Abschlußbericht zum Förderprojekt ZinCycle im BMFTR Rahmenprogramm „Vom Material zur Innovation“ und im BMBF-Dachkonzept Batterieforschung

Vorhabenbezeichnung:	
ZinCycle - Entwicklung einer rohstoffoptimierten, recyclefähigen und wiederaufladbaren Zink-Luft-Batterie für stationäre Anwendungen	
Zuwendungsempfänger: EurA AG	**Förderkennzeichen** 03XP0493F
Projektleiter & -mitarbeiter Dr. Denise Ott (Projektleitung) Daniel Habermeier	**Projektlaufzeit** 01.09.2022 - 31.08.2025

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) unter dem Förderkennzeichen 03XP0493F gefördert.

Inhalt

Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen ... 3
Zusammenfassung des übergeordneten Projektziels ... 3
Zusammenfassung der teilprojektspezifischen Ziele ... 4
Beschreibung der Arbeiten der EurA AG ... 4
AP13-1: Schaffung Bewertungsgrundlagen ... 4
Funktionelle Einheit der Studie ... 4
Bilanzrahmen der Analyse ... 5
Geographischer Rahmen ... 6
Wirkungsabschätzungsmethode und Wirkungskategorien der Ökobilanzierung ... 6
AP13-2: Ökologisches Screening ... 7
Anode ... 7
Membran-Elektroden-Einheit (MEA) ... 10
Elektrolyt ... 12
Stromabnehmer Compound ... 13
Demonstrator-Bau ... 14
Recycling ... 16
AP13-3: Ökobilanz und Vergleich zum Stand der Technik ... 20
Ergebnisse der Zink-Luft-Stacks ... 20
Referenz-Modell und Recycling ... 24
Vergleich mit State-of-the-Art Zellen ... 26
Zusammenfassung ... 28
Dissemination des Projekts ... 30
Fortschreibung des Verwertungsplans ... 32
Wirtschaftliche Erfolgsaussichten ... 32
Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten ... 32
Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit ... 32
Literatur ... 33

Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen

Die im Projekt erarbeiteten Lebenszyklusmodelle stellen einen wesentlichen Baustein zur Erreichung der Ziele der BMBF-Förderrichtlinie „Batterie 2020 Transfer“ dar. Sie ermöglichen eine übergreifende ökologische Bewertung von Herstellungs- und Rückgewinnungsprozessen über den gesamten Lebensweg der Batterie hinweg und tragen damit zur nachhaltigen Gestaltung der Wertschöpfungskette bei.

Durch die detaillierte Auswertung der Umweltwirkungen und die Identifikation maßgeblicher Belastungsschwerpunkte liefern die Modelle konkrete Ansatzpunkte für Optimierungen in den einzelnen Prozessstufen. Dadurch unterstützen sie eine effizientere Nutzung von Ressourcen, eine Reduktion von Treibhausgasemissionen und eine Verlängerung der Materialkreisläufe. Dies entspricht zentralen Zielsetzungen des Förderprogramms.

Darüber hinaus erleichtern die LCA-Ergebnisse die Einordnung und Integration neuer Technologien in vorhandene industrielle Strukturen. Sie liefern belastbare, datenbasierte Entscheidungsgrundlagen für Unternehmen, politische Entscheidungsträger und Forschungseinrichtungen und stärken damit sowohl die Innovationskraft als auch die Umsetzung nachhaltiger Batterielösungen in Deutschland.

Zusammenfassung des übergeordneten Projektziels

Ziel des Projekts ZinCycle war die Entwicklung einer rohstoffoptimierten, recyclefähigen und wiederaufladbaren Zink-Luft-Batterie für stationäre Anwendungen. Im Mittelpunkt stand ein kompaktes, halb-offenes Zell- und Systemdesign, das die hohe Energiedichte der Zink-Luft-Technologie möglichst vollständig nutzbar macht. Dazu wurde eine Bipolarplatte aus Metall-Kohlenstoff-Compound entwickelt, um insbesondere die gravimetrische Energiedichte des Gesamtsystems zu erhöhen. Ebenfalls zentral waren eine Membran-Elektroden-Einheit (MEA) als bifunktionelle Sauerstoffelektrode mit hoher Leistungsfähigkeit sowie eine zyklenstabile, Zink-Elektrode als Anode. Ergänzend zur technischen Entwicklung wurde die gesamte Wertschöpfungskette der Batterie betrachtet, mit besonderem Fokus auf die Recyclefähigkeit der eingesetzten Komponenten. Ein Schwerpunkt lag auf dem Recyclingprozess von Anoden- und Kathodenmaterialien sowie auf der ganzheitlichen Bewertung der damit verbundenen Umweltwirkungen. Die Ökobilanz war dabei nicht nur ein abschließendes Bewertungsinstrument, sondern ein begleitendes Element des Projekts. Sie diente dazu, ökologische Hotspots entlang der Prozesskette frühzeitig zu identifizieren, Optimierungspotenziale abzuleiten.

Im Ergebnis sollte eine Zink-Luft-Batterie für stationäre Anwendungen mit einer Leistung von 100 W, einer Kapazität von 100 Ah und einer Lebensdauer von mindestens 1.000 Zyklen realisiert werden. Charakteristisch für ZinCycle war die enge Verschränkung der Arbeitspakete, die eine kontinuierliche Abstimmung und intensive Zusammenarbeit der Projektpartner über den gesamten Projektverlauf hinweg erforderte.

Zusammenfassung der teilprojektspezifischen Ziele

Arbeitsziele dieses Teilvorhabens sind u.a. der Einsatz ökologischer Bewertungsmethoden über die gesamte Projektlaufzeit zur richtungsweisenden Entwicklung nachhaltiger Produkte und Prozesse. Beginnend mit Screening/Hot-Spot-Analysen werden in iterativen Schritten, mit zunehmendem Informationsgehalt und Datenverfügbarkeit, detaillierte Ökobilanzen erarbeitet, um den Einsatz von Materialien/Rohstoffen, Zellkomponenten und Prozessen zu bewerten, ökologische Treiber zu identifizieren und Handlungsempfehlungen abzuleiten, sowie eine Bewertung zu eingangs definierten Referenzsystemen vorzunehmen.

Dabei steht nicht nur die Bewertung der im Projekt zu entwickelnden Produktionsprozesse und deren vor- und nachgelagerte Schritte im Fokus (Material- und Energiebereitstellung, Abfallbehandlung), sondern auch die Bewertung der Nutzung/Performance des Zink-Luft-System sowie die Beurteilung geeigneter Recyclingpfade.

Beschreibung der Arbeiten der EurA AG

Die Arbeiten wurde nach den Vorgaben der DIN EN ISO 14040:2006+Amd1:2020 und DIN EN ISO 14044:2006+Amd1:2017+Amd2:2020 angefertigt.

Die Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Assessment, LCA) bewertet die Umweltwirkungen eines Produkts über seinen gesamten Lebenszyklus. Sie umfasst eine Sachbilanz (Life Cycle Inventory, LCI), die die relevanten Material- und Energieflüsse erfasst, sowie eine Wirkungsabschätzung (Life Cycle Impact Assessment, LCIA), in der diese Flüsse hinsichtlich ihrer Umweltauswirkungen bewertet werden.

Die Ökobilanzierungsmodelle wurden mit der Software *Umberto* erstellt. Als Datengrundlage diente die Datenbank *ecoinvent*, aus der Informationen zu den eingesetzten Materialien in die Modellierung integriert wurden. Ergänzend wurden im Projektverlauf einzelne Datensätze auf Basis von Literaturangaben modelliert, sofern die entsprechenden Informationen in der Datenbank nicht verfügbar waren.

AP13-1: Schaffung Bewertungsgrundlagen

Im Rahmen des ersten Arbeitspaketes wurden zahlreiche Entscheidungen in Bezug auf die Bewertungsgrundlage getroffen. Diese wurden gewählt, um eine Vergleichbarkeit mit anderen verfügbaren Studien zu gewährleisten. Die Veröffentlichung „PEFCR - Product Environmental Footprint Category Rules for High Specific Energy Rechargeable Batteries for Mobile Applications“ [1] wurde zu Rate gezogen um einige der Bewertungsgrundlagen zu definieren.

Funktionelle Einheit der Studie

Die funktionelle Einheit (FE) einer Ökobilanzierung stellt nach DIN EN ISO 14040/14044 eine Quantifizierung des Nutzens eines Systems dar und wird als Vergleichseinheit der bewerteten Systeme verwendet. Die PEF-CR legen als funktionelle Einheit 1 kWh elektrische Energie fest, die über die gesamte Lebensdauer des Systems abgegeben wird [1]. Durch diese Definition wird nicht nur die einmalig speicherbare Energie, sondern auch die mögliche

Zyklenzahl des Systems berücksichtigt. Dies ermöglicht einen detaillierteren Vergleich von Systemen mit unterschiedlicher Zyklen Stabilität. Daher wird auch für die Bewertung des Zink-Luft-Batteriesystems innerhalb dieses Projektes die FE= 1 kWh, welche über die gesamte Lebensdauer abgegeben wird, gewählt. Außerdem werden die Ergebnisse, vor allem im Bereich der Darstellung auf Komponentenebene, pro kg dargestellt.

Bilanzrahmen der Analyse

Der gewählte Bilanzrahmen umfasst den vollständigen Lebenszyklus des Batteriesystems und berücksichtigt somit sowohl die Herstellungsphase als auch das Lebensende, in dem die Batterie einem Recyclingprozess unterzogen werden. Die Ökobilanz konzentriert sich dabei insbesondere auf die Herstellungs- und Recyclingprozesse, während die Einflüsse der Nutzungsphase aufgrund ihres vergleichsweise geringen Beitrags vernachlässigt wurden.

Da der Bilanzrahmen sowohl die Produktion als auch verschiedene Recyclingpfade einschließt, wurde zur Berücksichtigung der rückgewonnenen Materialströme der sogenannte *avoided burden approach* angewendet. Dieser Ansatz ist gemäß ISO 14044 ein anerkannter und konformer Ansatz zur Gutschriftenvergabe in der Ökobilanzierung. Er sieht vor, dass die durch das Recycling zurückgewonnenen Materialien als Umweltgutschriften auf das Gesamtergebnis angerechnet werden. Dadurch kann das Recycling das Gesamtergebnis verbessern, sofern die durch die Wiederverwertung entstehenden Umweltwirkungen geringer sind als jene der primären Materialherstellung.

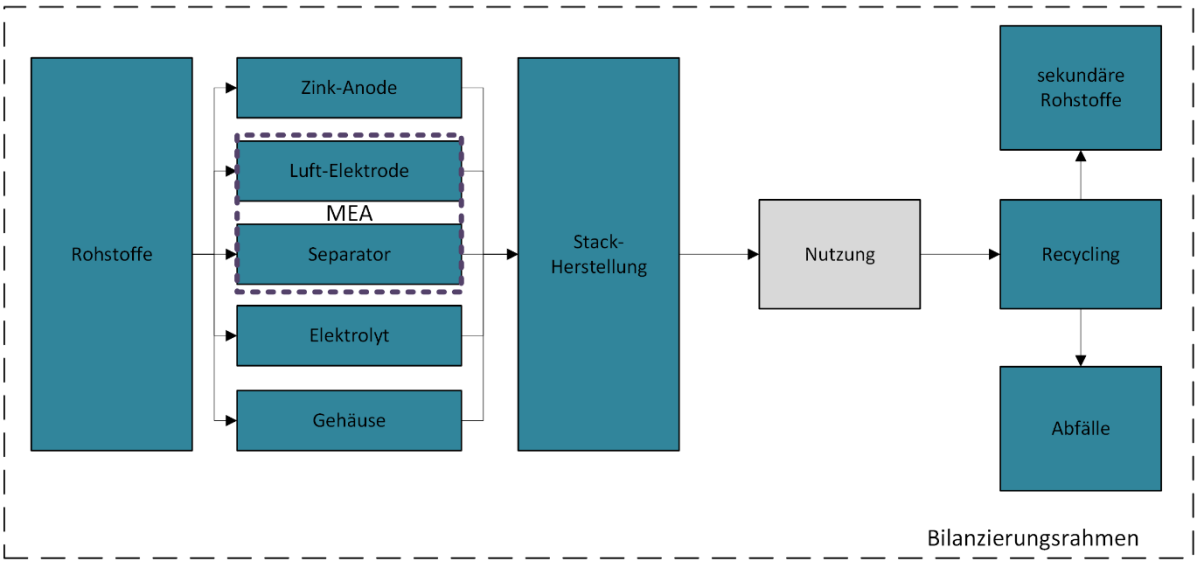

Abbildung 1: Vereinfachter Bilanzrahmen der Analyse für die Zink-Luft-Batterie Herstellung

Transporte von Zwischenprodukten, z.B. einzelner Zellkomponenten, oder Wege zum Recycling, innerhalb des Bilanzrahmens wurden nicht in die Studie aufgenommen. Diese Entscheidung liegt darin begründet, dass der Fokus dieser Analyse auf der Materialseite und Potentialanalyse der Systeme liegt und die Transportwege während des Projekts nicht den späteren Wegen in der Lieferkette entsprechen würden. Die im Zellentwicklungsstadium mit starken Unsicherheiten verbundenen Transport/Bezugswege der eingesetzten Rohstoffe wurden mit generischen Transportwegen aus der genutzten Ökobilanzierungsdatenbank abgeschätzt und interne Transporte vernachlässigt.

