Wanne für den Messe-Demonstrator	30
Abbildung 14: Komponentenfertigung der Wanne für den Recycling-Demonstrator.....	31
Abbildung 15: Fertigungsanlage am LBF für die Organosheets, Imprägnierwerkzeug (links) und Kalander (rechts)	32
Abbildung 16: CIRCULUS Messe-Demonstrator	33
Abbildung 17: Recycling-Demonstrator	33
Abbildung 18: Screenshot der CIRCULUS Projektseite.....	37
Abbildung 19: Filmdreh auf dem Batterieprüfstand des Fraunhofer LBF.....	38

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Projektablauf.....	11
-------------------------------	----

Abkürzungsverzeichnis

2nd-Life Weiterverwendung in einer
anderen Anwendung
AP Arbeitspaket
BMS Batterie-Management-System
CAD Computer Aided Design (Deutsch:
computergestütztes Erstellen von
geometrischen Konstruktionen
EMS Energie-Management-System
EoL End of Life

FE Finite-Elemente
KI Künstliche Intelligenz
Li Lithium
M Meilenstein
OEM Original Equipment Manufacturer,
Erstausrüster
PCR Post Consumer Recyclat
TAP Teilarbeitspaket

I. Kurze Darstellung

Teile dieses Kapitels entsprechen Auszügen der Vorhabensbeschreibung.

I.1 Aufgabenstellung

Im Rahmen des Vorhabens *CIRCULUS - Interdisziplinäre Entwicklung für die ganzheitliche Batteriesystemauslegung eines nachhaltigen Batteriesystems für die Energiewende und neue Geschäftsmodelle* (Abbildung 1) wurde ein wirtschaftlicher und ganzheitlich recyclingfähiger Lithium-Ionen (Li-Ionen) -Energiespeicher für den mobilen und anschließenden stationären Einsatz interdisziplinär und kollaborativ entwickelt und aufgebaut. Darüber hinaus wurden neue Geschäftsmodelle analysiert, um eine Minimierung von Markt- und Umsetzungshemmnissen zu erzielen. Die Recyclingfähigkeit sollte in diesem Vorhaben über den aktuellen Stand der Technik bei der Rückgewinnung der Metalle hinausgehen und für die enthaltenden Kunststoffe eine Rückgewinnung wirtschaftlich und technologisch darstellen.

Das Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF war in diesem Vorhaben Konsortialführer und leitete die Arbeitspakete AP1 Anforderungen, AP7 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und AP8 Veröffentlichungen/Verwertung. Maßgebliche fachliche Arbeiten des LBF waren die Auslegung, Konstruktion und Fertigung der nachhaltigen Batteriewanne und der mechanischen Befestigung der Wanne zum Fahrzeug, der Module in der Wanne und die Deckelbefestigung. Der CIRCULUS Messe-Demonstrator wurde durch das LBF aufgebaut. Darüber hinaus wurde das Material für die Kunststoff-Recyclinganalysen gefertigt und im Rahmen vom AP7 wurden Experteninterviews geführt und ausgewertet.

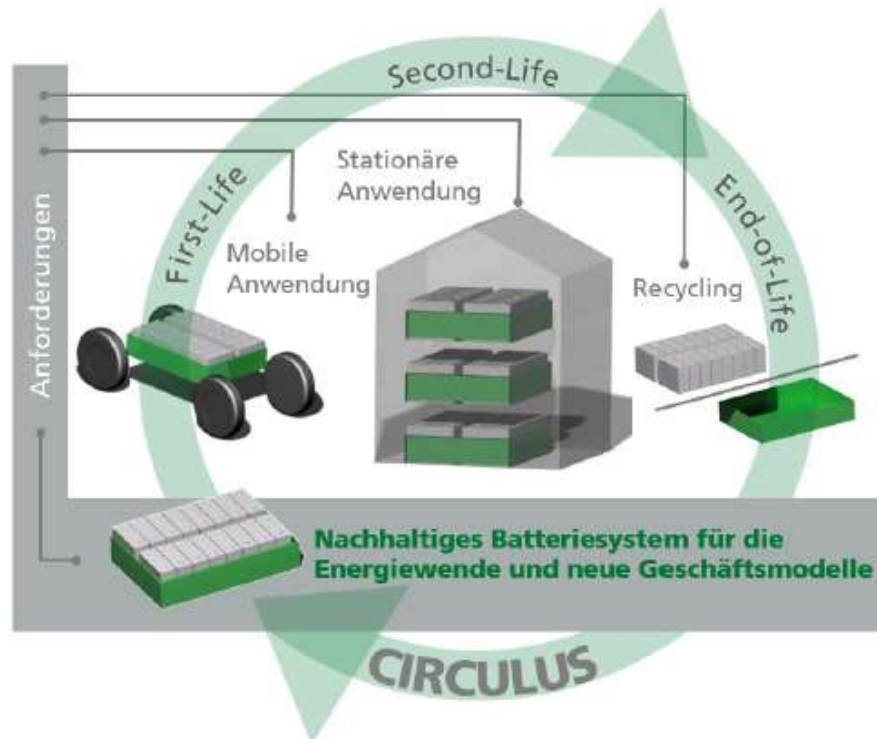


Abbildung 1: Darstellung des CIRCULUS Vorhabens

I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Fraunhofer LBF beschäftigt sich seit Jahrzehnten erfolgreich mit der Bemessung und Bewertung von zyklisch beanspruchten Bauteilen für alle Bereiche des Automobil- und Maschinenbaus. Kernkompetenzen liegen in der numerischen und experimentellen Betriebsfestigkeit, der Adaptronik und Systemzuverlässigkeit sowie auf dem Gebiet der Kunststoffe, u.a. recyclingfähige Kunststoffe. Das LBF verfügt über eine mehr als fünfzehnjährige Erfahrung in der Entwicklung von Batterien für die Elektromobilität. Die beiden Vorhaben Fraunhofer Systemforschung zur Elektromobilität (FSEMI 2009-2011, FSEMII 2013-2015) beschäftigten sich zum einen mit der crashsicheren und für die Fahrdynamik optimalen Positionierung der Traktionsbatterie im Fahrzeug. In den abgeschlossenen EU-Vorhaben SmartBatt (2010-2012), und OPTEMUS (2015-2019), GHOST (2017-2021) und SEABAT (2021-2025) hat sich das Fraunhofer LBF mit dem optimalen mechanischen Design von Batteriesystemen für unterschiedliche Fahrzeuganwendungen beschäftigt.

Weder Zweitnutzung noch Recycling wurde in den oben genannten Vorhaben ausreichend in der Systemkonstruktion berücksichtigt, damit diese einerseits einen schnellen wirtschaftlichen

Einsatz als stationäre Energiespeicher vorsehen und andererseits durch reversible Füge-technologien die Sekundärgewinnung der metallischen und auf Kunststoff basierenden Rohstoffen überhaupt wirtschaftlich ermöglichen. Dieser Ansatz wurde in CIRCULUS vertieft untersucht und umgesetzt.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben war für eine Laufzeit von drei Jahren geplant, startete am 01.09.2021 und wurde um zusätzliche 6 Monate kostenneutral verlängert. Es gliederte sich in folgende Abschnitte und Arbeitspakete (Abbildung 2):

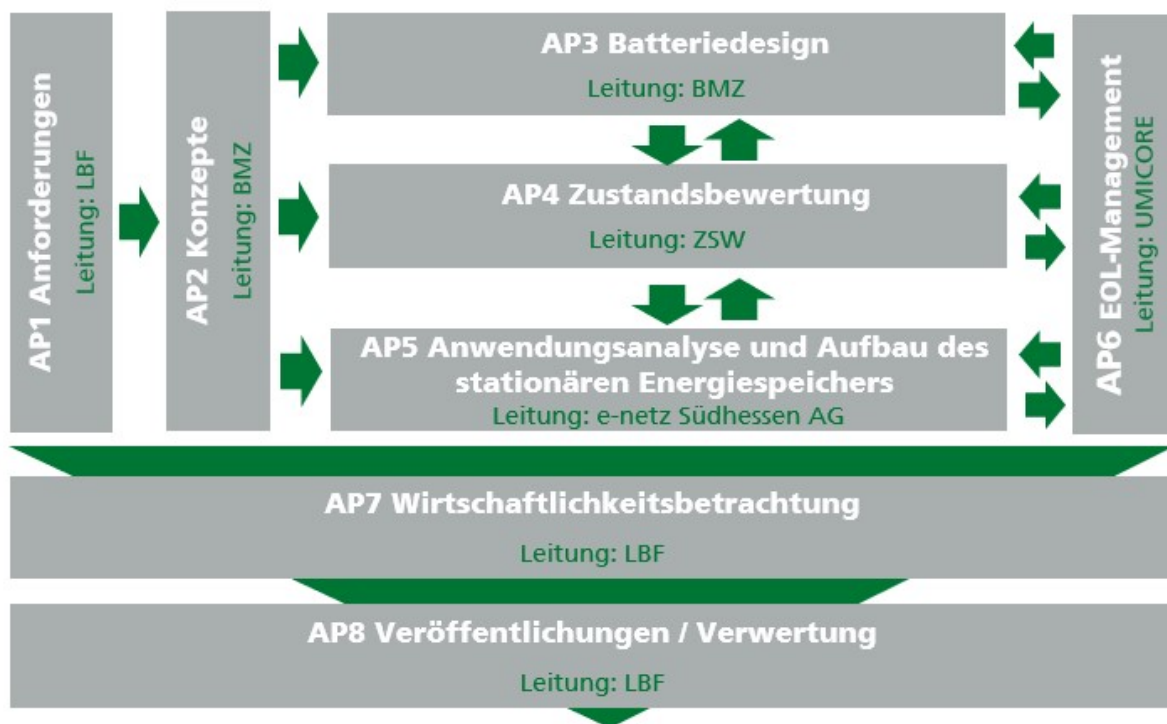


Abbildung 2: CIRCULUS Arbeitspakete

Das Fraunhofer LBF hatte die Konsortialführung inne und leitete die Arbeitspakete 1, 7 und 8. Die Zusammenarbeit mit den jeweiligen beteiligten Partnern im Vorhaben ist in Abbildung 3 dargestellt. Das Konsortium mit ihren jeweiligen Arbeitsschwerpunkten (Teilvorhaben) gliederte sich wie folgt:

- Teilvorhaben BMZ GmbH: Nachhaltiges mobiles und stationäres Batteriesystem

- Teilvorhaben e-netz Süd Hessen AG: Nachhaltiges stationäres Batteriesystem
- Teilvorhaben Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW): Nachhaltige Alterungsanalyse
- Teilvorhaben Umicore AG Co. KG: Nachhaltiges End-of-Life-Management
- Teilvorhaben MC Services Nordhessen GmbH: Nachhaltiges Kunststoffrecycling von Batteriesystemen
- Teilvorhaben Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF: Nachhaltiges Batteriegehäuse

Das Gesamtvorhaben gliederte sich wie in Abbildung 3 in 8 Arbeitspakete, in denen entsprechend die Zusammenarbeit entsprechend der jeweiligen Arbeitsschwerpunkten stattgefunden hat.

Arbeitspaket (AP) [Leitung] Teilarbeitspakete (TAP)	BMZ	e-netz	ZSW	Umicore	MC	LBF
AP1 Anforderungen [LBF]						
AP2 Konzepte [BMZ]						
AP3 Batteriedesign [BMZ]						
AP4 Zustandsbewertung [ZSW]						
AP5 Anwendungsanalyse und Aufbau des stationären Energiespeichers [e-netz]						
AP6 End-of-life-Management [Umicore]						
AP7 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung [LBF]						
AP8 Veröffentlichungen/ Verwertung [LBF]						

Abbildung 3: Zusammenarbeit mit den jeweiligen beteiligten Partnern im Vorhaben

Es haben regelmäßig Onlinebesprechungen stattgefunden, um den aktuellen Stand der Arbeiten und das weitere Vorgehen im gesamten Konsortium zu besprechen. Darüber hinaus

fanden arbeitspaketweise und auch teilarbeitspaketweise, Online oder Präsenz- Besprechungen statt, um spezifische technische und fachliche Dinge abzustimmen. Das gesamte Konsortium hat sich alle 6 Monate, inklusive Projektträger, zu einem gemeinschaftlichen und, nach abklingen der Pandemie, vornehmlich persönlichen Treffen bei einem der Projektpartner eingefunden und den aktuellen Stand der Arbeiten und das weitere Vorgehen in Präsentationen vorgestellt und besprochen.

Der zeitliche Ablauf des Vorhabens ist in Tabelle 1 dargestellt. Der erste Projektabschnitt schloss mit Meilenstein 1 (M1) ab und hatte als Ergebnis ein finales Batterie-Konzept. Im zweiten Projektabschnitt wurde das Konzept detailliert und final ausgearbeitet. Hier entstanden auf virtueller Basis u.a. CAD-Modelle auf Komponenten und Systemebene. Mit M2 wurde der zweite Projektabschnitt durch Abschluss der konstruktiven Arbeiten erreicht. Wobei dieser Meilenstein im Projektverlauf in Absprache mit dem Projektträger in zwei Untermeilensteine aufgeteilt wurde:

- M2.1 „Konstruktive Arbeiten abgeschlossen, CAD-Konstruktion“,
- M2.2 „Konstruktive Arbeiten abgeschlossen, Hardware mobile Demonstratoren aufgebaut“.

Der dritte und letzte Meilenstein M3 umfasste die erfolgreiche Inbetriebnahme des stationären Realdemonstrators.