Energiebedarfe wurden weitestgehend auf Basis von Primärdaten, Kalkulationen und Abschätzungen berücksichtigt. In einigen Fällen aber auf Grund von Unsicherheiten und geringer Relevanz vernachlässigt.

Geographischer Rahmen

Die von Projektpartnern produzierten Materialien wurden soweit möglich mit deutschen Datenbankeinträgen modelliert, bezogene Materialien wurden aus Europa modelliert. Wo keine europäischen Daten verfügbar waren, wurden globale Durchschnittswerte verwendet.

Wirkungsabschätzungsmethode und Wirkungskategorien der Ökobilanzierung

Um eine ganzheitliche Betrachtung der Umweltauswirkungen zu gewährleisten, wurden alle Wirkungskategorien der "Environmental Footprint 3.1" (EF3.1)-Methode, die vom Joint Research Centre der Europäischen Union entwickelt wurde, berücksichtigt. Diese Methode umfasst mehrere Wirkungskategorien, die Aspekte wie Klimawandel, menschliche Gesundheit, Ökosystemqualität und Ressourcen abdecken. Die verwendeten Wirkungskategorien sind in Tabelle 1 unten aufgeführt.

Tabelle 1: Untersuchte Wirkungskategorien der Abschätzungsmethode EF3.1

Wirkungskategorie	Abkürzung	Einheit
Climate change - Total	CC	kg CO2-Eq
Fossil	CC-fossil	kg CO2-Eq
Biogenic	CC-biogenic	kg CO2-Eq
Land use and land use change	CC-LULUC	kg CO2-Eq
Carcinogenic effects - Total	CE	CTUh
Carcinogenic effects - Organic	CE-org	CTUh
Carcinogenic effects - Inorganic	CE-inorg	CTUh
Non-carcinogenic effects - Total	NCE	CTUh
Non-carcinogenic effects - Organic	NCE-org	CTUh
Non-carcinogenic effects - Inorganic	NCE-inorg	CTUh
Respiratory effects. inorganics	RE	Disease incidences
Ozone layer depletion	OLD	kg CFC-11-Eq
Photochemical ozone creation	POC	kg NMVOC-Eq
Ionizing radiation	IR	kBq U235-Eq
Freshwater ecotoxicity - Total	FET	CTUe
Freshwater ecotoxicity - Organic	FET-org	CTUe
Freshwater ecotoxicity - Inorganic	FET-inorg	CTUe
Freshwater eutrophication	FE	kg P-Eq
Marine eutrophication	ME	kg N-Eq
Terrestrial eutrophication	TE	mol N-Eq
Freshwater and terrestrial acidification	AC	mol H+-Eq
Fossils	FO	MJ
Minerals and metals	MM	kg Sb-Eq
Land use	LU	points
Water scarcity	WS	m3 world-Eq deprived

AP13-2: Ökologisches Screening

Im Rahmen von AP13-2 wurden die einzelnen Zellkomponenten und Bestandteile analysiert. Dabei entstanden einige Sub-Modelle in der genutzten Ökobilanzierungssoftware, aus welchen zu einem späteren Zeitpunkt das Gesamtmodell zusammengesetzt wurde. Diese Submodelle und die daraus erhaltenen Screening-Erkenntnisse werden nachfolgend beschrieben.

Anode

Zink-Pulver

Der Aktive Bestandteil der Anode ist Zink, das mit geringen Legierungszusätzen, zu Pulver verarbeitet wird. Da dem Projektpartner GRILLO keine Umweltinformationen des eingesetzten SHG-Zinks von dessen direkten Lieferanten vorlagen, mussten diese mithilfe sekundärer Daten ergänzt werden.

Zu Beginn des Projekts wurde hierfür der in *ecoinvent* enthaltene Datensatz *"primary zinc production from concentrate"* verwendet, dessen dargestellter Produktionsablauf dem von GRILLO beschriebenen Prozess des Lieferanten entspricht. Im Verlauf des Projekts veröffentlichte die *International Zinc Association* eine aktualisierte Ökobilanz zu SHG-Zink [2]. Diese diente fortan als Grundlage zur Berechnung der Umweltwirkungen des eingesetzten SHG-Zinks.

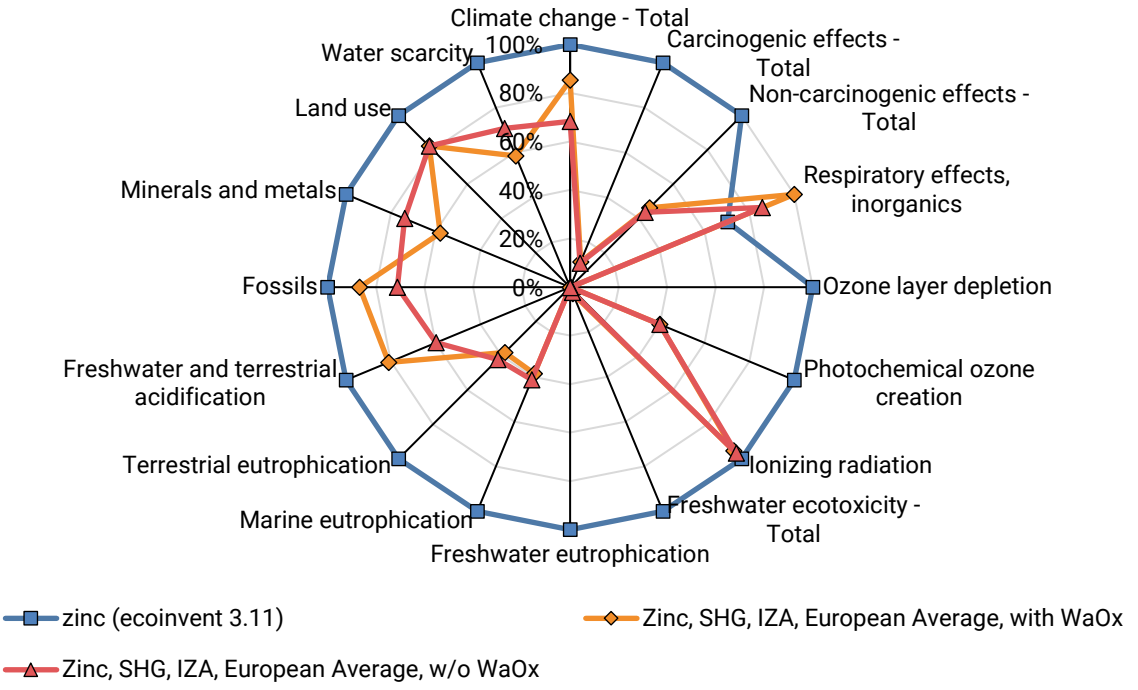

Abbildung 2: Vergleich der verfügbaren Zink-Datensätze

Wie zu erkennen, bildet der in ecoinvent enthaltene Datensatz die höchsten Ergebnisse in den meisten Wirkungskategorien ab. Da dieser Datensatz auf gesammelten industriellen Daten aus dem Jahr 2012 beruht, kann davon ausgegangen werden, dass die deutlich aktuelleren

Daten der IZA die Realität näher beschreiben. Daher wurden die IZA-Daten im weiteren Projektverlauf genutzt.

Die relativen Einflüsse der verschiedenen Pulver-Prozessbeiträge sind in Abbildung 3 dargestellt. Dabei ist klar erkenntlich, dass die Haupteinflüsse wie zu erwarten aus dem SHG-Zink stammen. Die geringen Legierungsmengen reichen in den meisten Kategorien nicht aus, um für signifikante Beiträge zu sorgen. Lediglich in den Kategorien FET und FE zeigt das Indium signifikante Beiträge trotz der sehr geringen Massenanteile. Die zur Schmelze genutzte Wärme spielt bspw. in der Kategorie OLD eine signifikante Rolle.

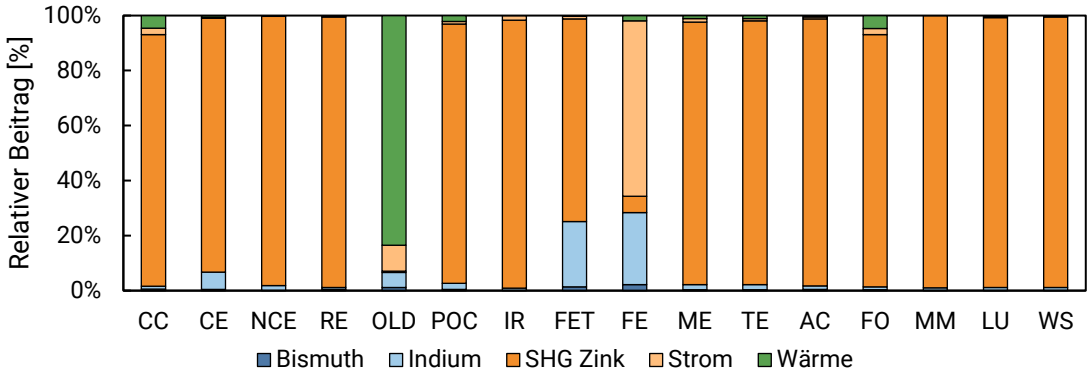

Abbildung 3: Relative Beiträge der Prozessbestandteile zur Zink-Pulver Herstellung

Glas-Beschichtung

Im Projektverlauf hat der Partner UBT verschiedene Gläser zur Beschichtung des Zinks genutzt. Diese wurden durch EurA im Verlauf des Projekts regelmäßig gescreent und verglichen um als zusätzliche Entscheidungshilfe bei der Auswahl der geeignetsten Gläser zu dienen. Dafür wurden die Gläser auf das Zink-Pulver auf gemahlen, mittels eines Sol-Gel-Prozesses beschichtet oder im Slurry mit Pulver und Elektrolyt vermischt.

Für das Aufschmelzen der Gläser wurde ein Energiebedarf von 6 MJ/kg (Erdgas 95%, Strom 5%), für das Hoch-Energie-Mahlen 8 MJ/kg und für das Sieben 1,2 MJ/kg mit aufgenommen. Die Gläser wurden in einem Verhältnis Glas:Zink von 20:80 auf das Zink-Pulver aufgetragen.

Wie in Abbildung 4 zu erkennen, zeigt bei den Bismuth-haltigen Gläsern das Bi_2O_3 große Anteile am Carbon Footprint des beschichteten Zinks. Daher wurde im Projektverlauf zunächst mit einer Rezeptur mit reduziertem Bi-Gehalt weitergearbeitet. Dennoch sind auch hierbei die Impacts noch hoch. Die Verwendung der Sol-Gel Route kann in der Kategorie CC für kleine Reduktionen sorgen, bei Betrachtung der weiteren Impact-Kategorien (rechts) wird jedoch deutlich, dass die Sol-Gel Route in den meisten Kategorien die höchsten Ergebnisse zeigt. Das ist auf die Verwendung des TEOS zurückzuführen. Die im späteren Projektverlauf genutzten Phosphor basierten Gläser, zeigen die deutlich geringsten Ergebnisse. Damit kann die Vermeidung des Bismuths im Glas zu deutlichen Reduktionen führen.