Das Verbundvorhaben CIRCULUS erreichte alle definierten Meilensteine wie folgt.

M1 „Konzept liegt vor“ im August 2022,

M2.1 „Konstruktive Arbeiten abgeschlossen, CAD-Konstruktion“ im August 2023,

M2.2 „Konstruktive Arbeiten abgeschlossen, Hardware mobile Demonstratoren aufgebaut“ im Juni 2024,

M3 „Quartierspeicher in Betrieb“ am 01/25.

Das Vorhaben wurde erfolgreich am 28.02.2025 abgeschlossen.

Tabelle 1: Projekttablauf

Zeitplan	Jahr 1				Jahr 2				Jahr 3				Kostenneutrale Verlängerung	
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2
Von	09/21	12/21	03/22	06/22	09/22	12/22	03/23	06/23	09/23	12/23	03/24	06/24	09/24	12/24
Bis	11/21	02/22	05/21	08/22	11/22	02/23	05/23	08/23	11/23	02/24	05/24	08/24	11/24	02/25
AP1 Anforderungen														
AP2 Konzepte														
AP3 Design														
AP4 Zustandsbewertung														
AP5 stationärer Energiespeicher														
AP6 EoL														
AP7 Wirtschaftlichkeit														
AP8 Veröffentl./ Verwertung														
Meilensteine														
Konzept liegt vor - erfüllt				M1										
Konstruktive Arbeiten abgeschlossen, CAD Konstruktion - erfüllt								M2.1						
Konstruktive Arbeiten abgeschlossen, Hardware mobile Demonstratoren aufgebaut - erfüllt											M2.2			
Quartierspeicher in Betrieb - erfüllt													M3	

I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

I.4.1 Bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte

Für das Teilvorhaben vom Fraunhofer LBF und auch für das Gesamtvorhaben wurde die E-Go Traktionsbatterie als technische Referenz festgelegt (Abbildung 4).



Abbildung 4: E-Go Traktionsbatterie (Vogel Communications Group, 2021)

Des Weiteren wurde für die Herstellung des nachhaltigen CIRCULUS Batteriegehäuses das Handlaminierverfahren eingesetzt. Das Verfahren wurde aufgrund der geringen Stückzahl eingesetzt, es ist allerdings übertragbar und großserientauglich mittels In-Situ Verfahren herstellbar (Weidmann, 2020).

I.4.2 Verwendeten Fachliteratur sowie benutzte Informations- und Dokumentationsdienste

Folgende Fachliteratur, sowie Informations- und Dokumentationsdienste, wurden im Vorhaben verwendet:

Abschlussbericht Verbundprojekt „MORE“, FKZ: 03X4622. (2014). TIB.

Aluminium Insider. (03 2021). *Aluminium Extrusions Are Winning The Race For Battery Enclosure In EVs*. Von <https://aluminiuminsider.com/aluminium-extrusions-are-winning-the-race-for-battery-enclosure-in-evs/> abgerufen

Schlussbericht (Fraunhofer LBF)

Version V3 vom 07.07.2024

- Aluminium Insider. (03 2021). *Novelis Develops New Aluminium Sheet Battery Enclosure Tailored For Electric Vehicles*. Von <https://aluminiuminsider.com/novelis-develops-new-aluminium-sheet-battery-enclosure-tailored-for-electric-vehicles/> abgerufen
- ArcelorMittal. (17. 04 2025). *S-in motion® Battery Pack for BEV*. Von https://automotive.arcelormittal.com/s-in_motion_solutions/battery_pack abgerufen
- Arora, S., & Kapoor, A. (2018). Mechanical Design and Packaging of Battery Packs for Electric Vehicles. In G. Pistoia, & B. Liaw (Hrsg.), *Behaviour of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles* (S. 175-200). Springer International Publishing.
- Bargel, H.-J., & Schulze, G. (2004). *Werkstoffkunde*. Heidelberg: Springer.
- Bauer, M., Wachtler, M., Stöwe, H., Persson, J., & Danzer, M. A. (2016). Understanding the dilation and dilation relaxation behavior of graphite-based lithium-ion cells. *Journal of Power Sources*.
- Bauer, S. (2017). *AkkuWelt*. Würzburg: Vogel Business Media.
- Baumeister, J. e. (2013). Applications of aluminium hybrid foam sandwiches in battery housings for electric vehicles. *International Conference on Porous Metals and Metallic Foams technology, "Metfoam 2013"; North Carolina, USA*.
- Bitzer, B., & Gruhle, A. (2014). A new method for detecting lithium plating by measuring the cell thickness. *Journal of Power Sources*.
- Bosch. (01. 05 2020). *Neue Hybrid-Batterie von Bosch – Erfolgsrezept mit 48 Volt*. Von <https://www.bosch-presse.de/pressportal/de/de/neue-hybrid-batterie-von-bosch-%E2%80%93-erfolgsrezept-mit-48-volt-129984.htm> abgerufen
- Bozorgchenan, M. e. (2022). Experimental Confirmation of C-Rate Dependent Minima Shifts in Arrhenius Plots of Li-Ion Battery Aging. *Journal of The Electrochemical Society*(Volume 169, Number 3).
- Broussely, M. e. (2001). Aging mechanism in Li ion cells and calendar life predictions. *Journal of Power Sources Volumes 97-98*, S. 13-21.
doi:[https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)00722-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00722-4)
- Budde-Meiwes, H. e. (19. April 2013). A review of current automotive battery technology and future prospects. (DOI 10.1177/0954407013485567).
- Bundesverband Energiespeicher e.V. (BVES). (2016). *Leitfaden Rahmenanforderungen Lithium-Ionen Großspeicher*.
- Bundesverband Energiespeicher Systeme e.V (BVES). (2021). *Vorbeugender und abwehrender Brandschutz bei Lithium-Ionen Großspeichersystemen*. Berlin: BVES.

- Burns, J. e. (2015). In-Situ Detection of Lithium Plating Using High Precision Coulometry. *Journal of The Electrochemical Society Volume 162, Number 6, S. A959–A964.*
doi:<https://doi.org/10.1149/2.0621506jes>
- CIRCULUS. (2021). *CIRCULUS-Sachbericht_M1-M6_final.pdf.*
- CIRCULUS. (2022). *CIRCULUS-Halbjahrestreffen-Protokoll_final.pdf.*
- CIRCULUS. (Version vom 31.03.2021). *Interdisziplinäre Entwicklung für die ganzheitliche Batteriesystemauslegung eines nachhaltigen Batteriesystems für die Energiewende und neue Geschäftsmodelle, Gesamtvorhabenbeschreibung.*
- CleanTechnica. (März 2021). *History Of Electric Cars Using Skateboard Platforms.* Von <https://cleantechnica.com/2020/06/19/history-of-electric-cars-using-skateboard-platforms/> abgerufen
- Composites World. (März 2021). *Onboard protection: Tough battery enclosure.* Von <https://www.compositesworld.com/articles/onboard-protection-tough-battery-enclosure> abgerufen
- Covestro. (01. Mai 2020). *Creating a sturdy EV battery housing with Makroblend.* Von <https://solutions.covestro.com/en/highlights/articles/cases/2019/alta-motors> abgerufen
- Covestro. (01. Mai 2020). *Kunststoffabfälle sinnvoll nutzen.* Von <https://solutions.covestro.com/de/highlights/artikel/stories/2019/polycarbonat-aus-recyclen-kunststoffen> abgerufen
- Covestro. (März 2021). *Bayblend® PC+ABS blend drives efficient li-ion cell assembly.* Von <https://solutions.covestro.com/en/highlights/articles/cases/2020/li-ion-battery-cell-holder> abgerufen
- Covestro. (März 2021). *EV Battery.* Von <https://www.lp.covestro.com/en/battery-packaging> abgerufen
- Department of Chemistry, D. o. (2022). *Low-Voltage Operation and Lithium Bis(fluorosulfonyl)imide Electrolyte Salt Enable Long Li-Ion Cell Lifetimes at 85 °C.* Halifax, Canada: Journal of The Electrochemical Society.
- Department of Mechanical and Nuclear Engineering and Electrochemical Engine Center (ECEC), The Pennsylvania State University. (2018). *Understanding the trilemma of fast charging, energy density and cycle life of lithium-ion batteries.* University Park, Pennsylvania, USA: Elsevier, Journal of Power Sources.
- Ecker, M. e. (2014). Calendar and cycle life study of Li(NiMnCo)O₂-based 18650 lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources Volume 248, S. 839-851.*
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.09.143>

- Ecobat. (17. April 2024). *Seculene PP aus Sekundärmaterialien*. Von <https://ecobatgroup.com/ecobatgroup-de/products/polypropylene.php> abgerufen
- EDAG Group. (2023). *LEICHTBAU-BATTERIEGEHÄUSE: SICHER & LANGLEBIG*. Wiesbaden/Paris: <https://www.edag.com/de/edag-group/presse/pressemeldung/leichtbau-batteriegehaeuse-sicher-langlebig>.
- Erlos WP Holding. (17. 04 2025). *iSLE-Projekt*. Abgerufen am 19. 01. 2024 von https://www.wphgroup.de/ERLOS/index.php/?focus=STRATP_cm4all_com_widgets_News_43053271&path=?m=d&a=20230102114025-3950&cp=1
- Feinauer, M. e. (2024). Temperature-driven path dependence in Li-ion battery cyclic aging. *Journal of Power Sources, Volume 594*(28.02.2024).
- FENECON GLS Crowd. (19. Juli 2023). Von GLS Crowd: <https://www.gls-crowd.de/projekte/fenecon-in-stromspeicher-und-energiewende-investieren/> abgerufen
- FENECON. (19. Juli 2023). Von CarBatteryReFactory: <https://fenecon.de/carbatteryrefactory/> abgerufen
- FENECON. (19. Juli 2023). *CarBatteryReFactory*. Von <https://fenecon.de/carbatteryrefactory/> abgerufen
- FENECON. (19. Juli 2023). *GLS Crowdfunding GmbH*. Von <https://www.gls-crowd.de/projekte/fenecon-in-stromspeicher-und-energiewende-investieren/> abgerufen
- Fleischhammer, M., Waldmann, T., Bisle, G., Hogg, B.-I., & Wohlfahrt-Mehrens, M. (2015). Interaction of cyclic ageing at high-rate and low temperatures and safety in lithium-ion batteries. *J. Power Sources. 274*, S. 432–439. doi:10.1016/j.jpowsour.2014.08.135
- Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA). (04. 17 2025). <https://www.ipa.fraunhofer.de/de/referenzprojekte/DeMoBat.html>. Abgerufen am 08. Juli 2022
- Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU). (2023). *Ein zweites Leben für Batterie, Getriebe und Zahnräder*. <https://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2023/januar-2023/ein-zweites-leben-fuer-batterie-getriebe-und-zahnraeder.html>.
- Ghanbari, N. e. (2016). Inhomogeneous Degradation of Graphite Anodes in Li-Ion Cells: A Postmortem Study Using Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy. *The Journal of Physical Chemistry Volume 120*, S. 22225–22234. doi:<https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b07117>

- Ghanbari, N., Waldmann, T., Kasper, M., Axmann, P., & Wohlfahrt-Mehrens, M. (2015). Detection of Li Deposition by Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy in Post-Mortem Analysis. *ECS Electrochem. Lett.* 4, S. A100–A102.
doi:10.1149/2.0041509eel
- Hanser automotive. (15. Juli 2022). https://www.hanser-automotive.de/a/article-358170?etcc_cmp=Newsletter+HA-News&etcc_med=Newsletter&sc_src=email_3423137&sc_lid=206169718&sc_llid=1817&sc_uid=2BQ2wLliix&sc_eh=.
- Haslinger, R. (2023). 2nd- Life-Batterien als multifunktionale Stromspeicher. Dynamischer Markt für gebrauchte Li-thium-Ionen-Batterien. *np, Heft 11-12*.
- Henkel. (März 2021). *Henkel and Covestro to combine their strengths to promote e-mobility/Adhesive solutions for efficient Li-ion cell assembly*. Von <https://www.henkel.com/press-and-media/press-releases-and-kits/2020-03-02-adhesive-solutions-for-efficient-li-ion-cell-assembly-1040098> abgerufen
- Hirtz, E., Käsgen, J., Pleiteit, H., Eckardt, B., & Möller, R. (2014). Auslegungs- und Absicherungsprozess im Fokus der Elektromobilität – Herausforderungen der Betriebsfestigkeit. *DVM Tagung 2014, Ingolstadt*.
- Hogg, B.-I., Waldmann, T., & Wohlfahrt-Mehrens, M. (2020). 4-Electrode Full Cells for Operando Li⁺ Activity Measurements and Prevention of Li Deposition in Li-Ion Cells. *J. Electrochem. Soc.* 167 090525. doi:10.1149/1945-7111/ab8976
- Höhne, K., & Hirtz, E. (2013). With system integration and lightweight design to highest energy densities. *17th*.
- Hyundai. (März 2021). *Hyundai Motor Group to Lead Charge into Electric Era with Dedicated EV Platform 'E-GMP*. Von <https://www.hyundai.com/worldwide/en/company/newsroom/-0000016584> abgerufen
- Iturrondobeitia, A., Aguesse, F., Genies, S., Waldmann, T., Kasper, M., Ghanbari, N., . . . Bekaert, E. (2017). Post-Mortem Analysis of Calendar-Aged 16 Ah NMC/Graphite Pouch Cells for EV Application. *J. Phys. Chem. C.* 121, S. 21865–21876.
doi:10.1021/acs.jpcc.7b05416
- Jalkanen, K. e. (2015). Cycle aging of commercial NMC/graphite pouch cells at different temperatures. *Applied Energy Volume 154*, S. 160-172.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.110>
- Kassier, T., & Schellenbach, T. (2024). Zu gut für den Schrott - Alte Lithium -Ionen -Batterien sind wertvoll. Die Firma Cylib will ihre Rohstoffe zurückgewinnen. *Süddeutsche Zeitung*(09.09.2024).