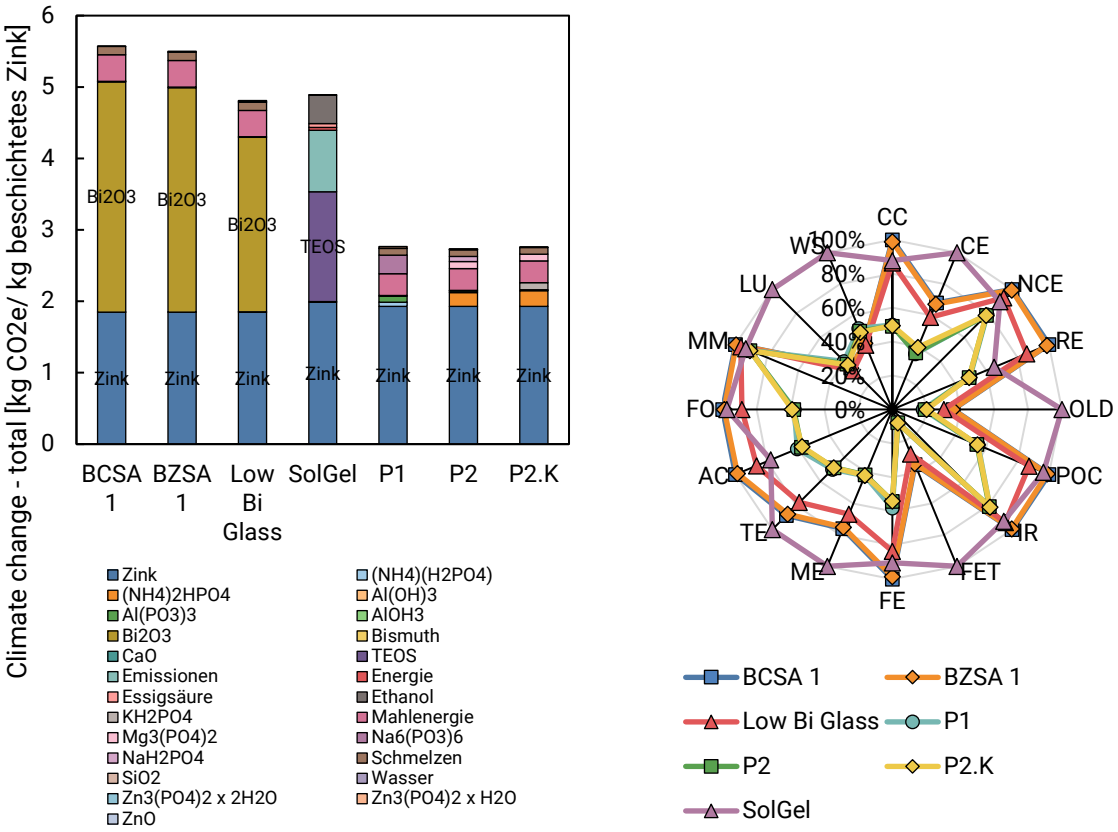

Abbildung 4: Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher Beschichtungen für die Herstellung von 1 kg beschichtetem Zink-Pulver

Anoden-Slurry

Der Anoden-Slurry, der in den finalen Demonstratoren verwendet wurde, hat die nachfolgend dargestellte Zusammensetzung. Dabei kamen zwei Rezepturen zum Einsatz (mit und ohne Glasbeschichtung).

Tabelle 2: Zusammensetzung der Anoden-Slurry-Varianten

Input	Ohne Glas	Mit Glas	Datensatz
Zink-Pulver	50%	45%	
Glas P2.K	0%	9%	
Zink-Oxid	10%	0%	Ecoinvent v3.11 – market for zinc oxide (GLO)
Elektrolyt	39%	45%	Siehe Abschnitt Elektrolyt
Carbopol, Polyethylenglykol	1%	1%	PEG: Polymerisation von Ehtylenoxid; Carbopol: Carbopol: Polymerisation von Polyacrylamid

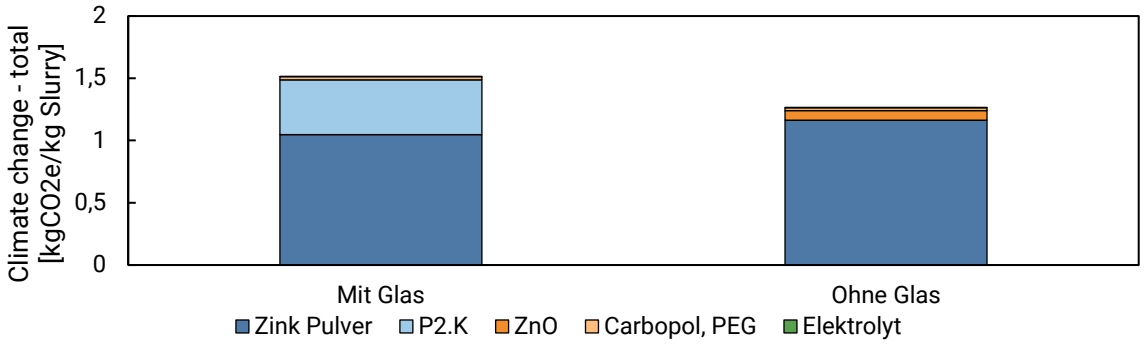

Abbildung 5: Vergleich der beiden Slurry-Varianten, die in den Demonstratoren verbaut wurden

Wie in Abbildung 5 zu erkennen ist, führt die Integration von Glas zu einem leichten Anstieg des Carbon Footprints der Anode. Da der Anteil an Zinkpulver dadurch gleichzeitig reduziert wird, verringert sich der Beitrag des Zinks entsprechend. Insgesamt ist jedoch festzuhalten, dass die Glasintegration im Projektverlauf die Zyklen Stabilität der Demonstratoren verbessert hat. Die zusätzlichen Umweltwirkungen des Slurrys werden damit durch die gesteigerte Performance kompensiert. Die Beschichtung wirkt sich folglich unter dem Strich positiv auf das Gesamtsystem aus. Eine nähere Analyse dieses Einflusses ist in den späteren Kapiteln dieses Berichts dargestellt.

Membran-Elektroden-Einheit (MEA)

Luftelektrode

Die Luftelektrode wurde beim Projektpartner Westfälische Hochschule gefertigt und setzt sich aus einer Katalysationsschicht (KS), Gas-Diffussionsschicht (GDL) und Nickel-Gitterzusammen.

Die Zusammensetzungen variieren je nach dem gewählten Binder. Bei der Verwendung von PP wird weniger Binder-Masse genutzt, wodurch sich die Massenzusammensetzungen verändern.

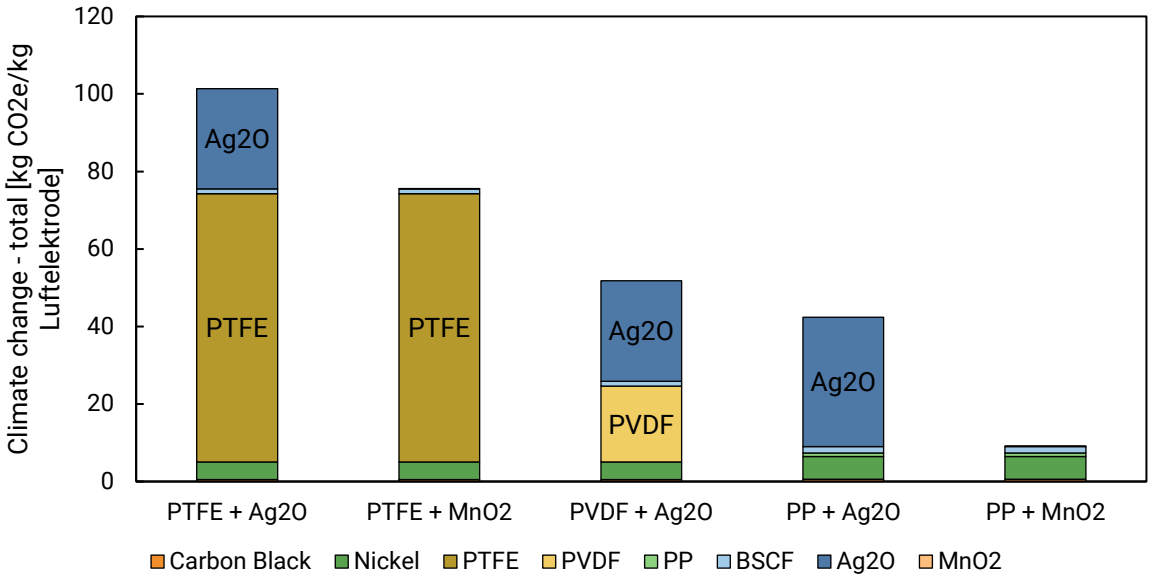

Abbildung 6: Climate Change - Ergebnis der Luftelektroden mit verschiedenen Bindern und Katalysatoren

Wie in Abbildung 6 zu erkennen ist, besteht bei der Luftelektrode ein deutliches Einsparpotenzial. Die Haupttreiber der erarbeiteten Standardelektrode sind der PTFE-Binder und der Silberoxid-Katalysator. Eine Umstellung des Binders auf PVDF oder sogar PP zeigt hier ein klares Reduktionspotenzial. Auch ein Verzicht auf das umweltintensive Silberoxid und ein Ersatz zum Beispiel durch MnO_2 verspricht sehr hohe Einsparungen. Daher sollte in zukünftigen Arbeiten der Einsatz dieser Varianten weiter untersucht werden, um die damit verbundenen signifikanten Emissionsreduktionen der Luftelektrode realisieren zu können

Beschichtung

Die Beschichtung der Luftelektrode, durch die das Bauteil zur MEA wird, erfolgt bei Rhenotherm. Hierfür liegen Beschichtungsvarianten auf Basis von Polyvinylbutyral (PVB) sowie THV vor. THV setzt sich aus den Monomeren Tetrafluorethylen, Hexafluorpropylen und Vinylidenfluorid zusammen. Zunächst wurden beide Polymere auf Kilogrammbasis miteinander verglichen.

Da für THV weder in den genutzten Datenbanken noch seitens der Lieferanten Umweltinformationen verfügbar waren, mussten die entsprechenden Daten im Projekt eigenständig modelliert werden. Dazu wurden die verwendeten Monomere berücksichtigt, konkret TFE aus ecoinvent, HFP nach [11], und VDF nach [8]. Anschließend wurden sie mithilfe des in ecoinvent hinterlegten Polymerisationsprozesses für Polyvinylfluorid zu einem THV-Datensatz weiterverarbeitet.

Die Daten für PVB wurden einem EPD der Firma Kuraray entnommen [12]. Da diese Informationen zu Projektbeginn noch nicht vorlagen, wurde ergänzend ein eigener PVB-Datensatz auf Basis von Literaturdaten modelliert.

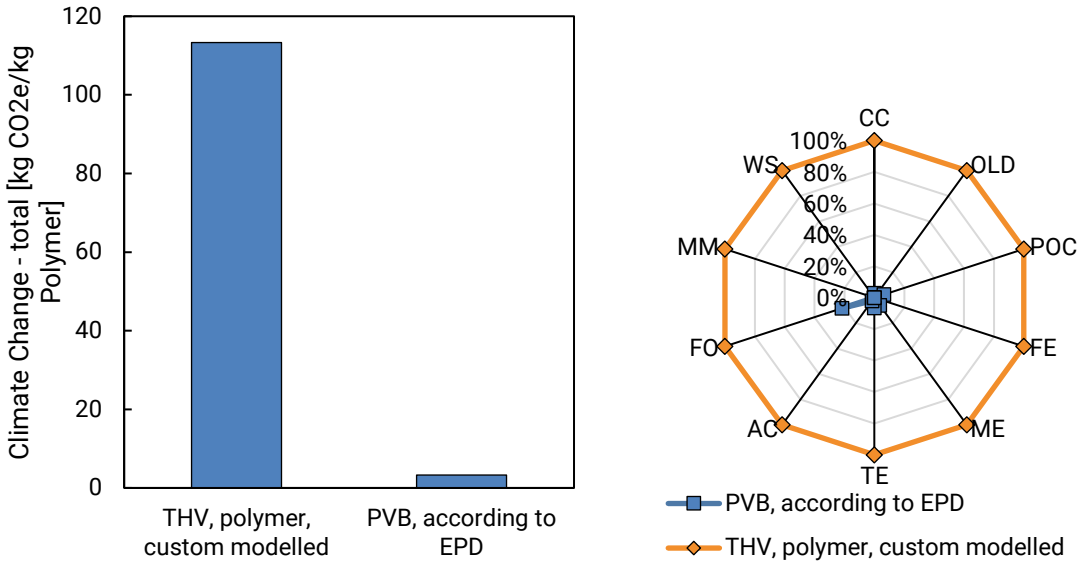

Abbildung 7: Vergleich von THV und PVB

Wie anhand Abbildung 7 zu erkennen, übersteigen die THV Ergebnisse die PVB Ergebnisse in allen Kategorien deutlich. Das PVB-EPD kommuniziert nicht alle 16 Wirkungskategorien, weshalb der Vergleich hier mit weniger Kategorien von statten ging. Die Verwendung des PVBs statt des THVs ist daher aus ökologischer Perspektive stark empfehlenswert.