- Korthauer, R. (Hrsg.). (2013). *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*. Berlin: Springer Verlag.
doi:10.1007/978-3-642-30653-2_22
- Kucinskis, G. e. (2022). Arrhenius plots for Li-ion battery ageing as a function of temperature, C-rate, and ageing state – An experimental study. *Journal of Power Sources, Volume 549*(30 November 2022).
- Kunststoff-Profi Verlag GmbH & Co. KG, Bad Homburg. (01. Mai 2020). *PC-Blends für leistungsfähige und sichere Batterie-Heimspeicher*. Von https://www.kunststoffweb.de/technologie-news/covestro_pc-blends_fuer_leistungsfaeheige_und_sichere_batterie-heimspei_tn102143 abgerufen
- Leibniz-Institut für Neue Materialien (INM). (2023). *Design for Recycling: Die programmierte Unsterblichkeit der Lithium-Ionen-Batterie*. Saarbrücken: https://www.leibniz-inm.de/wp-content/uploads/230109-AdRecBat_Design-for-Recycling.pdf.
- Light Metal Age. (März 2021). *Consortium to Design New Lightweight Battery Casings for Electric Cars*. Von <https://www.lightmetalage.com/news/industry-news/automotive/consortium-to-design-new-lightweight-battery-casings/> abgerufen
- Maltoni, F. (2018). Recycling, Remanufacturing und Second-Use - Wiederverwendung und innovatives Recycling ermöglichen die ökonomisch und ökologisch sinnvolle Umsetzung der Idee von Elektromobilität. 6. *EPT – Elektromobilproduktionstag*. Aachen.
- Matadi, B., Geniès, S., Delaille, A., Waldmann, T., Kasper, M., Wohlfahrt-Mehrens, M., . . . Bultel, Y. (2017). Effects of Biphenyl Polymerization on Lithium Deposition in Commercial Graphite/NMC Lithium-Ion Pouch-Cells during Calendar Aging at High Temperature. *J. Electrochem. Soc.* 164, S. A1089–A1097. doi:10.1149/2.0631706jes
- Medium. (März 2021). *The Next-Generation Battery Pack Design: from the BYD Blade Cell to Module-Free Battery Pack*. Von <https://medium.com/batterybits/the-next-generation-battery-pack-design-from-the-byd-blade-cell-to-module-free-battery-pack-2b507d4746d1> abgerufen
- Mobilityhouse. (17. Juni 2020). Von https://www.mobilityhouse.com/de_de/stationaere-energiespeicher abgerufen
- Money For Future. (18. 02 2021). *Video*. Abgerufen am 06. 07 2023 von Stromspeicher aus Tesla Akkus! Second life HeimSpeicher Elektroauto vom Startup Voltfang aus Aachen!: <https://www.youtube.com/watch?v=GkaCOtORKgw>
- Nickel, D., Stelter, E., Sülthrop, C., Mittmann, W., Heiduczek, T., & Hohenner, H. (2017). Innovative Testing Process for Electric Powertrains. *reviewed Paper, 30th Electric Vehicle Symposium, 2017*.

- Plastics Today. (März 2021). *NAIAS: Composite battery enclosure debuts on Chevy Spark EV*. Von <https://www.plasticstoday.com/naias-composite-battery-enclosure-debuts-chevy-spark-ev> abgerufen
- Projekträger Karlsruhe. (17. 04 2025).
<https://www.wbk.kit.edu/wbkintern/Forschung/Projekte/DeMoBat/index.php?site=home>. Abgerufen am 08. Juli 2022
- Quinn, J., Waldmann, T., Richter, K., Kasper, M., & Wohlfahrt-Mehrens, M. (2018). *Energy Density of Cylindrical Li-Ion Cells: A Comparison of Commercial 18650 to the 21700 Cells*, *J. Electrochem. Soc.* 165.
- Reinhold, M., & Günther, R. (2023). Batterie-Recycle. Berlin: BMWK Statusseminar.
- Roth, E. e. (2004). Thermal abuse performance of high-power 18650 Li-ion cells. *Journal of Power Sources Volume 128*, S. 308–318.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2003.09.068>
- Sabic. (März 2021). *Electric Vehicle Battery Packs*. Von https://www.sabic.com/assets/zh/Images/SABIC-PLA-22147-EN-EV-Battery-Pack-Brochure_tcm11-22007.pdf abgerufen
- Schludi, C., & Joos, J. (2019). Lightweight and Safe Composite. *Lightweight design*, S. 44-47. doi:10.1007/s41777-019-0061-0
- Schürmann, H. (2005). *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. Heidelberg: Springer.
- Schwalbe, U. (2023). Entwicklung eines 2nd-Life basierten Multi-Usecase Stromspeichersystem - iSLE. Berlin: BMWK Statusseminar.
- sig Media GmbH & Co. KG. (2023). Intraday-Handel - Zweites Leben für Batterien. *E-Quadrat - Magazin für Energiemanagement in Industrie Gewerbe(03-23)*.
- Smith, A. e. (2011). A High Precision Coulometry Study of the SEI Growth in Li/Graphite Cells. *Journal of The Electrochemical Society*(Volume 158, Number 5).
- Stahl, T. (09. 05 2022). *Alte E-Autoakkus bekommen neuen Sinn: So helfen sie in haarigen Stromsituationen*. Abgerufen am 19. 07 2023 von E-Fahrer.com:
https://efahrer.chip.de/news/alte-e-autoakkus-bekommen-neuen-sinn-so-helfen-sie-in-haarigen-stromsituationen_107923
- Steiger, J. e. (2014). Mechanisms of dendritic growth investigated by in situ light microscopy during electrodeposition and dissolution of lithium. *Journal of Power Sources Volume 261*, S. 112–119. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.03.029>
- Technische Universität München. (17. Juni 2020). <https://www.mw.tum.de>. Von <https://www.mw.tum.de/ftm/forschungsfelder/elektrische-antriebssysteme/verfahren->

- zur-entwicklung-und-auslegung-von-energiespeichersystemen-fuer-
elektrokraftfahrzeuge/ abgerufen
- thyssenkrupp. (März 2021). *The selectrify® steel battery housing*. Von
[https://www.thyssenkrupp-steel.com/en/industries/automotivetrucks/e-
mobility/battery-housing/](https://www.thyssenkrupp-steel.com/en/industries/automotivetrucks/e-mobility/battery-housing/) abgerufen
- Treffer, F. (2015). *Batterien als Energiespeicher*. (E. Fahlbusch, Hrsg.) Beuth-Verlag.
- Treffer, F. (2015). *Handbuch Elektromobilität*. (R. Korthauer, Hrsg.) ZVEI.
- VDE. (17. Juni 2020). *VDE Kompendium Elektromobilitaet*. Von
[https://www.dke.de/resource/blob/933408/0711b19c06f1a81210febfe0739902ee/vde-
kompendium-elektromobilitaet-data.pdf](https://www.dke.de/resource/blob/933408/0711b19c06f1a81210febfe0739902ee/vde-kompendium-elektromobilitaet-data.pdf) abgerufen
- VDE. (17. Juni 2020). *VDE Kompendium Li-Ionen-Batterien*. Von
[https://www.dke.de/resource/blob/933404/3d80f2d93602ef58c6e28ade9be093cf/kom-
pendium-li-ionen-batterien-data.pdf](https://www.dke.de/resource/blob/933404/3d80f2d93602ef58c6e28ade9be093cf/kompendium-li-ionen-batterien-data.pdf) abgerufen
- VDI Nachrichten. (01. Mai 2020). *Recycling trotz Flammenschutz*. Von [https://www.vdi-
nachrichten.com/technik/recycling-trotz-flammenschutz/](https://www.vdi-nachrichten.com/technik/recycling-trotz-flammenschutz/) abgerufen
- Vetter, J. e. (2005). Ageing mechanisms in lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources Volume 147*, S. 269-281. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.01.006>
- Vogel Communications Group. (09. 11 2021). *Automobil Industrie*. Abgerufen am 29. 10
2024 von E.Go bietet Batterietausch an: [https://www.automobil-
industrie.vogel.de/ego-bietet-batterietausch-an-a-
2705cc0fcf144c4fc074d0645145ea45/](https://www.automobil-industrie.vogel.de/ego-bietet-batterietausch-an-a-2705cc0fcf144c4fc074d0645145ea45/)
- Volkswagen AG. (22. 09 2021). *volkswagenag*. Abgerufen am 26. 01 2022 von
[https://www.volkswagenag.com/de/news/2021/09/second-life-or-recycling--battman-
rescues-batteries-from-a-needl.html](https://www.volkswagenag.com/de/news/2021/09/second-life-or-recycling--battman-rescues-batteries-from-a-needl.html)
- Volkswagen AG. (22. 09 2021). *volkswagenag*. Abgerufen am 26. 01 2022 von
[https://www.volkswagenag.com/de/news/2021/09/second-life-or-recycling--battman-
rescues-batteries-from-a-needl.html](https://www.volkswagenag.com/de/news/2021/09/second-life-or-recycling--battman-rescues-batteries-from-a-needl.html)
- Voltfang*. (17. 04 2025). Abgerufen am 06. 07 2023 von <https://voltfang.de/>
- Waldmann, T. e. (2014). Temperature dependent ageing mechanisms in Lithium-ion
batteries – A Post-Mortem study. *Journal of Power Sources Volume 262*, S. 129-135.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.03.112>
- Waldmann, T. e. (2014). Temperature dependent ageing mechanisms in Lithium-ion
batteries – A Post-Mortem study. *Journal of Power Sources*(Volume 262, Pageses
129-135).

- Waldmann, T. e. (2016). Interplay of Operational Parameters on Lithium Deposition in Lithium-Ion Cells: Systematic Measurements with Reconstructed 3-Electrode Pouch Full Cells. *Journal of The Electrochemical Society*(Volume 163, Number 7).
- Waldmann, T. e. (2017). Effects of rest time after Li plating on safety behavior—ARC tests with commercial high-energy 18650 Li-ion cells. *Electrochimica Acta Volume 230*, S. 454–460. doi:<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.02.036>
- Waldmann, T. e. (2017). Electrochemical, Post-Mortem, and ARC Analysis of Li-Ion Cell Safety in Second-Life Applications. *Journal of The Electrochemical Society, Volume 164, Number 13*, S. A3154–A3162. doi:<https://doi.org/10.1149/2.0961713jes>
- Waldmann, T. e. (2017). Electrochemical, Post-Mortem, and ARC Analysis of Li-Ion Cell Safety in Second-Life Applications. *Journal of The Electrochemical Society, Number 13*(17.10.2017).
- Waldmann, T. H. (2024). Efficient Workflows for Detecting Li Depositions in Lithium-Ion Batteries. *Journal of The Electrochemical Society*(Volume 171, Number 7).
- Waldmann, T., Gorse, S., Samtleben, T., Schneider, G., Knobloch, V., & Wohlfahrt-Mehrens, M. (2014). A Mechanical Aging Mechanism in Lithium-Ion Batteries. *Journal of The Electrochemical Society 161*, S. 1742–A1747.
- Waldmann, T., Hogg, B.-I., & Wohlfahrt-Mehrens, M. (2018). Li plating as unwanted side reaction in commercial Li-ion cells – A review. *J. Power Sources. 384*, S. 107–124. doi:[10.1016/j.jpowsour.2018.02.063](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.02.063)
- Waldmann, T., Kasper, M., & Wohlfahrt-Mehrens, M. (2015). Optimization of Charging Strategy by Prevention of Lithium Deposition on Anodes in high-energy Lithium-ion Batteries – Electrochemical Experiments. *Electrochimica Acta. 178*, S. 525–532. doi:[10.1016/j.electacta.2015.08.056](https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.08.056)
- Weidmann, F. (2020). *Eingereichte Dissertation zur In-Situ Herstellung thermoplastischer Sandwichstrukturen mit endlosfaserverstärkten Decklagen und Integralschaumkernen*. DOI: 10.21268/20200512-0: Fakultät für Natur- und Materialwissenschaften, Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik, TU Clausthal.
- Wind Energy. (Okttober 2016). *JEC Composites Magazine 108*, S. 31-32.
- Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW). (2014). *Temperature dependent ageing mechanisms in Lithium-ion batteries – A Post-Mortem study*. Ulm: Elsevier, Journal of Power Sources.
- Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW); Institute of Solid State Physics, University of Latvia. (2022). *Arrhenius plots for Li-ion battery ageing as a*

function of temperature, C-rate, and ageing state – An experimental study. Ulm, Germany; Riga, Latvia: Elsevier, Journal of Power Sources.

Zier, M. e. (2014). Lithium dendrite and solid electrolyte interphase investigation using OsO₄. *Journal of Power Sources Volume 266*, S. 198–207.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.04.134>

Zwicker, M., Moghadam, M., Zhang, W., & Nielsen, C. (2020). *Automotive battery pack manufacturing – a review of battery to tab joining.* In: *Journal of Advanced Joining Processes*. doi:10.1016/j.jajp.2020.100017

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Vorhaben wurde ein Beirat zur kontinuierlichen Begleitung und Beratung eingerichtet. In diesem Beirat wurde das Projekt mit den Arbeitspaketen und deren Ergebnisse vorgestellt und die aus dem Forschungsprojekt resultierenden Geschäftsmodelle für die Praxis diskutiert und bewertet.

Es wurden verschiedene Stakeholder kontaktiert, u. a. Hersteller aus der Automobil- und Batteriebranche, Forschungsinstitute sowie politische Institutionen. Es konnten schließlich folgende Firmen bzw. Institutionen für den CIRCULUS-Beirat gewonnen werden:

- BASF Schwarzheide GmbH
- BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft
- House of Energy
- Institut für Ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW)
- StoRegio
- 8KU (8 kommunale Energieversorgungsunternehmen)

Die CIRCULUS-Beiratssitzungen fanden an folgenden Terminen statt:

- 12.12.2022
- 23.01.2023
- 10.07.2023
- 23.06.2025.

II. Eingehende Darstellung

Teile dieses Kapitels beinhalten Auszüge aus den Zwischenberichten und fassen darüber hinaus alle weiteren Arbeiten des Teilvorhabens der gesamten Projektlaufzeit zusammen.

II.1 Verwendung der Zuwendung /erzieltes Ergebnis

AP1 Anforderungen

In Arbeitspaket 1 wurden die Anforderungen an das zu entwickelnde nachhaltige Batteriesystem mit den Projektpartnern gemeinsam ermittelt. Für die Anforderungsliste wurden zu Beginn Kategorien für Anforderungen zu den Bereichen Mechanik, chemische Zusammensetzung, thermische Eigenschaften, Elektrotechnik und Sonstige gebildet. Darüber hinaus wurde bei der Auswertung die Kategorie Recycling hinzugefügt. Dabei wurden Anforderungen auf Zell-, Modul- und Gesamtsystemebene separiert und festgelegt die die Basis für die im Projekt folgenden Arbeitspakete bildeten.

Ziel des Arbeitspaketes war es, anwendungs- bzw. unternehmensübergreifend und interdisziplinär die Randbedingungen und die daraus resultierenden Anforderungen an das nachhaltige Batteriesystem zu erarbeiten, um es sowohl für die mobile als auch die anschließende stationäre Anwendung zu befähigen und am Produktlebensende, oder auch End of Life (EoL) das effiziente Recycling der Metall- und Kunststoffkomponenten zu ermöglichen.

Das AP1 wurde wie geplant und erfolgreich abgeschlossen

AP2 Konzepte

Auf Basis der Anforderungsliste aus AP1 wurden in AP2 mögliche technische Lösungen für ein nachhaltiges Batteriesystem als Entwürfe entwickelt und deren Machbarkeit vergleichend bewertet. Unterschiedliche Komponenten- und Systementwürfe wurden in einer vergleichenden Bewertungsmatrix (morphologischer Kasten) aufgelistet und anhand von Kriterien, wie z.B. technischer und wirtschaftlicher Aufwand bewertet.

Als Ergebnis von AP2 wurden Konzepte ausgewählt, welche die Bewertungskriterien am besten erfüllten. Im weiteren Verlauf wurden diese Konzepte final auskonstruiert (AP3) und aufgebaut (AP5).

Es wurden als Ergebnis von AP2 und zum Meilenstein M1 die im Folgenden beschriebenen zwei Demonstrator-Konzepte nominiert:

Konzept 1 – Stationärer Speicher

Der Quartierspeicher umfasst insgesamt 32 Batterie-Module mit gebrauchten Zellen, die in drei eigenständigen Batterie-Blöcken zusammengefasst werden. Jeder Block besitzt ein komplettes Master-Slave Batterie-Management-System (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 Energie-Management-System (EMS) (Energie-Management-System) dar.

Konzept 2 – Mobiler Demonstrator

Der mobile Demonstrator wird für das CIRCULUS-Projekt mehrfach aufgebaut. So werden eine Komplettbatterie und ein kompakter Ausschnitt dieses Systems als transportables Ausstellungsstück (Messe-Demonstrator) umgesetzt. Die Komplettbatterie dient – dem Projektziel entsprechend – der Beispiel-Demontage durch den Projektpartner Umicore (Recycling-Demonstrator).

AP2 und der Meilenstein M1 „Konzept liegt vor“ wurden erfolgreich abgeschlossen.

AP3 Batteriedesign

In AP3 wurde das favorisierte Batteriekonzept aus AP2 final auskonstruiert. Wesentliche Arbeitsinhalte und Ergebnisse waren die Konstruktion im CAD, die Beschaffung und Fertigung der benötigten Komponenten für die beiden mobilen Demonstratoren (Messe-Demonstrator und Recycling-Demonstrator für AP6) und der Aufbau des benötigten Batteriesystems für den stationären Speicher.

TAP 3.1 Komponenten- und Systemdesign

Fraunhofer LBF hat in enger Zusammenarbeit mit BMZ im Rahmen des TAP 3.1 Betrachtungen bezüglich der Weiterentwicklung des Gehäuses des Referenzsystems erarbeitet. Es wurden hierfür ein weiterer morphologischer Kasten erstellt, welcher die nötige mechanische Verbindung unter Stoffschluss, Formschluss und Reibkraftschluss sowie Kombinationen aus allen Verbindungsarten gliederte. Insgesamt wurden 55 Einzellösungen gefunden. Nach dem Auflisten wurde eine Bewertung der einzelnen Ideen hinsichtlich der technischen Umsetzbarkeit (Anforderungskatalog AP1) und Wirtschaftlichkeit durchgeführt. Anschließend wurden einzelne Teillösungen favorisiert und ausgewählt.

Die finale Ausführung der mobilen Demonstratoren enthält die ausgewählten Punkte des „Idealen Speichers“, die im AP2 erarbeitet wurden. Diese Ausführung wurde zusammen mit dem LBF und der BMZ-Konstruktion in Regelmeetings erarbeitet und im CAD umgesetzt (Abbildung 5).

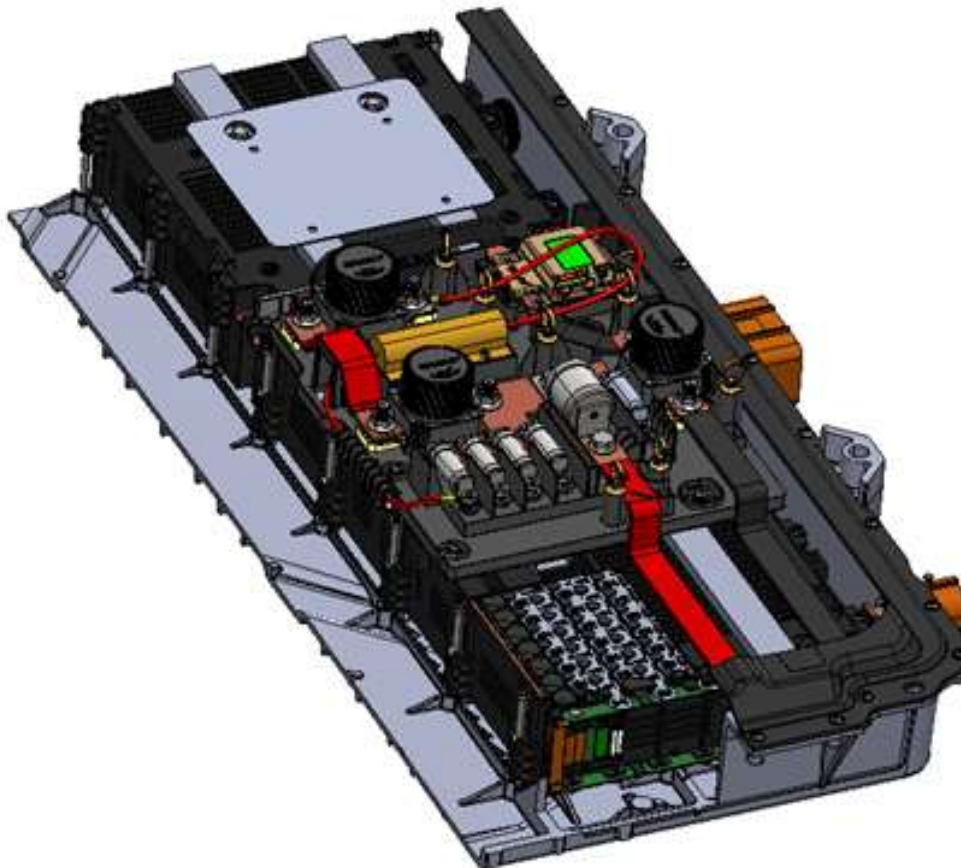


Abbildung 5: CAD-Modell des mobilen Demonstrators für Messen

Für das nachhaltige Systemgehäuse (Batteriewanne) ergab sich eine wichtige Randbedingung. Diese Randbedingung definierte, dass metallische Komponenten und Kunststoffkomponenten keinen Verbund darstellen sollten, um das Recycling einfacher und damit auch wirtschaftlicher zu gestalten.

Es waren insgesamt drei Bereiche in dem Referenz-Batteriegehäuse vorhanden die entsprechend mit alternativen Möglichkeiten vom LBF umzukonstruieren und im CAD darzustellen waren. Es handelte sich hierbei um:

- Seitenwände: Fahrzeuganbindung
- Flansch: Deckel- und Querstrebenanbindung
- Boden: Modul- und Komponentenbefestigung

Es wurden für jeden der drei Bereiche zwei Möglichkeiten analysiert. Für den Bereich der Fixierung der Batteriemodule und weitere Komponenten mit dem Boden ergaben sich folgende Ansätze:

- B1: Lokale Modulbefestigung (Einzelbefestigung)
- B2: globale Modulbefestigung (Platte).

Für den Flanschbereich wurden folgende zwei Möglichkeiten untersucht:

- F1: Gekäfigte Mutter oder Clip mit Gewinde in lokaler Einzelbefestigung
- F2: Gekäfigte Mutter oder Clip mit Gewinde mit globaler Befestigung (Schiene).

Und für den dritten Bereich, an den Seitenwänden zur Fahrzeuganbindung, ergab die Auswahl aus dem morphologischen Kasten diese Ansätze:

- FZ1: metallische Winkelanbindung/Bänder
- FZ2: Verstärkung der Decklage und dem Kern.

Die beiden Möglichkeiten für den Bodenbereich wurden im CAD als Entwurf konstruiert (Abbildung 6). Aufgrund des sich ergebenden Gewichtes wurde jedoch ein Ansatz mit lokaler Befestigung (B1) ausgewählt und auskonstruiert. Hier waren je nach Position und zu befestigende Komponenten unterschiedliche Varianten dieser lokalen Befestigungsteile erforderlich (Abbildung 6 unten). Diese unterscheiden sich unter anderem im Durchmesser oder auch in der Position auf der Fußpunktplatte

Für den Flanschbereich stand keine käufliche Standardlösung für das Gehäuse zu Verfügung. Hier wurde je nach Position und aus Gewichtgründen mit einem globalen und lokalen Ansatz gearbeitet (Abbildung 7). Der globale Ansatz deckte hierbei mehrere Schraubpositionen in einem Gegenhalter ab und der lokale Ansatz jeweils nur eine Schraubposition. Der generelle Designansatz war hier, ein metallisches Gewinde zu Verfügung zu haben, was nicht als Insert im Kunststoff fest eingebunden ist, und dennoch bei der Montage vor einem Herausfallen gesichert ist.

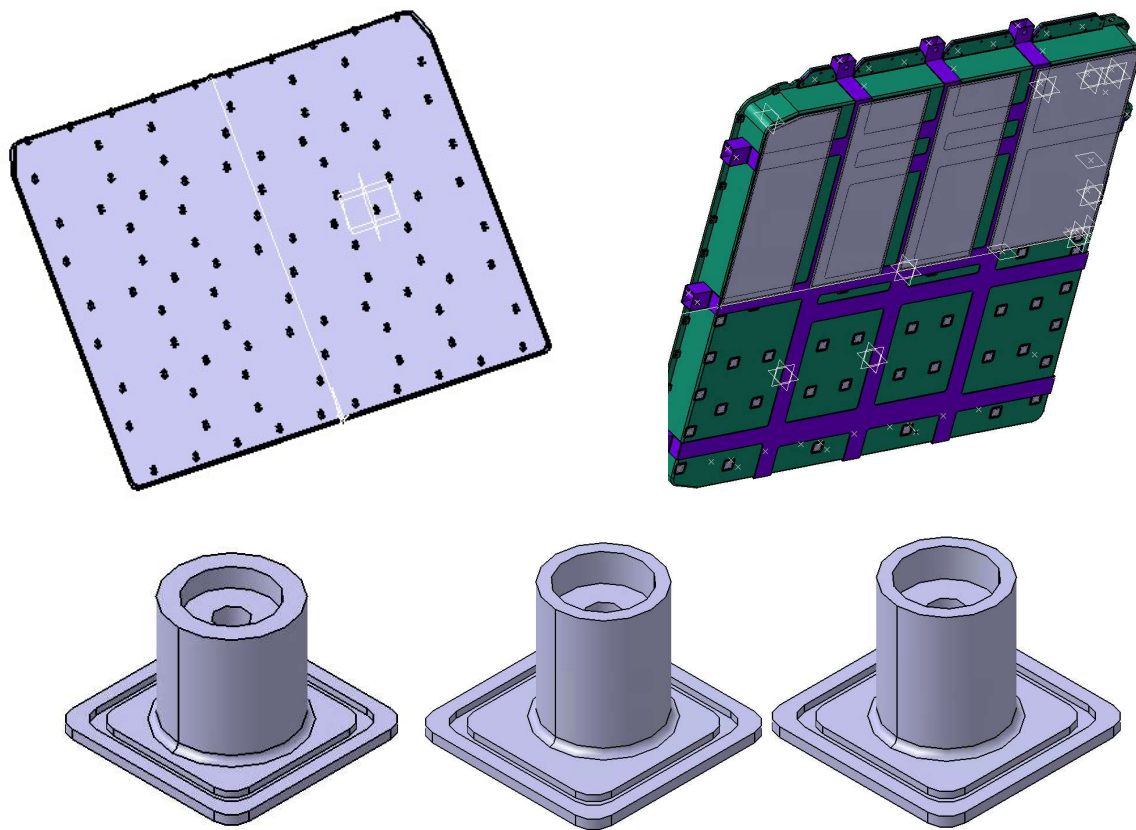


Abbildung 6: Konstruktionsvarianten Bodenbereich. Oben links: globale Modulbefestigung (Platte). Oben rechts: Variante der globalen Modulbefestigung (Platte). Unten: Ausgewählte lokale Lösung.