Die Beschichtung der Luftelektrode wird bei Rhenotherm durchgeführt. Dafür wird das Polymer zunächst in MEK (THV) oder Ethanol (PVB) gelöst, die Lösung auf die Elektrode aufgetragen und anschließend getrocknet.

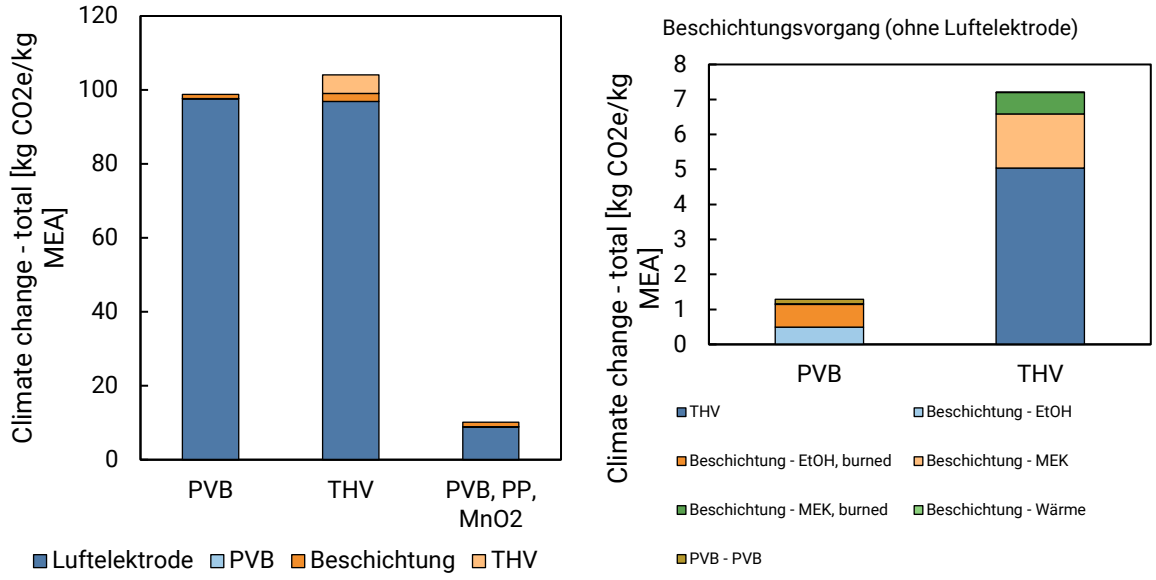

Abbildung 8: Vergleich der MEA-Ergebnisse bei Verwendung der beiden Polymer-Varianten

Abbildung 8 vergleicht zunächst den Carbon Footprint der MEA bei Verwendung von THV und PVB. Wie zu erkennen, dominiert die Luftelektrode selbst zunächst die Ergebnisse der MEA. Der dritte Balken des linken Diagramms verdeutlicht erneut das Einsparpotential durch die Binder/Katalysatoren-Umstellung. Vergleicht man nun (im rechten Diagramm) nur den Beschichtungsvorgang (ohne den Einfluss der Luftelektroden-Ergebnisse) wird deutlich, dass das genutzte Lösemittel (EtOH) und dessen Entsorgung (Annahme als Verbrennung) bei der Verwendung von PVB dominieren. Wird THV genutzt, dominiert das Polymer den Carbon Footprint, dennoch spielt das Lösemittel MEK und dessen Verbrennung ebenfalls eine signifikante Rolle.

In den Demonstratoren wurde zwar PTFE als Binder der Kathode und Ag_2O als Katalysator verwendet, da deren Performance den umweltfreundlicheren Alternativen noch deutlich überlegen ist. Dennoch konnte das eindeutig vorhandene Potential der Einsparungen durch Substiution klar aufgezeigt werden. Im Projektverlauf wurde außerdem der Anteil an Ag_2O deutlich reduziert (auf den hier abgebildeten Zustand) um noch höhere Einflüsse durch den Katalysator zu vermeiden. Da der Katalysator später jedoch im Recycling-Prozess teilweise rückgewonnen werden kann, können die Impacts dessen im Gesamtkontext wieder reduziert werden.

Elektrolyt

Der genutzte Elektrolyt ist eine 7M Kalium-Hydroxid Lösung. Bei der Analyse der Impacts des Elektrolyten wurde das KOH als Hot-Spot identifiziert. Dieses liegt in allen Kategorien bei >99% der Ergebnisse. Eine Steigerung der Konzentration ist daher immer mit direkter Erhöhung der Impacts verbunden, da Wasser allgemein vergleichsweise geringe Einflüsse in den Wirkungskategorien aufzeigt.

Stromabnehmer Compound

Ein Stromabnehmer Compound zur Verwendung als Bipolarplatte in den Zink-Luft-Demonstratoren wurde beim Projektpartner Eisenhuth angefertigt. Dieser besteht aus verschiedenen Anteilen von Kupfer, synthethischem Graphit und Polymeren und wird schlussendlich zum Compound verpresst.

Die Ergebnisse des Compound-Vergleichs sind nachfolgend in Abbildung 9 dargestellt. Durch die unterschiedlichen Zusammensetzungen unterscheiden sich auch die LCA-Ergebnisse der Compounds. Zu erkennen ist, dass vor allem das Graphit deutlichen Einfluss auf das Ergebnis (z.B. Climate Change) nimmt. Damit führt die Reduktion des Graphit Gehalts auch zu einer deutlichen Reduktion des Ergebnisses in der CC-Kategorie. Auch das Kupfer spielt eine bedeutende Rolle, weswegen das PPG84CU100 Compound in einigen Kategorien am höchsten abschneidet, weil es den höchsten Kupfer-Anteil hat.

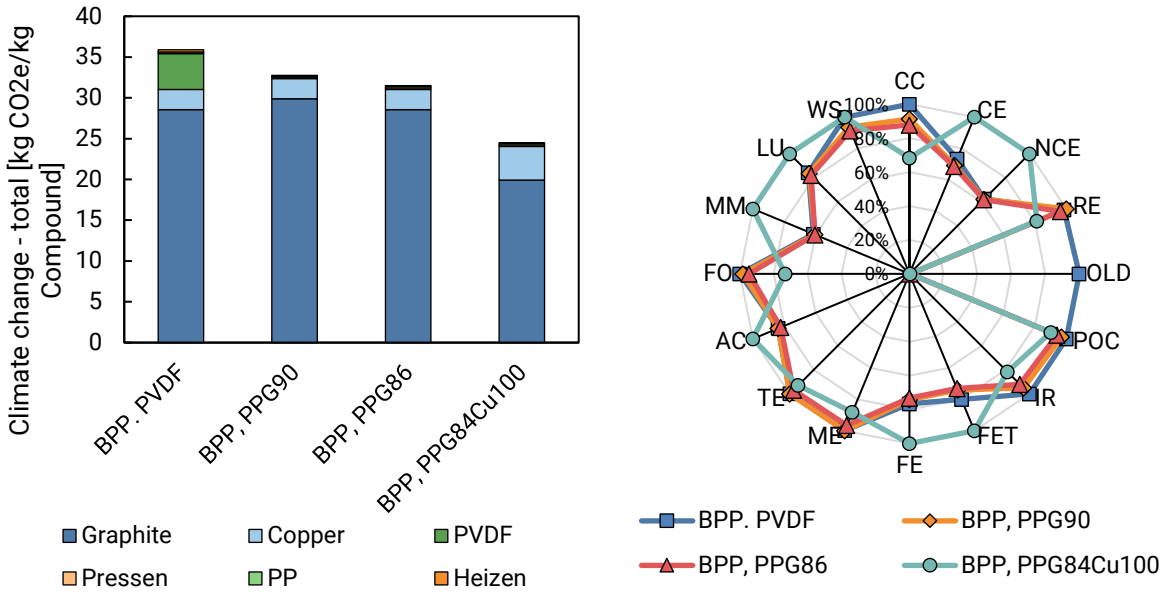

Abbildung 9: Vergleich der Compound-Varianten

Abbildung 10 untersucht das PPG84Cu100 Compound erneut detaillierter. Dabei ist im linken Teil zu erkennen, dass Kupfer und Graphit die Ergebnisse auch in den anderen Kategorien deutlich dominiert. In der rechten Darstellung ist der Einfluss der Szenarien zu erkennnen. Dabei ist im Initial-Szenario das Ergebnis ohne die Optimierungsannahmen beim Energieverbrauch dargestellt. Auch hier sind die Hot-Spots nachwievor die Rohstoffe, dennoch spielt die Elektrizität eine bedeutendere Rolle als nach der Optimierungsannahme. Im 3. Balken wurde das Ergebnis analysiert, wenn statt synthethischem Graphit natürliches Graphit verwendet werden würde. Diese Maßnahme senkt das Ergebnis in der Kategorie CC erneut deutlich und bildet daher eine eindeutige Einsparmaßnahme um die CO2-Emissionen des Compounds deutlich zu reduzieren.

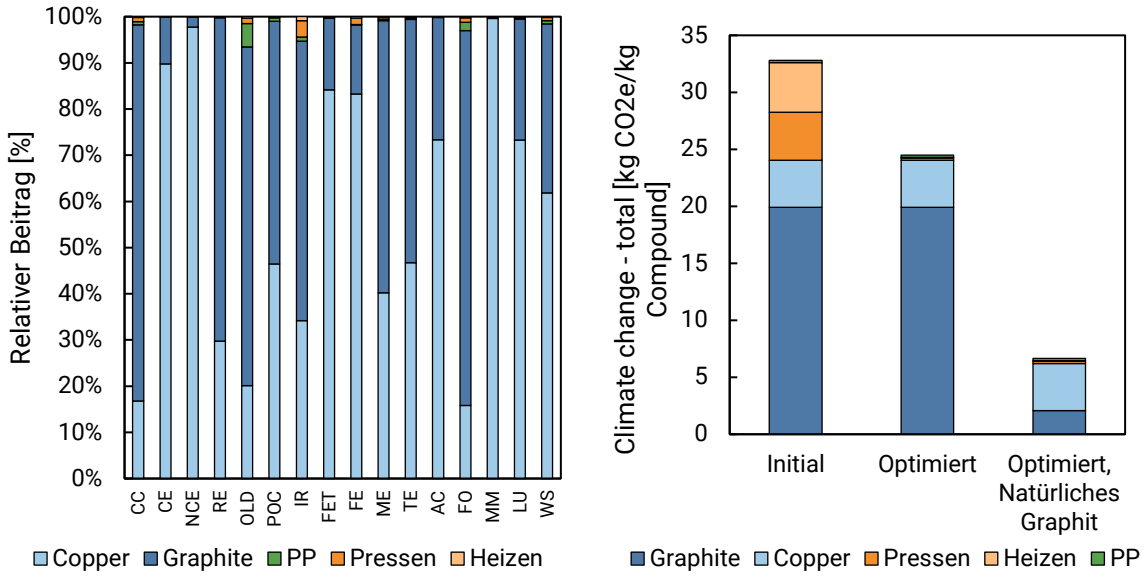

Abbildung 10: Analyse des PPG84Cu100-Compounds

Demonstrator-Bau

Die bereits beschriebenen Komponenten wurden im Projektverlauf zu Einzel-Zellen und diese anschließend in einen Stack verbaut. Insgesamt wurden 4 Demonstratoren gefertigt. Deren Zusammensetzung ist nachfolgend dargestellt und wurde vom Projektpartner Universität Duisburg-Essen zur Verfügung gestellt.