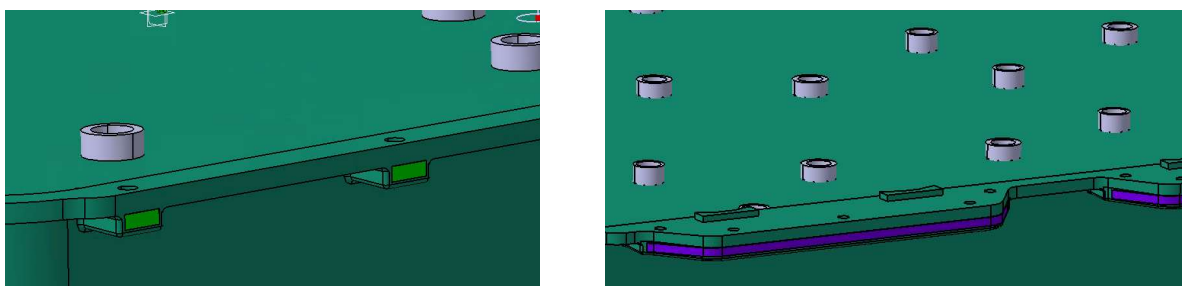


Abbildung 7: Konstruktionsvarianten Flanschbereich. links: Lokale Befestigung. Rechts: Globale Befestigung.

Im Bereich der Seitenwände wurden zwei Möglichkeiten erarbeitet und analysiert (Abbildung 8). Die Variante mit Verstärkung der Decklage und dem Kern, birgt für den Fasersandwichspritzgusses allerdings ein hohes technologisches Risiko. Daher wurde an dieser Stelle der Ansatz der Tragstruktur mittels Bänder gewählt und final auskonstruiert. Nichtsdestotrotz bildete die Fertigungstechnologie Sandwichspritzguss die Grundlage für das Gehäuse an sich.

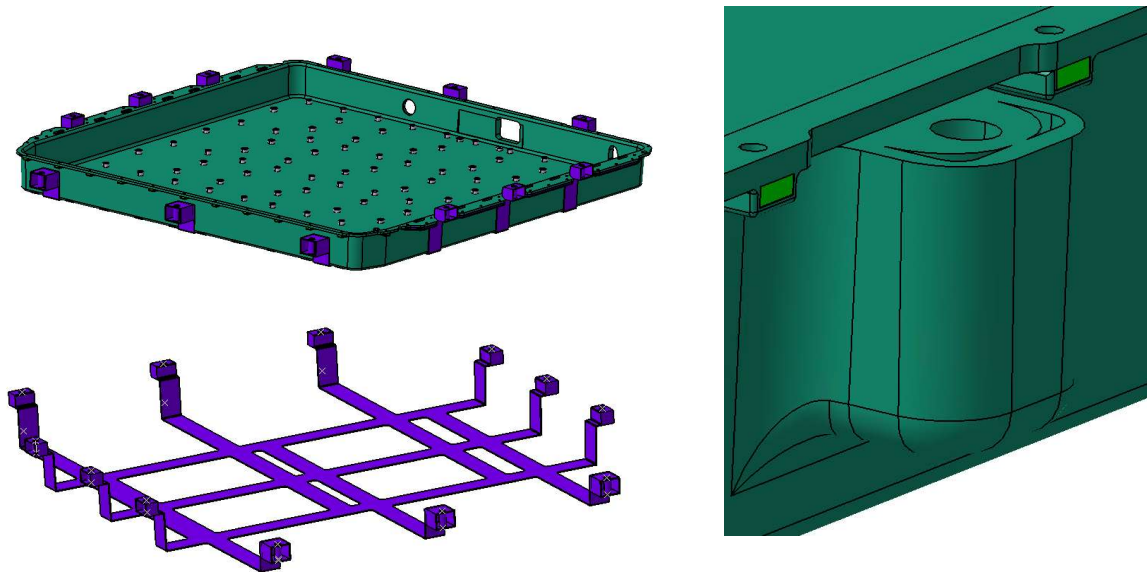


Abbildung 8: Konstruktionsvarianten Seitenwände zur Fahrzeuganbindung. links: metallische Winkelanbindung/Bänder. Rechts: Partielle Erweiterung der Wanne mit Verstärkung der Decklage und dem Kern für die Fahrzeuganbindung

Finite-Elemente Berechnung Batteriewanne

Die Finite-Elemente (FE)-Analyse der Batteriewanne untersuchte die Beanspruchung unter Aufbringung der mehrfachen Gewichtskraft aller Batteriemodule in negativer Z-Richtung (Abbildung 9). Das Gewicht der verbauten Batteriemodule wurde quasistatisch über die Befestigungselemente in die Batteriewanne eingeleitet.

Die Randbedingungen der FE-Analyse basierten auf der realen Einbausituation (siehe Abbildung 9). Darin enthalten waren die Batteriewanne im Sandwichaufbau (1), die Befestigungselemente (2), die Querstreben (3), die Batteriehaube (4) inklusive dem Servicedeckel (5) sowie der Stahlrahmen (6), der der Fahrzeuganbindung bzw. der Fixierung der Baugruppe im FE-Modell dient.

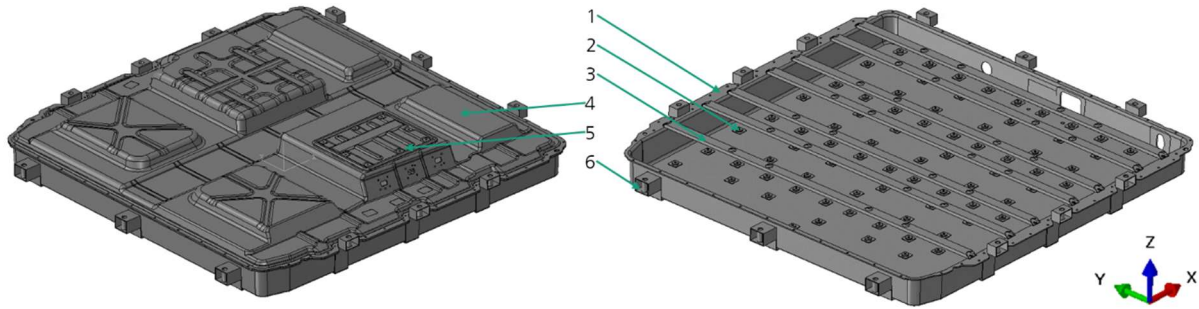


Abbildung 9: Vollständiges FE-Modell (links) und reduzierte Darstellung des FE-Modells ohne Batteriehaube (rechts)

Die zu analysierende Batteriewanne bestand aus einem faserverstärkten Sandwichaufbau, der schematisch in Abbildung 10 dargestellt wurde.

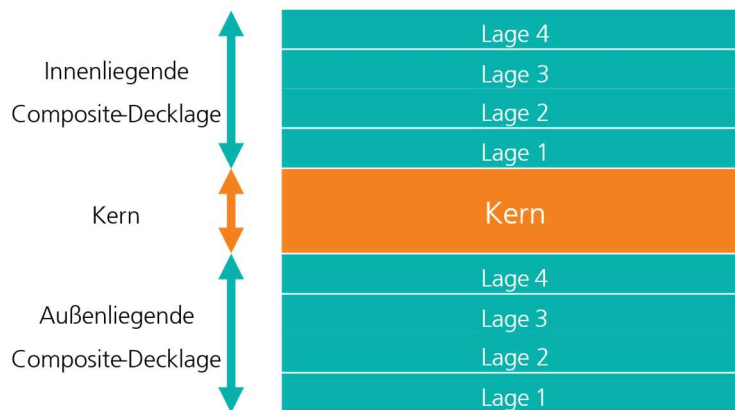


Abbildung 10: Schematischer Schichtaufbau des Batteriewannenkerns in 4-lagiger Ausführung

Das Glasfaserlaminat besteht aus unterschiedlich orientierten Lagen mit anisotropem Materialverhalten. Der Sandwichkern wird aus einem unverstärkten Kunststoff hergestellt und er wurde im Modell als Volumenkörper implementiert. Die Berechnungen wurden unter Variation der Schichtanzahl des Sandwichaufbaus für den Lastfall durchgeführt. Der Einfluss der Schichtanzahl auf die Beanspruchung der Batteriewannenkomponenten wurde ebenfalls untersucht. Die Bewertung der Beanspruchung erfolgte anhand der entstehenden Maximalwerte der Spannung (nach von Mises), der Verschiebung sowie der Dehnung, die im Kern bzw. in

den außenliegenden Laminatschichten der Decklagen des Composites auftraten (Abbildung 11, Abbildung 12).

TAP 3.1 wurde erfolgreich abgeschlossen.

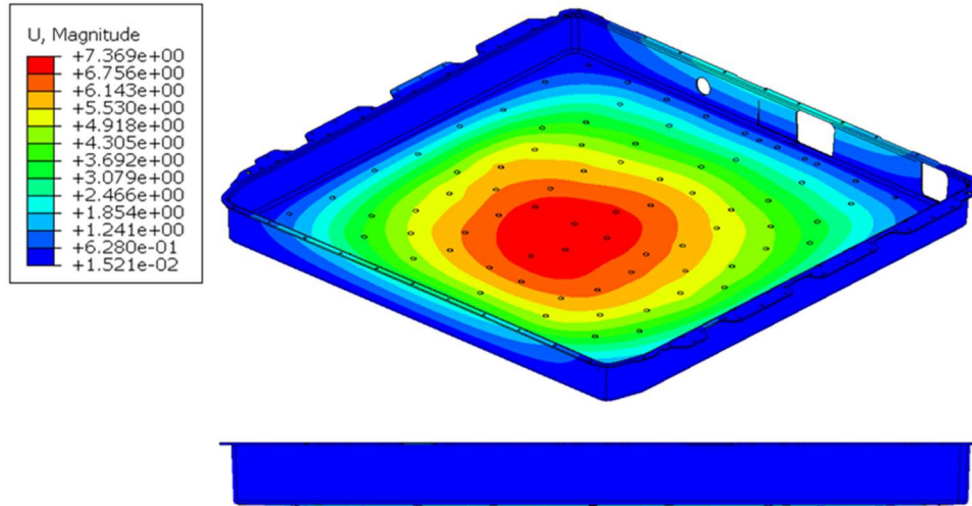


Abbildung 11: Verschiebung des Batteriewannenkerns (4-lagiges FE-Modell) in mm, Verformungsfaktor: 1

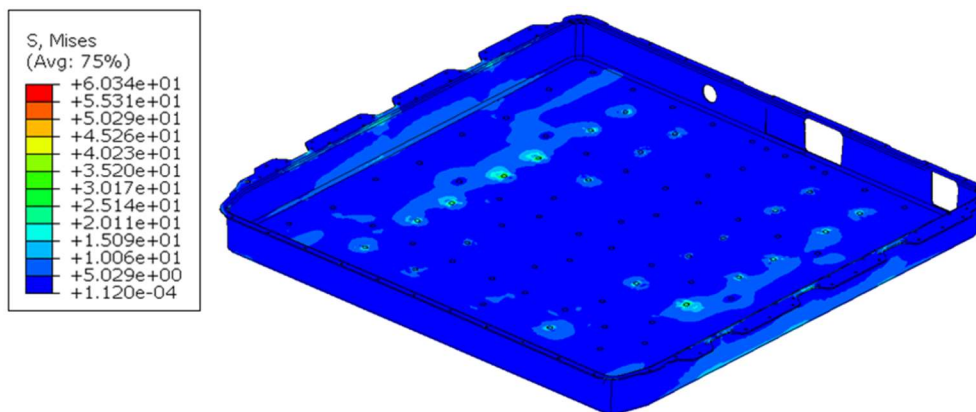


Abbildung 12: Spannung nach von Mises des Batteriewannenkerns (4-lagiges FE-Modell) in MPa, Verformungsfaktor: 1

TAP 3.2 BMS-Design für beide Anwendungen

In diesem TAP haben keine Arbeiten seitens LBF stattgefunden

TAP 3.3 Komponentenfertigung und Komponentenbeschaffung

Gehäuseherstellung

Der ursprüngliche Plan das Batteriegehäuse mittels Spritzgusswerkzeug auf einer Maschine herzustellen, konnte aufgrund der finalen Geometrie und den erforderlichen Eigenschaften in dem geplanten finanziellen Rahmen nicht umgesetzt werden. Daher erfolgte die Fertigung im Handlaminat. Es wurde ein Gehäuseteilschnitt (Messe-Demonstrator, Abbildung 13) und ein Gesamtgehäuse für den Recycling-Demonstrator (Abbildung 14) entsprechend gefertigt. Diese wurden prototypisch aus Glasfaserverbund und Schaumkern auf Basis einer Duroplastischen Matrix hergestellt. Dazu wurde auch das in der Konstruktion entwickelte Stoff- und Formschlussfreie Befestigungssystem der Batteriemodule umgesetzt. Der Messe-Demonstrator (Abbildung 16) wurde am Fraunhofer LBF durch die Bereitstellung von weiteren Bauteilen, wie Busbars und Crashstreben der Projektpartner Umicore und BMZ, aufgebaut.