Demonstrator 1 (D1) ist aus einem Anoden-Slurry mit unbeschichtetem Zinkpulver aufgebaut. Ergänzt wird er durch eine unbeschichtete Luftelektrode, einen zusätzlich integrierten Separator sowie die weiteren zuvor beschriebenen Komponenten.

Demonstrator 2 (D2) entspricht in seinem Aufbau D1, verwendet jedoch die bei Rhenotherm beschichtete Luftelektrode und damit eine vollständige MEA. Der zusätzliche Separator bleibt auch hier weiterhin Bestandteil des Systems.

In Demonstrator 3 (D3) kommt erneut eine unbeschichtete Luftelektrode zum Einsatz. Im Unterschied zu D1 und D2 ist das Zinkpulver in diesem Fall jedoch mit einer Glasbeschichtung versehen.

Demonstrator 4 (D4) ist wiederum identisch zu D1, enthält jedoch als Stromabnehmer ein Compound-Material anstelle von Kupfer.

Betrachtet man nun die Cradle-to-gate-Ergebnisse, also ohne Recycling, (z.B. für CC), wie in Abbildung 11 dargestellt, ist deutlich zu erkennnen, dass sich D1-D3 nur geringfügig voneinander unterscheiden. Der zusätzliche Einbau der Rhenotherm Beschichtung oder des Glases erhöht die jeweiligen Beiträge zwar, allerdings nur geringfügig. Die Integration des Compounds als Stromabnehmer statt reinem Kupfer, vergößert den Beitrag des Abnehmers jedoch deutlich.

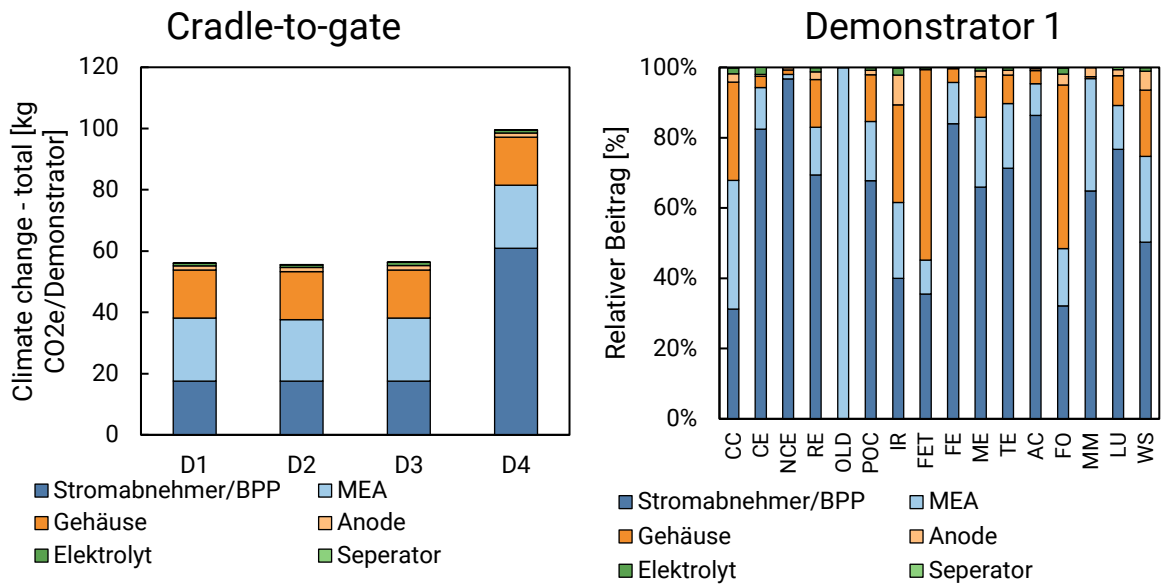

Abbildung 11: Cradle-to-gate Ergebnisse der 4 Demonstratoren pro Demonstrator (links) und relative Beiträge der Bauteile zu allen Wirkungskategorien von Demonstrator 1 (rechts)

In der rechten Grafik von Abbildung 11 wird deutlich, dass der Stromabnehmer (hier Kupfer) als deutlicher Hot-Spot identifiziert werden kann. Daher ist eine deutliche Reduktion der genutzten Menge dringend zu empfehlen. Die im Labor hergestellten Demonstratoren sind jedoch noch nicht im Hinblick auf die genutzte Menge des Stromabnehmers optimiert, wodurch dieses Einsparpotential noch nicht ausgeschöpft ist. Der hohe Beitrag der Luftelektrode zur Kategorie *Ozone Layer Depletion* ist auf das genutzte PTFE im Binder zurückzuführen.

Da jedoch die Variationen D2 ,D3 und D4 zu deutlichen Zunahmen in der Zyklenstabilität der Demonstratoren gezeigt haben, ist es von Bedeutung dies ebenfalls zu berücksichtigen. Dafür wurde die nun folgende Analyse, basierend auf 1 kWh abgegebener Energie (über die gesamte Lebensdauer des Demonstrators), durchgeführt.

Die Demonstratoren haben eine Kapazität von 100 Ah und eine mittlere Zellspannung von 2V erreicht. Die erreichten Zyklenzahlen sind: 34 (D1); 118 (D2); 108 (D3) und 108 (D4). Durch das Erreichen höherer Zyklenzahlen, sinken die Impacts des Demonstrators rechnerisch, da er über die Lebensdauer insgesamt mehr Energie liefert. Dafür wurden die Ergebnisse durch die gelieferten 0,2 kWh und die erreichten Zyklenzahlen geteilt. Dies führt zu den in Abbildung 12 dargestellten Ergebnissen.

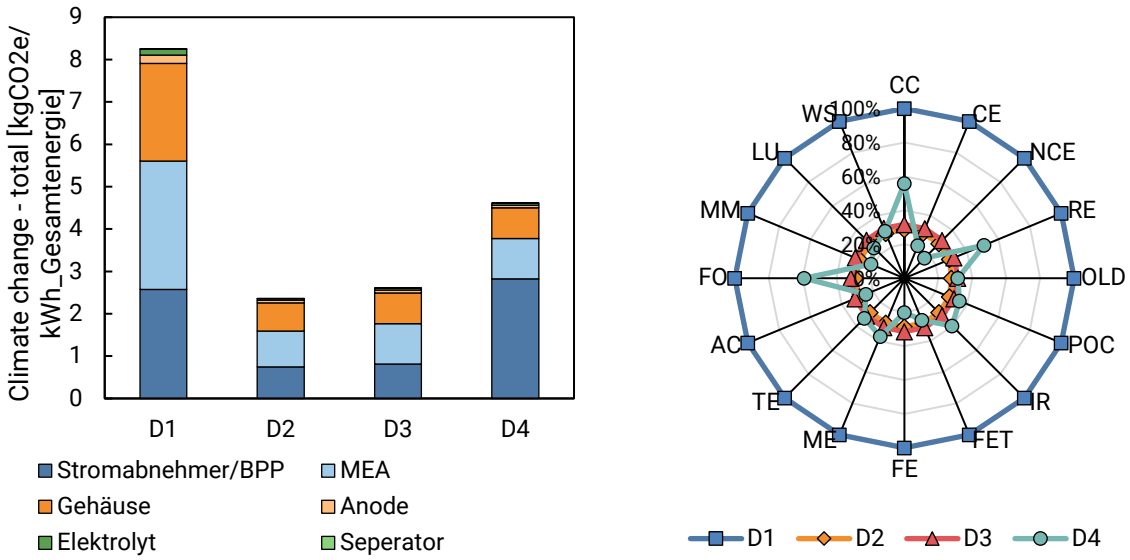

Abbildung 12: Vergleich der Ergebnisse der Demonstratoren (cradle-to-gate) bei Berücksichtigung der erreichten Zyklenzahlen, absolut für CC (links) und relativ (rechts) für alle untersuchten Wirkungskategorien

Dabei ist deutlich zu erkennnen, dass D2-D4 allesamt zu einem geringeren Ergebnis führen, als D1. Das bedeutet, dass der Einbau von den zusätzlichen Komponenten (Beschichtung, Glas oder Compound) zwar, wie in Abbildung 11 zu sehen, zu zunächst höheren Emissionen auf Bauteil-Ebene führen, durch die signifikante Verbesserung der Performance (erreichen von mehr Zyklen) dennoch ein reduzierter Umwelteinfluss erzielt wird, als in Abwesenheit dieser Bauteile.

Insgesamt zeigt damit D2, der Demonstrator mit Rhenotherm Beschichtung, dem Kupfer-Stromabnehmer und ohne Glas-Beschichtung, neben der höchsten erreichten Zyklenzahl auch im Carbon Footprint die geringsten Ergebnissen. D4 zeigt auf Grund des Compound-Einflusses weiterhin die höchsten Ergebnisse aus D2-D4.

Recycling

Zur Modellierung für die Ökobilanz sind die benötigten Stoff- und Energieströme der Schritte nötig. Da Accurecs Recyclingsuntersuchungen im kleinen Maßstab untersucht wurden, basieren die benötigten Aufwände auf Abschätzungen. Für die Vorbehandlung hat der Projektpartner Erfahrungswerte aus dem großskaligen Maßstab zur Verfügung gestellt.

Der Recyclingprozess ist in Abbildung 13 schematisch dargestellt. Zunächst wird der geschraubte Stack demontiert. Durch die Schraubverbindung, lassen sich die Schrauben und die genutzten Abschlussplatten vollständig und zerstörungsfrei demontieren, so dass diese wiederverwendet werden können und dementsprechende Gutschriften entstehen.

Der Recyclings Prozess beinhaltet eine Vorbehandlung (Waschen, Zerkleinern, Klassieren, …) eine Zink-Rückgewinnung mittels Destillation, der pyrolytischen Behandlung von MEA und Compounds sowie der optionalen Elektrolyt-Rückgewinnung.

Bei der Zink-Destillation wird Aktivkohle zur Reduktion zugegeben und thermische Energie zum Aufheizen und Verdampfen der Zinkfraktion benötigt. Die Aktivkohle wird zu CO_2 umgesetzt, Zink rückgewonnen und ein Destillationsrückstand verlässt den Prozess abfallseitig. Der Energiebedarf der Destillation wurde für die Erwärmung von Zink und den

beiden Phasenübergängen (Fest → Flüssig → Gasförmig) thermodynamisch (C_p= 0,385 kJ/(Kg*K) [13]; $H_{Schmelz}$= 100 kJ/kg [14]; $H_{Verdampfung}$= 115 kJ/kg [15]) ermittelt. Accurec konnte in den Recyclings Versuchen ermitteln, dass das Verfahren nach durchlaufener Optimierungsphase Recyclingraten von 95% für Zink erreichen kann.

Bei der Pyrolyse werden zusätzliche Hilfsstoffe zugegeben, Kupfer & Graphit (aus dem Compound) Nickel, Carbon Black und Katalysator (aus der MEA) rückgewonnen. Vorhandene Organik verlässt das System als Kohlenstoffdioxid. Die Energie- und Materialaufwände des Pyrolyse-Schritts wurden von Accurec zur Verfügung gestellt.

Bei der optionalen Abwasserbehandlung zur Rückgewinnung des Elektrolyts wird die Flüssigkeit eingedampft, um die ursprüngliche Konzentration wiederherzustellen. Dafür ist thermischer Aufwand zum Verdampfen nötig, dieser Wert wurde anhand der thermodynamischen Eigenschaften von Wasser errechnet. Wird dieser Schritt nicht durchgeführt, ist das Abwasser des Waschschrittes als Abwasser modelliert.

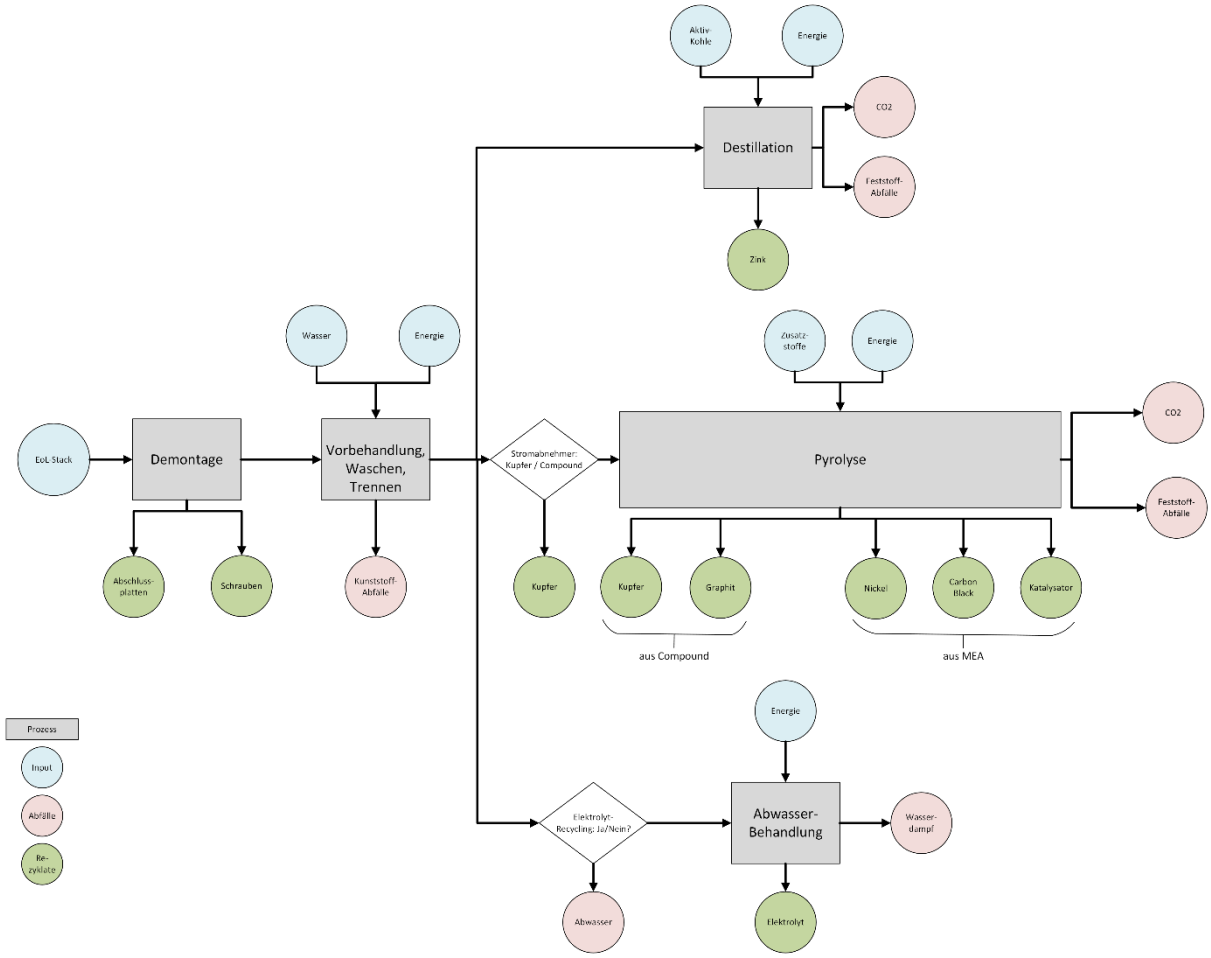

Abbildung 13: Graphische Zusammenfassung des modellierten Recyclingprozesses

Wie erkenntlich, wurde das Ökobilanz-Modell mit verschiedenen Optionen (mit weißen Rauten gekennzeichnet) aufgebaut. Zunächst ist es davon abhängig, ob der Stack einen Stromabnehmer aus Compound oder Kupfer beinhaltet. Das Compound wird im Rahmen der Pyrolyse recycelt, während das Kupfer diesen Schritt nicht durchläuft. Das Abwasser des Waschschrittes kann ggf. verarbeitet werden und der Elektrolyt rückgewonnen werden. Dieser Schritt ist optional im Modell mit aufgenommen. Die aus dem Recyclingsprozess rückgewonnenen Wertstoffe sind in grün dargestellt. Diese sorgen für Gutschriften, da deren

Primärherstellung durch die Anwesenheit der rückgewonnenen Materialien entfällt, und dienen zur Bewertung des Recyclingprozesses.

Accurec hat zur Modellierung erzielbare Recyclingraten, basierend auf den getätigten Versuchen, der einzelnen Wertströme zur Verfügung gestellt. Diese dienen im Modell als Grundlage um die rückgewonnenen Outputs aus den im Zink-Luft-Stack enthaltenen Materialien zu errechnen. Die genutzten Recyclingraten sind nachfolgend dargestellt.

Das Ergebnis in der Kategorie Climate change – total pro kg recyceltem Demonstrator ist in Abbildung 14 dargestellt. Dabei ist erkenntlich, dass vor allem durch die Rückgewinnung des Kupfers (Stromabnehmer) hohe Gutschriften erzielbar sind. Dies ist erneut damit zu begründen, dass die verbauten Kupfer-Mengen im Demonstrator noch nicht optimiert und sind. Dadurch ist viel Kupfer verbaut, von welchem ebenso große Teile (99%) wieder rückgewonnen werden können und damit für Gutschriften sorgen. Schrauben und Endplatten spielen ebenso eine große Rolle. Durch die gewählte Zusammenbauart des Stacks (Schraubverbindungen) sind diese zerstörungsfrei rückgewinnbar. Da diese im Aufbau große Massenanteile ausmachen, werden entsprechend viele Gutschriften erzielt. Durch die hohen Emissionen bei der Herstellung des Katalysators führt auch dessen Rückgewinnung (mit einer angenommenen Recyclingrate von 95%) zu hohen Gutschriften, obwohl im Vergleich zu anderen Bauteilen vergleichsweise geringe Massen an Katalysator enthalten sind. Da Zink als Material ohnehin niedrige Emissionen verursacht, führt auch die Rückgewinnung dessen zu vergleichsweise geringen Gutschriften.

Im rechten Diagramm ist zudem der Einfluss der Elektrolyt-Rückgewinnung dargestellt. Insgesamt kann geschlussfolgert werden, dass (unter den vorliegenden Annahmen) durch das zusätzlich Elektrolyt-Recycling Gutschriften erzielt werden können, welche die Aufwände des zusätzlichen Schrittes übertreffen und es damit sinnvoll erscheint diese Rückgewinnung ebenfalls durchzuführen. Anzumerken ist, dass diese Rückgewinnung hier stark vereinfacht kalkuliert und modelliert wurde (Energieaufwand= Thermischer Aufwand des Eindampfens, Annahme, dass Elektrolyt-Qualität ansonsten unverändert ist). Durch die Integration von genaueren Informationen oder die Notwendigkeit weiterer Aufbereitungsschritte, könnte das Elektrolyt-Recycling ggf. auch anders bewertet werden. Insgesamt fällt diese zusätzliche Rückgewinnung nicht signifikant ins Gewicht, da die Haupt-Gutschriften weiterhin aus dem Kupfer, Schrauben + Endplatten bzw. dem Katalysator-System stammen.

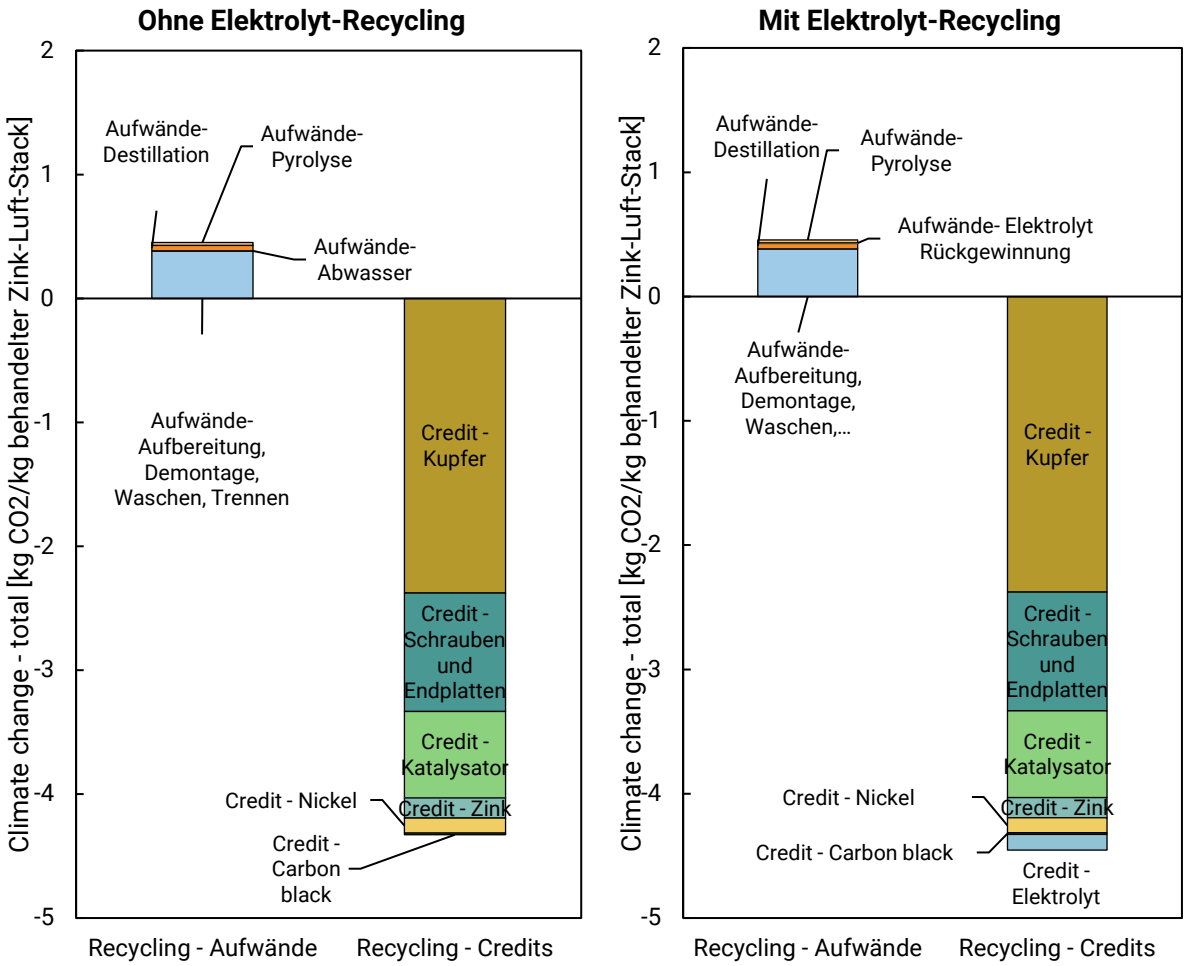

Abbildung 14: Climate change - total Ergebnisse für Recycling des Demonstrators 2 - mit (links) und ohne (rechts) Elektrolyt-Recycling

Insgesamt zeigt der Recycling-Prozess (in beiden Fällen) ein Netto negatives Ergebnis, in allen betrachteten Wirkungskategorien (Betrag der Credits > Aufwände), was das Fazit zulässt, dass der Prozess aus ökologischer Perspektive als sinnvoll einzuordnen ist.