Für den Recycling-Demonstrator (Abbildung 17) wurde das hergestellte Batteriegehäuse und alle weiteren Bauteile an BMZ geliefert zum finalen Aufbau des Demonstrators.

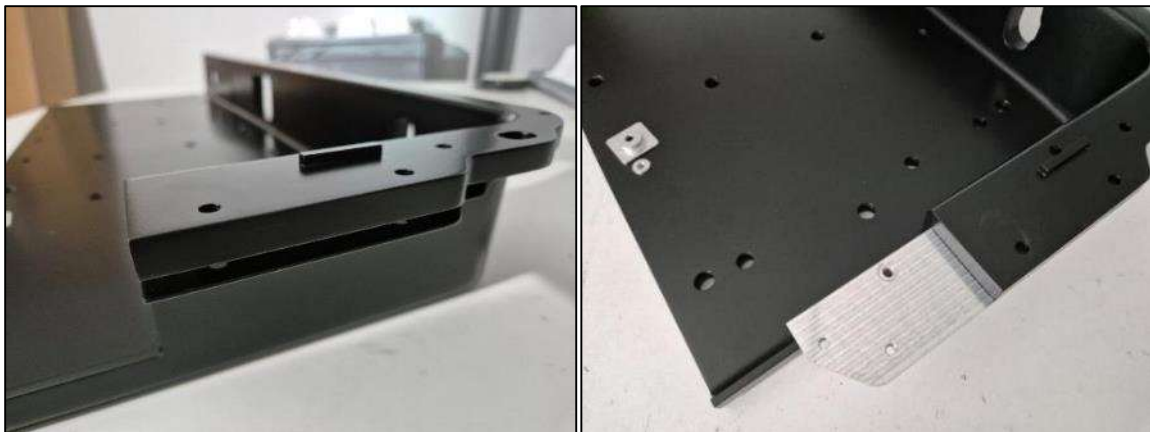


Abbildung 13: Komponentenfertigung der Wanne für den Messe-Demonstrator



Abbildung 14: Komponentenfertigung der Wanne für den Recycling-Demonstrator

Herstellung der Organosheets und Kunststoffplatten

Um den Recyclingprozess des Batteriegehäuses zu demonstrieren, wurde Plattenware (200 kg) mit den Abmaßen 1500 x 1000 x 10 mm³ beschafft und dem Projektpartner MC bereitgestellt. Um die Glasfasergewebeverstärkung im Recyclingprozess zu berücksichtigen, wurden im Fraunhofer LBF Organosheets (Abbildung 15) aus Glasfaser und der entsprechenden Matrix in einem Imprägnier-Werkzeug hergestellt und ebenfalls MC bereitgestellt. Mit der Plattenware und den hergestellten Organosheets wurde bei MC der Recyclingprozess hinsichtlich verschiedener Aspekte untersucht.

Aufgrund der Nichtverfügbarkeit am Markt, wurden die Organosheets im Labormaßstab am Fraunhofer LBF hergestellt. Dazu wurde ein Glasfasergewebe durch ein Imprägnier Werkzeug geführt und mit dem Matrixmaterial infiltriert. Ein stationärer Abzug und ein Kalandrier glätteten das Organosheet und wickelten dieses endlos auf.

Mit der Fertigstellung der Demonstratoren und der Auslieferung der Organosheets wurden die Hauptarbeiten des LBFs im TAP 3.3 erfolgreich abgeschlossen. Fachlich begleitet wurden darüber hinaus die Arbeiten zum stationären Speicher.

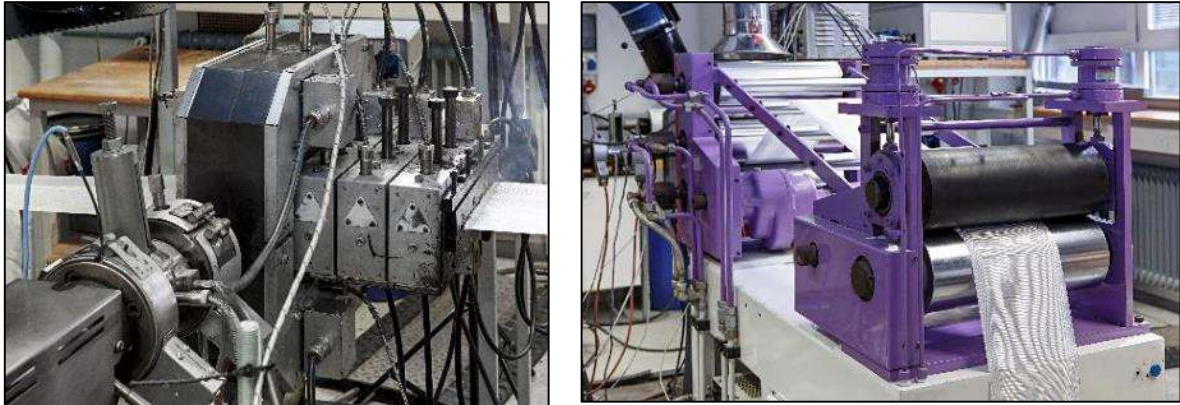


Abbildung 15: Fertigungsanlage am LBF für die Organosheets, Imprägnierwerkzeug (links) und Kalander (rechts)

TAP 3.4 Gesamtsystemaufbau mobiler Demonstrator

Das TAP 3.4 umfasst den Aufbau des Messe-Demonstrators sowie den Aufbau Recycling-Demonstrators für AP6 mit den vom BMZ und LBF entworfenen Verbesserungen. Der Recycling-Demonstrator wurde für Demontageuntersuchungen und Bewertungen des geänderten Aufbaus bei BMZ aufgebaut und an Umicore versendet, um die Ergebnisse mit dem Referenzsystem zu vergleichen.

Messe-Demonstrator

Der Messe-Demonstrator (Abbildung 16) wurde am Fraunhofer LBF durch die Bereitstellung von weiteren Bauteilen wie Busbars, Zellhalter sowie BMS von Umicore und BMZ aufgebaut. BMZ hat für diesen Aufbau ein Schnittmodell eines Moduls angefertigt, bei dem die neue Zell-Verbindungstechnik dargestellt wurde.

Recycling-Demonstrator

Die Referenz-Batterie wurde zum Zerlegen an Umicore verschickt und bei Umicore mit Zeitnahme demontiert. Diese Batterie war ein geprüfter Rückläufer, der im BMZ-Musterbau tiefentladen wurde und danach 2 Wochen zur Beobachtung in Quarantäne war.

Der CIRCULUS Recycling-Demonstrator wurde im Musterbau bei BMZ mit Dummy-Modulen und der verbesserten Bodenwanne vom LBF aufgebaut und an Umicore übergeben.

An der Bodenwanne wurden neben dem Material vor allem die Modulbefestigungen und die Verschraubung des Deckels geändert, die vom BMZ-Musterbau gut zu nutzen waren.

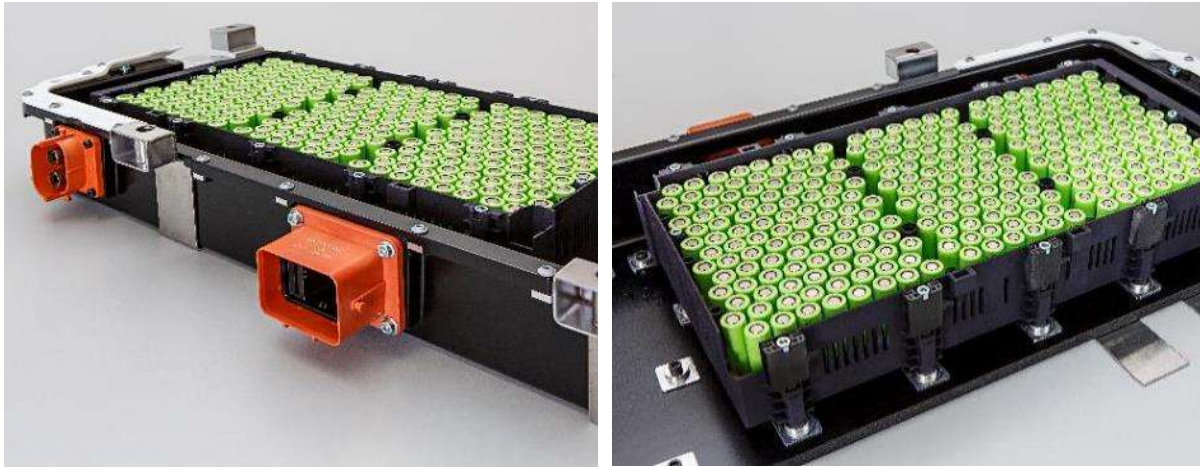


Abbildung 16: CIRCULUS Messe-Demonstrator



Abbildung 17: Recycling-Demonstrator

TAP 3.4 wurde erfolgreich abgeschlossen.

Schlussbericht (Fraunhofer LBF)

Version V3 vom 07.07.2024

AP4 Zustandsbewertung

Keine Arbeiten seitens LBF.

AP5 Anwendungsanalyse und Aufbau des stationären Energiespeichers

In AP5 folgt die Einbindung und Verwendung des in AP3 entwickelten modularen Batteriesystems als Realdemonstrator, um den wirtschaftlichen Einsatz von 2nd-Life-Speichern als Kombination mehrerer Anwendungen (Multi-Use-Ansatz) zukünftig zu übertragen.

Die Arbeiten des LBF umfassten den Informations- und Datentransfer aus AP2 und AP3 sowie den fachlichen Austausch, inklusive der Teilnahme an den Regelmeetings des AP5.

AP6 End-of-Life-Management

Parallel zu den anderen technischen Arbeitspaketen und kontinuierlich im Informationsaustausch mit diesen wurde in AP6 das ganzheitliche EoL-Management des Batteriesystems analysiert. Es wurden die Ansätze 2nd-Life (Weiterverwendung in einer anderen Anwendung), EoL im TAP 6.1 und Rückführung der Kunststoffe im TAP 6.2 betrachtet.

Die unterschiedlichen Batteriekonstruktionen (Referenzsystem und CIRCULUS Recycling-Demonstrator) wurden auf ihre sicherheitsrelevanten Merkmale, auf die Einfachheit der Separation und auf einen zerstörungsfreien Zugriff der einzelnen Komponenten (TAP 6.1) beim Projektpartner Umicore analysiert.

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

Anhand der Versuchsergebnisse in TAP 6.2 wird die Rückführquote der konstruktiven Kunststoffe in einem Serienprozess der wieder in den Wertstoffkreislauf einzuführenden Kunststoffe auf >85 % eingeschätzt.

Fraunhofer LBF hat im AP6 zum einen den Informationsaustausch aus den anderen Arbeitspaketen, insbesondere aus AP3, sichergestellt und zum anderen die Batteriewanne, Material, die nötigen Daten für den Recycling-Demonstrator (TAP 6.1) und für die Kunststoffrecyclinganalysen bei MC zur Verfügung gestellt (TAP 6.2). Die fachliche Zusammenarbeit hat hier in Online-Meetings, unter anderem mit CAD-Unterstützung, oder auch persönlich vor Ort stattgefunden. Das AP6 wurde erfolgreich abgeschlossen.

AP7 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Schlussbericht (Fraunhofer LBF)

Version V3 vom 07.07.2024

Das AP7 betrachtete die Wirtschaftlichkeit des erarbeitenden modularen Batteriesystems. Betrachtet wurde die Wirtschaftlichkeit für:

- den Batteriehersteller (BMZ)
- den Zweitnutzer in der stationären Anwendung (e-netz Südhessen AG)
- den Recyclern (Umicore, MC).

Zu einer vollumfänglichen Bewertung wurden die Kosten für die Zellbewertung bzw. die Modulbewertung ebenfalls untersucht.

Das AP7 wurde im Format digitaler Arbeitsmeetings im regelmäßigen Turnus abgehalten bzw. in Form von Experteninterviews mit Akteuren aus Politik, Recyclern, OEMs und Energieversorgern durchgeführt.

TAP 7.1 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung mobiles System

Um den Dismantlingaufwand zu bestimmen wurde das Referenzsystem und das im Projekt entwickelte Batteriesystem (Recycling-Demonstrator) bis auf Modulebene und Zellebene zerlegt. Dabei wurden die jeweiligen Aufwände erfasst und gegeneinander verglichen (AP6 Umicore). Hierbei wurde festgestellt, dass beim Referenzsystem eine zerstörungsfreie Demontage auf Zellebene nicht möglich ist. Dem hingegen ist beim CIRCULUS Recycling-Demonstrator durch einen Zell-Bonding nun eine zerstörungsfreie Demontage durchführbar.