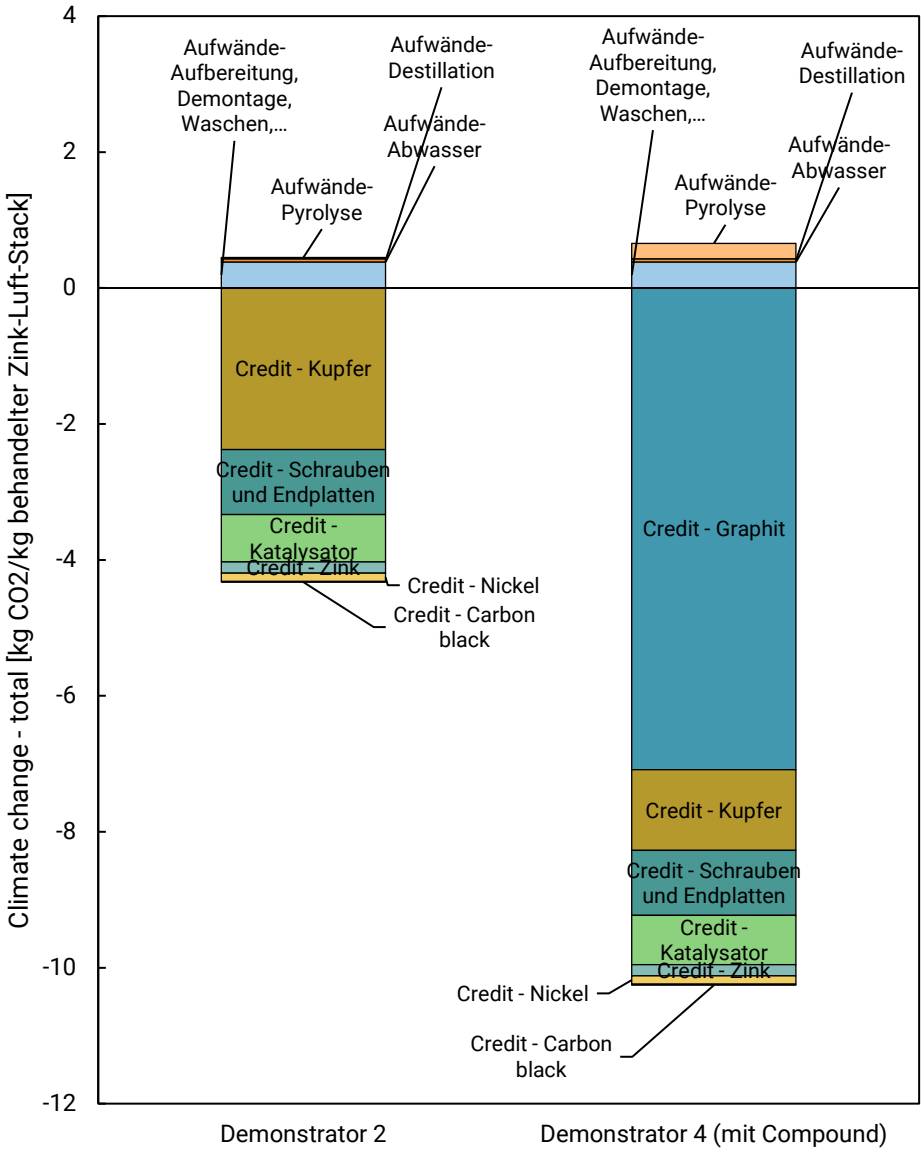

Abbildung 15: Vergleich des Recyclings von Demonstrator 2 (Kupfer Stromabnehmer) und Demonstrator 4 (Compound)

Abbildung 15 zeigt das Ergebnis vergleichend zu D2, wenn ein Demonstrator (D4) mit Compound-Stromabnehmer recycelt wird. Da in Anwesenheit des Compounds, wie bereits beschrieben, der Masseninput in die Pyrolyse steigt, steigen ebenso die Aufwände des Pyrolyse-Schrittes an. Klar erkenntlich ist aber vor allem, dass das rückgewonnene Graphit sehr hohe Gutschriften erzielt. Dies liegt an dem hohen Emissionsfaktor und dem vergleichsweise hohen eingesetzten Gewicht an Graphit (~ 42 Gew.-% des Compounds). Dieser hohe Einfluss des Graphits ist auch schon in Abbildung 11 erkenntlich.

AP13-3: Ökobilanz und Vergleich zum Stand der Technik

Ergebnisse der Zink-Luft-Stacks

Betrachtet man nun alle bereits beschriebenen Komponenten (Anode, Kathode, MEA, Elektrolyt, Gehäuse, Separator, ...) und Lebenszyklusphasen (Herstellung der Demonstratoren und Recycling) ergeben sich für die produzierten Zink-Luft-Stacks folgende Ergebnisse.

Tabelle 3: Ergebnisse der Demonstratoren für FE= 1 kWh, abgegeben über die gesamte Lebensdauer der Prototypen (Berücksichtigung von Kapazität und Zyklenzahl)

Inputs	Demonstrator 1	Demonstrator 2	Demonstrator 3	Demonstrator 4	Einheit
Climate change - Total	4,11E+00	1,17E+00	1,31E+00	1,41E+00	kg CO2-Eq
Carcinogenic effects - Total	3,19E-09	8,98E-10	1,03E-09	9,86E-10	CTUh
Non-carcinogenic effects – Total	4,98E-08	1,43E-08	1,65E-08	1,27E-08	CTUh
Respiratory effects. inorganics	6,97E-08	2,00E-08	2,33E-08	2,39E-08	Disease incidences
Ozone layer depletion	4,96E-05	1,38E-05	1,56E-05	1,56E-05	kg CFC-11-Eq
Photochemical ozone creation	6,49E-03	1,89E-03	2,12E-03	2,25E-03	kg NMVOC-Eq
Ionizing radiation	1,93E-01	5,54E-02	6,48E-02	7,36E-02	kBq U235-Eq
Freshwater ecotoxicity - Total	3,59E+02	1,04E+02	1,13E+02	1,13E+02	CTUe
Freshwater eutrophication	7,95E-04	2,29E-04	2,59E-04	2,85E-04	kg P-Eq
Marine eutrophication	1,80E-03	5,18E-04	5,87E-04	6,19E-04	kg N-Eq
Terrestrial eutrophication	1,66E-02	4,77E-03	5,45E-03	5,63E-03	mol N-Eq
Freshwater and terrestrial acidification	1,02E-02	2,94E-03	3,40E-03	3,21E-03	mol H+-Eq
Fossils	3,24E+01	9,46E+00	1,05E+01	1,18E+01	MJ
Minerals and metals	9,71E-05	2,73E-05	3,59E-05	2,65E-05	kg Sb-Eq
Land use	6,68E+00	1,93E+00	2,37E+00	2,17E+00	points
Water scarcity	7,33E-01	2,11E-01	2,62E-01	2,56E-01	m3 world-Eq deprived
Kapazität	0,2				kWh
Zyklen	34	118	108	108	#

Abbildung 16 stellt eine graphische Darstellung der Ergebnisse dar.

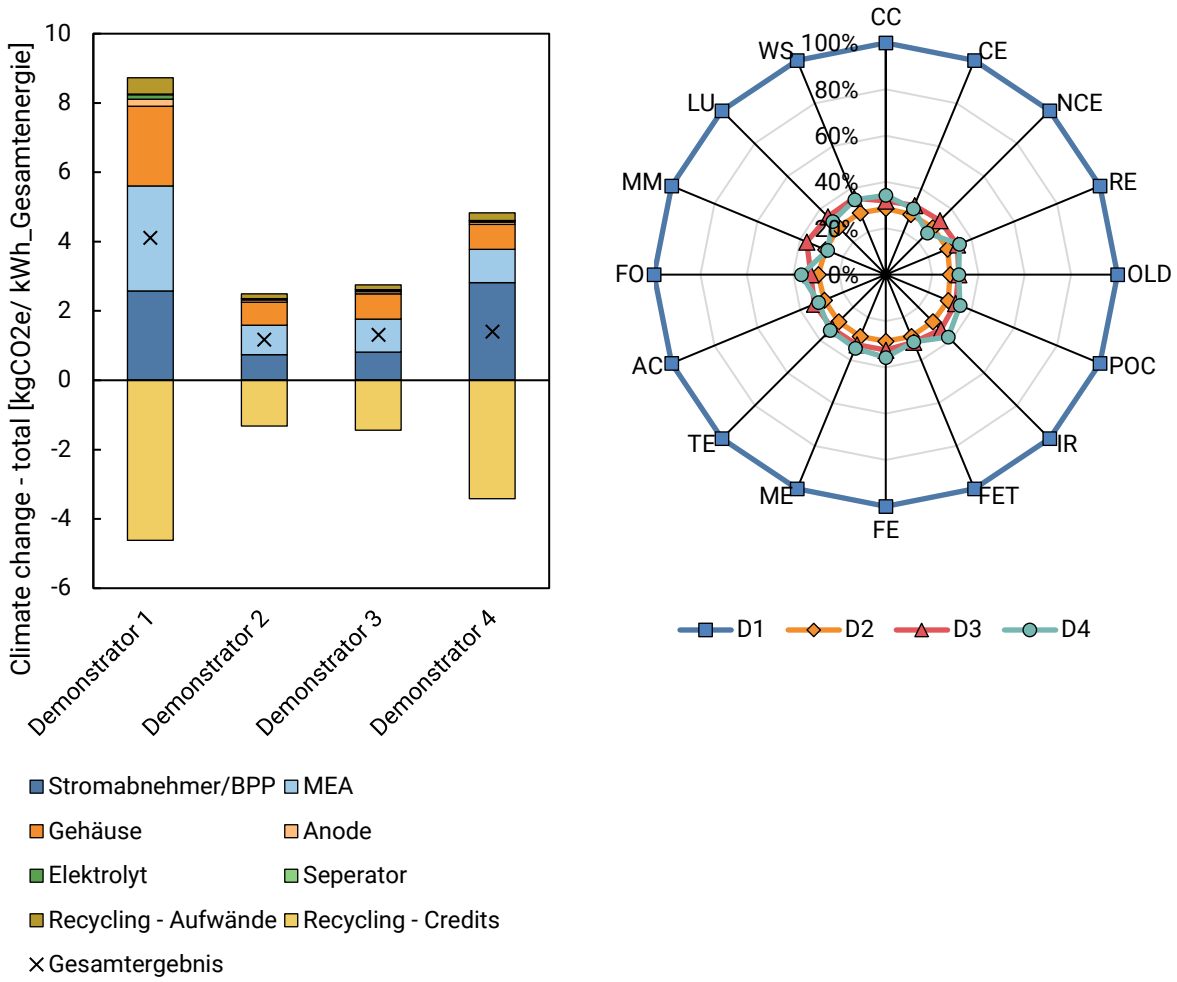

Abbildung 16: Vergleich der Demonstratoren in der Kategorie CC (absolut, links) und in den weiteren Kategorien (relativ, rechts)

Bei der Analyse der in Abbildung 16 dargestellten Ergebnisse zeigt sich, dass Demonstrator 1 die höchsten Umweltwirkungen aufweist. Dies gilt sowohl für die Wirkungskategorie „Climate Change (CC)“ als auch für alle weiteren betrachteten Kategorien. Hauptursache ist die deutlich geringere erreichte Zyklenzahl. Da Demonstrator 1 nur 34 Zyklen erreicht, müssen über die Nutzungsdauer mehr Einheiten eingesetzt werden, um kumulativ 1 kWh Energie bereitzustellen. Dadurch steigt der Materialbedarf für sämtliche Komponenten, was zu erhöhten Umweltwirkungen in der Herstellungsphase führt. Gleichzeitig erhöhen die größeren eingesetzten Massen die potenziell rückgewinnbaren Materialmengen. Infolgedessen steigen auch die im End-of-Life-Modell angesetzten Recycling-Gutschriften, was netto zum beobachteten Gesamtbild beiträgt.

Die Ergebnisse der übrigen drei Demonstratoren sind insgesamt vergleichbar. Demonstrator 4 weist zwar deutlich erhöhte Umweltwirkungen durch den Stromabnehmer, in diesem Fall das Compound, auf. Gleichzeitig ermöglicht die Anwesenheit und Rückgewinnung des Grafits jedoch höhere Recyclinggutschriften als bei Demonstrator 2 oder 3. Dadurch ergeben sich netto wieder Werte, die in einem ähnlichen Bereich wie bei Demonstrator 2 und 3 liegen. Ungeachtet dessen zeigt Demonstrator 2, also der Demonstrator mit RHE-Beschichtung, in nahezu allen Wirkungskategorien die geringsten Ergebnisse. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die zusätzliche Beschichtung nur geringe zusätzliche Umweltwirkungen in der

Herstellungsphase verursacht, während die Alternativen bei Demonstrator 3 (Glas) und Demonstrator 4 (Compound) deutlich höhere Beiträge aufweisen. Zugleich konnten bei Demonstrator 2 die höchsten Zyklenzahlen erreicht werden, was sich zusätzlich vorteilhaft auf die bilanzierten Ergebnisse auswirkt.