Für die Zellbewertung stehen derzeit noch keine vereinfachten Bewertungskonzepte zur Verfügung. Vereinzelt sollen derzeit von Marktakteuren Methoden erarbeitet werden, welche mit Hilfe von künstlicher Intelligenz (KI) den Zell oder Modulzustand bewerten können. Die gängige Praxis ist die Bewertung der Module oder Zellen nach „besonders kritisch“, „kritisch“ und „unkritisch“ bei der Demontage. Zellen oder Module mit der Bewertung „besonders kritisch“ und „kritisch“ gehen sofort in das Recycling. „Unkritische“ Zellen oder Module können einem Kapazitätstest (drei Entlade- und drei Beladezyklen in 24 Stunden in einem Bunker) unterzogen werden. Wirtschaftlich lohnt sich eine Kapazitätsmessung nur auf Modulebene von ausreichend großen Modulen.

Zur Zeit der durchgeführten Arbeiten befanden sich die Rücknahme von gebrauchten Batterien und Modulen im Umbruch. Die Tendenz veränderte sich dahingehend, dass der OEM derzeit für die Rücknahme der alten Systeme bezahlt. Dagegen hatte bis vor einigen Jahren der Kunde für die Rücknahme noch bezahlen müssen. Skaleneffekte besonders großer bzw. kleiner Batterien/Module bzgl. der Kostenaspekte, sind derzeit nicht absehbar.

TAP 7.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung stationäres System

Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des stationären Systems wurde von e-netz ein Referenzsystem mit detaillierter Kostenstruktur bereitgestellt. Diese Kostenstruktur gliedert sich in einmalig anfallende Kosten, jährlich wiederkehrende Kosten und jährlichen Einnahmen:

Einmalige anfallende Kosten: Standortertüchtigung und Erschließung, Einhausung, Genehmigung, Speicherkosten, Anschluss, Sicherheitseinrichtung, Digitalisierung

Jährlich wiederkehrende Kosten: Pacht, Versicherung, Lizenzen, Digitale Anbindung, Wartung und Instandhaltung

Jährliche Einnahmen: Einnahmen als dezentraler Speicher, Einnahmen aus Peak Shaping und Grid, Einnahmen aus Gleich- und Wechselstrom-Ladesäulen für Elektroautos.

TAP 7.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Kunststoffrecycling

Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Kunststoffrecyclings hat MC drei Kostenszenarien „Worst“, „Base“ und „Best“ für das verwendete Kunststoffmaterial aufgestellt. Darin wurden unter anderem folgende Annahmen berücksichtigt:

- Qualitätsanforderungen an das recycelte Kunststoffregenerat als Sekundärrohstoff (Notwendigkeit einer Regranulierung)
- Aufwand der Zerkleinerung des Inputmaterials
- Inhomogenität des Inputmaterials und die daraus resultierende Anzahl an unterschiedlichen Verarbeitungsschritten
- Verwertungs- bzw. Reststoffquote

Darin fließen die Parameter wie Ankauf, Transportwege, Zerkleinerung, Kunststoffseparierung ein. Dabei wird von einer kontinuierlichen Menge von 1.000 t/a ausgegangen. Aus diesen drei unterschiedlichen Kostenszenarien lassen sich Mahlgut, Regranulat oder mit Zertifikat als Post Consumer Recyclat (PCR) herstellen.

TAP 7.4 Neue Geschäftsmodelle

Die neuen Geschäftsmodelle wurden in der Studie: „Nachhaltige Entwicklung – Ein zweites Leben für ausgediente Batterien aus Elektrofahrzeugen“ beschrieben. Die Studie ist unter folgendem Link abrufbar:

[Nachhaltige Entwicklung – ein zweites Leben für ausgediente Batterien aus Elektrofahrzeugen \(fraunhofer.de\)](https://www.fraunhofer.de) .

AP8 Veröffentlichung/Verwertung

In AP8 sind die Arbeiten zur Verwertung und Veröffentlichungen zusammengefasst. Es wurde ein Internetauftritt (Abbildung 18) zur Darstellung des Konsortiums, der Projekthalte und der Ergebnisse eingerichtet. Die Projektseite ist unter folgendem Link zu erreichen:

www.lbf.fraunhofer.de/de/projekte/nachhaltige-batteriesysteme.html .

Des Weiteren wurden in sozialen Netzwerken bei Bedarf Informationen zum Projekt über die LBF-Kanäle veröffentlicht. Dies sind im einzelnen Twitter, LinkedIn, Xing und Facebook.



Fraunhofer LBF
Fraunhoferinstitut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF

JAHRESBERICHT NEWSLETTER PRESSE VERANSTALTUNGEN
INSTITUTSPROFIL LEISTUNGSFELDER PROJEKTBEISPIELE

Fraunhofer LBF Projekte Nachhaltige Batteriesysteme für die Energiewende

CIRCULUS – Nachhaltige Batteriesysteme für die Energiewende

second-Life
Stationäre Anwendung
Mobile Anwendung
First-Life
Recycling
End-of-Life
Anforderungen

Nachhaltiges Batteriesystem für die Energiewende und neue Geschäftsmodelle

CIRCULUS

LEISTUNGSFELD CIRCULAR ECONOMY

Nachhaltigkeit, Zweitverwertung, Recycling – das sind zentrale Themen gerade im Zusammenhang mit der wachsenden Elektromobilität. Gemeinsam mit Partnern aus der Batterieentwicklung, Zellanalyse, Energieversorgung und dem Recycling entwickelt das Projekt CIRCULUS einen Li-Ionen-Energiespeicher, der sowohl für den mobilen Einsatz als auch einen anschließenden stationären Einsatz konzipiert ist. Hauptaugenmerk liegt dabei auf der nachhaltigen und effizienten Wiederverwendung mit minimalem zeitlichen und finanziellen Aufwand. Darüber hinaus wird auch das Recycling bzw. die Wiederverwendung der aus Kunststoff bestehenden Bauteile des Energiespeichers realisiert, was aktuell bei der Verwertung alter Batteriesysteme nicht Stand der Technik ist.

CIRCULUS
nachhaltiges Batteriesystem

CIRCULUS nachhaltiges Batteriesystem
Eine Lithium-Ionen-Antriebsbatterie wird bereits ab einem Kapazitätsverlust von 20% als nicht mehr geeignet für mobile Anwendungen eingestuft, da die Reichweite beachtlich verringert ist und negative Einflüsse u.a. beim Schnellladen auftreten. Die noch nutzbare Restkapazität von 80% ist allerdings mehr als ausreichend für Anwendungen außerhalb des Fahrzeuges, die geringere elektrische Leistungsanforderungen haben, wie beispielsweise Batterien für Photovoltaikanlagen. Leider findet die weitere Nutzungsmöglichkeit im Entwicklungsprozess von Lithium-Ionen-Batterien keine zureichende Berücksichtigung. In der abschließenden mobile Batterieentwicklung

Abbildung 18: Screenshot der CIRCULUS Projektseite

Es wurde ein Beirat zur kontinuierlichen Begleitung und Beratung eingerichtet. In diesem Beirat wurde im ersten Schritt das Projekt mit den Arbeitspaketen und deren Ergebnisse vorgestellt und die aus dem Forschungsprojekt resultierenden Geschäftsmodelle für die Praxis diskutiert und bewertet. Ziel des Beirats war es, die Evaluationsergebnisse auf diesem Wege in

die Politik und in die Energieversorgungsbranche einzubringen sowie die Reichweite der Ergebnisse zu vergrößern.

Es wurden verschiedene Stakeholder kontaktiert, u. a. Hersteller aus der Automobil- und Batteriebranche, Forschungsinstitute sowie politische Institutionen. Es konnten schließlich folgende Firmen bzw. Institutionen für den CIRCULUS-Beirat gewonnen werden:

- BASF Schwarzheide GmbH
- BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft
- House of Energy
- Institut für Ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW)
- StoRegio
- 8KU (8 kommunale Energieversorgungsunternehmen).

Es haben insgesamt 4 Termine stattgefunden (siehe auch Kapitel I.5).

Für die Dokumentation des Forschungsprojektes CIRCULUS, wurde gemeinschaftlich mit einer Medienfirma ein Drehbuchentwurf geschrieben und im Oktober 2023 mit dem Filmdreh begonnen. In Abbildung 19 sind die Dreharbeiten vor Ort beim LBF zu sehen.



Abbildung 19: Filmdreh auf dem Batterieprüfstand des Fraunhofer LBF

Folgende Veröffentlichungen und Verwertungen haben mit den erarbeiteten Ergebnissen stattgefunden:

2021:

- Workshops am LBF 13.12.2021 Vorstellung des Vorhabens

2022:

- LBF-Jahresbericht 2022 „CIRCULUS – Nachhaltige Batteriesysteme für die Energiewende“

2023:

Schlussbericht (Fraunhofer LBF)

Version V3 vom 07.07.2024

- „BMWK-Statusseminar Elektromobilität“ (02.-03.11.2023) in Berlin wurde das Vorhaben und die aktuellen Ergebnisse von Hr. Balkow vorgestellt
- Artikel in ENERGY -Wissen für die Energiewende, „Forschungsprojekt Circulus entwickelt Batterie-Weiternutzungskonzepte- vom Auto in die Siedlung“, 1/2023
- Artikel in Offenbacher Post, „Innovativer Speicher“, 08.04.2023
- Artikel in Main Echo, „Gebrauchte Akkus als Stromspeicher nutzen“, 11.04.2023

2024:

- Presse-Information von 04.06.2024:
„Recyclingfähiges Leichtbau-Batteriegehäuse und ein zweites Leben für alte Batteriezellen“
mit Folgeveröffentlichung <https://www.leichtbauwelt.de/recyclingfaehiges-leichtbau-batteriegehaeuse/>
- Studie 2024 <https://www.lbf.fraunhofer.de/content/dam/lbf/de/documents/studie-zweites-leben-batterie-elektrofahrzeuge.pdf>
- D. Spancken, E.-M. Stelter: Nachhaltige Entwicklung - Ein zweites Leben für ausgediente Batterien aus Elektrofahrzeugen, in VDI VDE technikforum I/2024, VDI Verein Deutscher Ingenieure, Seite 11 ff, Mannheim, 2024.
- E.-M. Stelter, D. Spancken, C. Hogrefe, T. Waldmann, B. Muscutt, A. Stegmann: CIRCULUS nachhaltiges Batteriesystem- Handlungsleitfaden, Fraunhofer LBF, 25.10.2024, DOI 10.24406/h-478323.

2025:

- E.-M. Stelter: Nachhaltiges Batteriedesign: Projekt „Circulus“, Kuratoriumssitzung-Fraunhofer LBF, Darmstadt, 20.05.2025.

Der Messe-Demonstrator wurde wie folgt präsentiert und vorgestellt:

- Kuratoriumssitzung des LBF mit Vertretern aus der Industrie am 21.-22.05.2024
- SEABAT Academic Event am LBF am 14.06.2024 mit internationalen Gästen aus Forschung und Industrie
- Plastic Recycling Show Europe 2024, Amsterdam am 19.-20.06.2024
- Tag der Elektromobilität, Darmstadt am 18.05.2025
- K Messe, Düsseldorf 8.-15.10.2025
- Dauerausstellung Showroom Fraunhofer LBF

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die ursprüngliche Aufwandsplanung des Vorhabens CIRCULUS wurde weitestgehend entsprechend dem Antrag eingehalten. Die Abweichung zur ursprünglichen Planung beträgt ein Prozent.

II.3 Notwendigkeit der Angemessenheit der geleisteten Arbeit

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

II.4 Voraussichtlicher Nutzen

Die in dem Gesamtvorhaben erarbeiteten Themen stellen eine sehr gute Grundlage für weitere Projekte des Fraunhofer LBF im Umfeld der Elektromobilität bzw. im Bereich der Li-Ionen Speichertechnologie dar. Sowohl im Rahmen weiterer Forschungsaktivitäten als auch in direkten Kooperationen mit Herstellern und Dienstleistungsanbietern werden diese Projektergebnisse langfristig weiter genutzt. Das LBF führt branchenübergreifend industrielle angewandte Forschung durch und kann die Ergebnisse des Vorhabens auf vergleichbare Anwendungen z.B. in der Schiffs-, Bahn- oder Luftfahrttechnik im Rahmen von bilateralen oder öffentlich geförderten Projekten übertragen.

II.5 Fortschritt bei anderen Stellen

Im Folgendem sind während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen zusammengefasst. Aufgrund des hohen Bedarfes des Marktes nachhaltiger zu werden, gibt es verschiedenste Projekte sowie Start-ups, welche die Thematik der Nachhaltigkeit im Hinblick auf Elektromobilität aufgreifen. Die folgende Aufstellung zeigt die Relevanz der Arbeiten in CIRCULUS auf und bestätigt die Wichtigkeit der Arbeiten für ein nachhaltiges Batteriesystem.

Analysesoftware „BattMan ReLife“

Die Volkswagen AG stellte die Analysesoftware „BattMan ReLife“ vor, die nach eigener Aussage in wenigen Minuten den Alterungszustand von Einzelzellen in Hochvoltspeichern bewerten kann: „Nachdem die Batterie angeschlossen ist, prüft das Gerät, ob die Batterie Daten übermittelt und zeigt, dann Fehlermeldungen, Isolationswiderstand, Kapazität, Temperaturen und Zellspannungen an. Daraus lässt sich der Gesamtzustand ablesen (Volkswagen AG, 2021)“. Weitere technische Details zur Arbeitsweise der Software wurden nicht veröffentlicht. Eine detaillierte Einschätzung der Wirksamkeit der Software ist daher schwierig.

Aufgrund der Kürze der Analysenzeit kann jedoch vermutet werden, dass die Analysesoftware „BattMan ReLife“ die Speichereinträge des BMS ausliest und diese auswertet. Eine vollständige elektrische Vermessung der Batterie ist in dem angegebenen Zeitraum nicht möglich.

Da die Speicherinhalte des BMS jedoch im Allgemeinen nicht zugänglich sind, dürfte die vorgestellte Analysesoftware „BattMan ReLife“ auf Batterien der Volkswagen AG beschränkt bleiben und nicht zur allgemeinen Verfügung stehen.

Veranstaltung von VDE Rhein-Main

Auf der Veranstaltung von VDE Rhein-Main am 16.02.2022 zum Thema „Einsatzmöglichkeiten von gebrauchten Fahrzeugbatterien“ wurden zwei CIRCULUS-nahe Vorhaben vorgestellt. Die Hochschule Fulda forscht an einer Second-Life Nutzung von Li-Ionen Batterien aus der Elektromobilität. Die Lebenszyklusanalyse umfasst hier, analog zu CIRCULUS, die Nutzung der Batterie in der Elektromobilität, die anschließende Nutzung in einem stationären Energiespeicher sowie das finale Recycling. Hierbei wurden Altbatterien aus Prototypenfahrzeugen von Audi verwendet, bewertet und recycelt. Bei der stationären Anwendung wurde allerdings nur die Netzunterstützung bei Schnellladern untersucht.

Audi und RWE 2nd-Life-Speicher

Audi hat gemeinsam mit RWE in Herdecke einen Stromspeicher errichtet, in welchem ebenfalls 2nd-Life-Speicher aus gebrauchten Li-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen betrachtet werden (Hanser automotive, 2022). Anders als bei CIRCULUS werden hier die 2nd-Life-Batterien jedoch nur für netzdienliche Maßnahmen innerhalb eines Industrieparks genutzt. Weitere Anwendungsmöglichkeiten befinden sich aktuell in Planung. Im Unterschied dazu wurden im Projekt CIRCULUS die recycelten Li-Ionen-Traktionsbatterien zum Aufbau eines stationären Energiespeichers verbaut um gleichermaßen netzwirtschaftliche wie marktwirtschaftliche Anwendungsmöglichkeiten unter Einbezug der makroökonomischen Rahmenbedingungen zu

betrachten (TAP 5.2) und gemeinsam mit den Projektpartnern Anwendungsanalysen sowie eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchzuführen.

DeMoBat

Das vom Umweltministerium Baden-Württemberg geförderte Vorhaben „Industrielle Demontage von Batteriemodulen und E-Motoren (DeMoBat, L7520101)“ erarbeitete eine automatisierte Demontagelösung für ausgediente Li-Ionen Traktionsbatterien (Fraunhofer Istitut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), 2025). Die Vorhabenslaufzeit endete am 30.11.2022. Ziel war, die Machbarkeit industrieller und (teil-)automatisierter Demontage von Batteriemodulen und E-Antriebsaggregaten anhand von vier Demonstratoren zu veranschaulichen und zu validieren. Einer der für CIRCULUS relevanten Schwerpunkte liegt auf der Analyse und Entwicklung der Demontagereihenfolge und Trennverfahren für vorhandene Batteriemodule (Projektträger Karlsruhe, 2025). Ob eine Betrachtung auf Batteriesystemebene stattfindet oder eine Rückkopplung der Erkenntnisse in die Konstruktion stattfindet, wie im Vorhaben CIRCULUS, ist nicht ersichtlich.

Leitfaden „Vorbeugender und Abwehrender Brandschutz bei Lithium-Ionen Großspeichersystemen“

Der im Oktober 2021 veröffentlichte Leitfaden „Vorbeugender und Abwehrender Brandschutz bei Lithium-Ionen Großspeichersystemen“ (Bundesverband Energiespeicher Systeme e.V (BVES), 2021) vom Bundesverband Energiespeicher Systeme e.V. zum vorbeugenden und abwehrenden Brandschutz für stationäre Li-Ionen Großspeichersysteme enthält Informationen zu Gefahren, baulichen, anlagentechnischen und organisatorischen Schutzmaßnahmen sowie Hinweise für Einsatzkräfte als auch Anforderungen an Li-Ionen Großspeichersysteme.

Ein Thermal Runaway ist einer der größten Gefahren, denn brennende Zellen können nicht gelöscht werden. Die Verhinderung der Ausbreitung ist die einzig mögliche Maßnahme.

CarBatteryRefactory

Die CarBatteryRefactory der Fa. Fenecon nutzt Zero-, 1st- und 2nd-Life-Fahrzeugbatterien um stationäre Stromspeicher für den Heimbetrieb sowie für Gewerbe und Industrie herzustellen. Dabei setzt sie auf einen „Full-Pack-Ansatz“, welcher es ermöglicht, komplette Fahrzeugbatterien inklusive deren Leistungselektronik, sowie Gehäuse, Heiz- und Kühlsystem, ohne Umbau zu nutzen. Die Fa. Fenecon kooperiert mit Automobilherstellern wie Renault, BMW, Audi, VW und MAN (FENECON GLS Crowd, 2023), (FENECON, 2023).

Voltfang

Das Start-up Voltfang verfolgt ein ähnliches Konzept: 2nd-Life-Batterien als stationäre Stromspeicher für Gewerbe und Industrie anzubieten. Ein wesentlicher Unterschied zur CarBattery-ReFactory ist der modulare Ansatz. Aus den 2nd-Life-Batterien werden einzelne Module ausgebaut, getestet und nur gute weiterverwendet. Mittels eigens entwickeltem BMS und Peripherie werden daraus individuelle Gesamtpakete nach Kundenwunsch inklusive 10-Jahres_Garantie erstellt. Die Kundenreichweite liegt von Aldi-Nord bis hin zu einem Off-Grid-Ferienhaus. Zudem bietet Voltfang kostenloses Recycling an (Voltfang, 2025), (Money For Future, 2021).

AdRecBat

Das Forschungsprojekt AdRecBat (Additivbasiertes, Design for Recycling' von Li-Ionen Batterien) am Leibniz-Institut für neue Materialien betrachtet die Wiederverwendung von Li-Ionen Batterien im Produktdesign. Mittels Einsatzes von Triggermaterialien soll die Effizienz und Wirtschaftlichkeit des Recyclingprozesses im Vergleich zu pyro- und hydrometallurgischer Aufbereitung verbessert werden. Triggermaterialien ermöglichen eine gezielte Trennung durch Reaktionen, die durch Veränderungen des äußeren Magnetfeldes, der Temperatur oder dem pH-Wert ausgelöst werden (Leibniz-Institut für Neue Materialien (INM), 2023).

EKODA

Das Projekt EKODA des Fraunhofer IWU forscht an kreislauforientiertem Recycling und Remanufacturing im Bereich der Mobilität. Ein Ziel ist die Automatisierung des Demontageprozesses. Ein Kamera-System erfasst die einzelnen Komponenten, sodass ein Bewertungssystem eine Empfehlung für die Weiterverwendung/-sart gibt. Das Bewertungssystem ist mit KI-Algorithmen ausgestattet und bildet einen technologischen Schwerpunkt des Projektes. Dabei wird das gesamte Fahrzeug, einschließlich Batterie, Karosserie und Getriebe betrachtet (Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU), 2023).

EDAG

Das neue Leichtbaugehäuse für Fahrzeugbatterien von EDAG besteht aus Verbundwerkstoffen, die Keramikfasern enthalten. Die Gewichtsreduzierung sowie die Herstellung in einem einzigen Prozess sparen Energie und erfüllen alle Anforderungen. EDAG hat Recycling faserverstärkter Kunststoffe in seine Wachstumsstrategie integriert, sodass alle Komponenten dem Wertstoffkreislauf zugeführt werden können (EDAG Group, 2023).

Volkswagen Group Charging GmbH

Die Volkswagen Group Charging GmbH, hat erkannt, dass die steigende Anzahl von Batterien aus Elektrofahrzeugen zu einem potenziellen Umweltproblem führen kann. Es ist geplant, Batterien für ein "zweites Leben" zu nutzen, indem ausgemusterte Batterien in stationären Batterielösungen, den sogenannten "Power Centers", für den Stromhandel genutzt werden. In Zusammenarbeit mit Volkswagen Group After Sales wurde ein Testspeicher mit einer Kapazität von bis zu 335 kWh entwickelt. Dieser Testspeicher dient dazu, Erfahrungen im operativen Stromhandel zu sammeln und die besten Zeitfenster für das Laden und Entladen zu ermitteln, um wirtschaftlich zu handeln. Um den Handel an der Strombörse zu automatisieren und die optimalen An- und Verkaufszeitpunkte zu bestimmen wird eine IT-Lösung von Volue Germany GmbH genutzt. (sig Media GmbH & Co. KG, 2023)

Projekt iSLE

Das Projekt iSLE verfolgt ähnliche Ziele wie CIRCULUS. iSLE verfolgt das Ziel die Entwicklung eines wirtschaftlichen Energiespeichersystems zur Nutzung im 2nd-Life, um die Gesamtnutzungsdauer durch Re-Use zu maximieren. Das Projekt hat eine Laufzeit von 3,5 Jahren, welche im Dezember 2022 startete und bis Mai 2026 abgeschlossen sein soll. Dabei sollen Antriebsbatterien als stationäre Multi-Usecase-Stromspeicher genutzt werden.

Dafür wird ein modulares BMS entwickelt. Ein weiteres Highlight stellt die mögliche Nutzung dieser Multi-Usecase-Algorithmen für andere Typen von Energiespeichern (Wasserstoff- und Wärmespeicher) dar. Im Vergleich zu CIRCULUS ist die Thematik des Energiemanagementsystem zentral. CIRCULUS betrachtet zusätzlich die Konstruktion der Batterie selbst und zusätzlich die Recyclingfähigkeit des Systems. (Erlös WP Holding, 2025), (Schwalbe, 2023)

ReCycle

Das Projekt ReCycle verfolgt das Ziel den Recyclingprozess von Batterien zu verbessern. Das Projekt startete im Januar 2021 und endete im Juni 2023. Im Vergleich zum CIRCULUS-Projekt fokussiert sich ReCycle auf den eigentlichen Recyclingprozess. Besonders hervorzuheben ist hierbei, dass u.a. die entstandenen Altakkuentladetechniken mit Wiedereinspeisung der Energie in die Produktionsprozesse arbeiten. (Reinhold & Günther, 2023)

Bericht „2nd-Life-Batterien als multifunktionale Stromspeicher. Dynamischer Markt für gebrauchte Lithium-Ionen-Batterien“

Der Bericht zu „2nd-Life-Batterien als multifunktionale Stromspeicher. Dynamischer Markt für gebrauchte Lithium-Ionen-Batterien“ (Haslinger, 2023) zeigt im Allgemeinen auf, dass sowohl

für Traktionsbatterien in Elektrofahrzeugen als auch für stationäre Speicherlösungen die Nachfrage in Zukunft steigen wird.

Die Firma Beck Automation bietet Energiespeicher an, die modular aus ausgedienten BMW i3 Batteriemodulen zusammengesetzt werden. Ähnliches bietet die Firma Connected Energy Ltd. mit Batterien aus Renault Elektrofahrzeugen an. Auch die Firma Eaton Speichersysteme setzt auf modulare Speichersysteme und verwendet dafür 2nd-Life-Batterien aus Nissan-Elektrofahrzeugen. Im Gebäudesektor werden 2nd-Life-Batterien z.B. von der Firma Stabl Energy GmbH verwendet, um eine nachhaltige Wärme- und Stromversorgung zu gewährleisten. In der Schweiz wurde von der Firma Energie 360° AG für eine solche Verwendung ein Projekt gestartet, das Elemente wie z.B. eine Photovoltaik-Anlage oder eine Wärmepumpe mit einbezieht.

Startup-Unternehmen Cylib

Die Süddeutsche Zeitung berichtete am 09.09.2024 in einem Artikel mit dem Titel „Zu gut für den Schrott“ über das Aachener Startup-Unternehmen Cylib (Kassier & Schellenbach, 2024). Dieses recycelt Li-Ionen Batterien unterschiedlichster Herkunft umweltfreundlich und effizient mittels einem mechanisch-chemischen Verfahren, um die wertvollen Rohstoffe aus Elektroblettieren zurückzugewinnen. Die Schwarzmasse wird dann in ihre Bestandteile wie Lithium, Kobalt, Nickel und Mangan, mit Hilfe eines Verfahrens auf Wasserbasis, aufgetrennt. Dies sorgt für einen rund 30 Prozent geringeren CO₂ -Fußabdruck im Vergleich zum chemischen Auftrennverfahren.

Ab 2026 soll das Verfahren vom Pilotcharakter auf eine Großanlage in Dormagen übertragen werden. Hier sollen dann pro Jahr bis zu 30.000 Tonnen Batterieschrott recycelt werden. Des Weiteren wird auch aufgezeigt, dass sich weitere Firmen, sei es als Neugründung oder als weiterer Geschäftszweig, in Deutschland auf den Markt bewegen. Hier sind folgende Firmen aufgeführt:

- Münchner Start-up Tozero,
- BASF,
- Mercedes-Benz (eigene Recyclinganlage).

II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Siehe Kapitel II.1 AP8.