Betrachtet man nun die „Netto-Ergebnisse“ also die Impacts der einzelnen Komponenten abzüglich der rückgewonnenen Credits, ergeben sich die in Abbildung 17 dargestellten Ergebnisse.

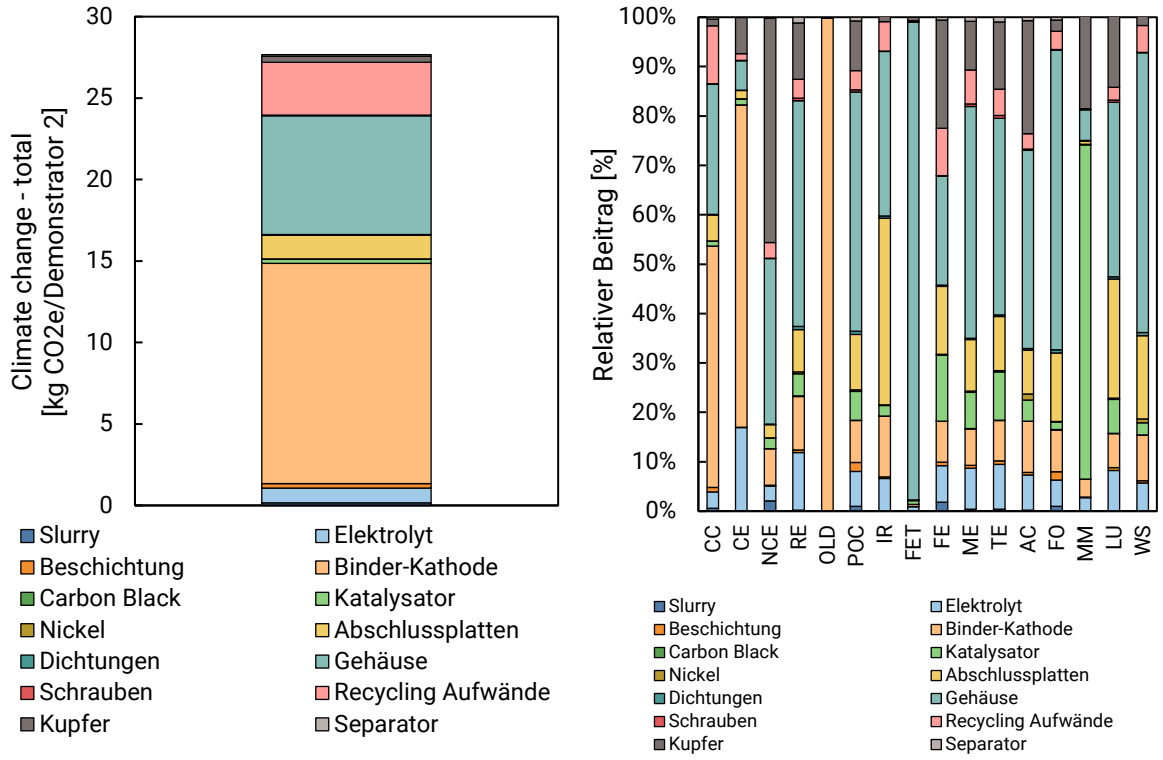

Abbildung 17: Netto-Ergebnisse von Demonstrator 2, absolut für CC (links) und relativ für alle Wirkungskategorien (rechts)

Dabei ist deutlich erkenntlich, dass die Komponenten, welche nicht rückgewonnen werden können (z.B. der Kathoden-Binder PVDF, das 3D-Druck Harz des Gehäuses) die Netto-Ergebnisse dominieren. Das zeigt, dass der Einsatz von emissionsärmeren Kunststoffen oder deren Recycling nötig wären, um die Ergebnisse weiter zu verringern. Hervorzuheben ist ebenfalls der nach wie vor relativ hohe Beitrag von Kupfer in vereinzelten Wirkungskategorien, obwohl 99% davon recycelt werden können. Dennoch ist der verbliebende Kupfer-Bedarf (1%) noch immer für 59% bspw. der Kategorie NCE verantwortlich, da Kupfer vor allem in dieser Kategorie sehr hohe Umwelteinflüsse zeigt. Verbliebene Impacts der Abschlussplatten, welche vollständig rückgewonnen werden, resultieren aus dem gewählten Modellierungsansatz. Die Gutschrift der Abschlussplatten wurde lediglich mit dem Datensatz des PP-Materials errechnet, jedoch nicht mit der rohstoffseitig integrierten Verarbeitung zur Platte (Spritzgussverfahren), um konservativ zu bleiben, falls der Kunststoff nicht wieder in der gleichen Form als Abschlussplatte wiederverwendet werden sollte, sondern anderen Verwendungsformen zugeführt wird. Da die Gutschrift-Ermittlung lediglich mit den jeweiligen Materialien, nicht jedoch mit deren Transportdistanzen (bspw. aus den „market“ Datensätzen von ecoinvent) berechnet wurde,

zeigen bspw. auch die Schrauben in den Netto-Ergebnissen noch minimale Beiträge, obwohl auch hier 100% Rückgewinnung angenommen wurden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Recycling in der Lage ist, einen relevanten Teil der eingesetzten Materialien mit hohen Recyclingraten zurückzugewinnen. Dadurch entstehen signifikante Einsparungen, die wesentlich zur Reduktion der Gesamtergebnisse beitragen. Da viele der verbauten Komponenten bislang noch nicht masseoptimiert sind, beispielsweise der Kupferstromabnehmer, fallen auch die daraus resultierenden Gutschriften entsprechend hoch aus. Gleichzeitig ist zu betonen, dass eine weitere Massenreduktion dieser Bauteile empfehlenswert bleibt, um hohe Umweltwirkungen in der Herstellungsphase zu vermeiden. Die Betrachtung der Netto-Ergebnisse zeigt zudem, dass die verbleibenden nicht rückgewinnbaren Bestandteile, vor allem Kunststoffe, weiterhin Potenzial zur Verbesserung der Ökobilanz der Stacks bieten. Dieses Potenzial könnte durch den Einsatz emissionsärmerer Kunststoffe, eine weitere Gewichtsreduktion oder eine zusätzliche Rückgewinnung dieser Materialien erschlossen werden.

Referenz-Modell und Recycling

Der Vergleich mit einem Referenzsystem wurde mit einer LFP-Zelle aus Ecoinvent und der modellierten Weiterverarbeitung zum Modul getätigt, um wie bei den Zink-Luft-Zellen ein System zu nutzen, das aus mehreren Zellen und Gehäuse besteht. Die zugrundeliegenden Informationen sind in Tabelle 4 enthalen und wurden der Datenbank entnommen.

Tabelle 4: Zusammensetzung des Referenz-LFP-Moduls

Input	Menge	Einheit	Datensatz
LFP-Zellen	0,93	kg	Ecoinvent v3.11 – battery cell, Li-ion, LFP (RoW)
Modul-Komponenten	0,07	kg	Ecoinvent v3.11 – battery module packaging, Li-ion (RoW)

Abbildung 18 fasst die Zusammensetzung des Moduls grafisch zusammen.

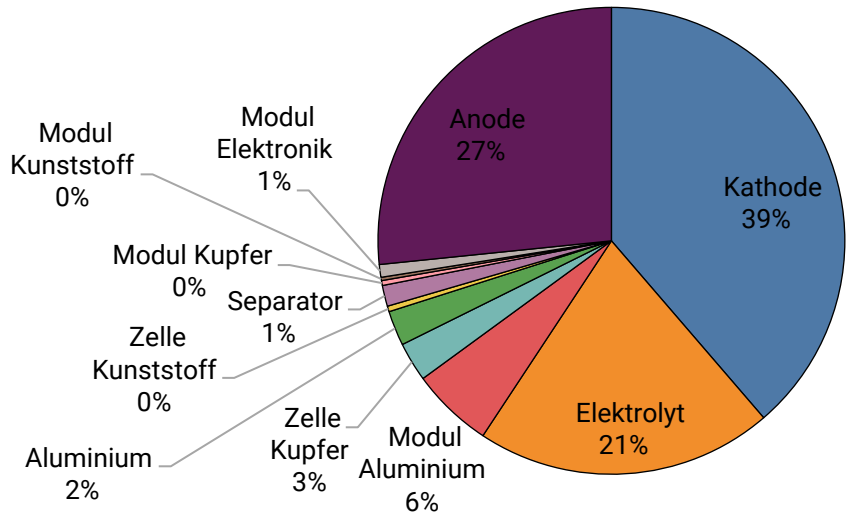

Abbildung 18: Konfiguration des Referenz-LFP-Modells nach ecoinvent

Da kein Recycling von LFP Batterien in ecoinvent enthalten ist, wurde dies basierend auf der Sachbilanz zur Behandlung von LIBs aus dem Regelwerk zur Berechnung des Carbon Footprints für Industrielle Batterien [22] der EU-Kommission modelliert.

Das Modul durchläuft demnach zunächst einen Demontageschritt. Dabei werden Aluminium und Kupfer-Bestandteile des Moduls rückgewonnen. Anschließend gehen die Zellen weiter in einen Prozess bestehend aus einem pyrometallurgischen und anschließend einem hydrometallurgischen Schritt. Die EU-Kommission gibt außerdem Rückgewinnungsraten für die einzelnen Inhaltstoffe an. Aus ökonomischen Gründen wird bei LFP-Zellen kein Aktivmaterial rückgewonnen, so dass ausschließlich Kupfer (mit Rückgewinnungsrate 90%) aus der Zelle rückgewonnen wird.

Tabelle 5: Demontage des LFP-Moduls

Input	Menge	Einheit	Datensatz
EoL Modul	1,00	kg	-
Outputs	**Menge**	**Einheit**	**Datensatz**
EoL Zellen	0,929	kg	-
Kunststoff Abfall	0,002	kg	Ecoinvent v3.11 – market group for waste plastic mixture (RER)
Elektronik Abfall	0,009	kg	Ecoinvent v3.11 – treatment of electronics scrap from control units (RER)
Rec. Kupfer	0,003	kg	Credit aus Ecoinvent v3.11 – market for copper, cathode (GLO); ohne Transporte
Rec. Aluminium	0,051	kg	Credit aus Ecoinvent v3.11 – market for aluminium, wrought alloy (GLO); ohne Transporte
Kupfer und Aluminium Verluste	0,006	kg	Ecoinvent v3.11 –treatment of inert waste, for final disposal (CH)

Tabelle 6: Pyrometallurgische Behandlung der LFP-Zellen nach [22]

Input	Menge	Einheit	Datensatz
EoL Zelle	0,929	kg	-
Elektrizität	1,152	kWh	Ecoinvent v3.11 - market for electricity, medium voltage (RER)
Prozesswärme	0,334	MJ	Ecoinvent v3.11 - market group for heat, district or industrial, natural gas (RER)
Prozesswärme	0,253	MJ	Ecoinvent v3.11 - heat, district or industrial, other than natural gas, heat and power co-generation, diesel, 200kW electrical, SCR-NOx reduction (CH)
Kalkstein, gewaschen	0,139	kg	Ecoinvent v3.11 – market for limestone, crushed, washed (CH)
Quarzsand	0,173	kg	Ecoinvent v3.11 – market for silica sand (GLO)
Branntkalk (CaO)	0,102	kg	Ecoinvent v3.11 – market for quicklime, milled, packed (RER)
Nasskalk ($Ca(OH)_2$)	0,009	kg	Ecoinvent v3.11 – market for hydrated lime, packed (RER)
Carbon black	0,001	kg	Ecoinvent v3.11 – market for carbon black (GLO)
Wasser	0,277	kg	Ecoinvent v3.11 – market group for tap water (RER)
Outputs	**Menge**	**Einheit**	**Datensatz**
Metalllegierung (für hydrom. Behandlung)	0,194	kg	-
Slag	0,884	kg	Ecoinvent v3.11 – treatment of inert waste, inert material landfill (CH)
Emissionen (alle Treibhausgase)	0,976	kg CO_2e	Carbon dioxide emission to air, unspecified

Tabelle 7: Hydrometallurgische Behandlung der LFP-Zellen nach [22]

Input	Menge	Einheit	Datensatz
Metalllegierung	0,194	kg	-
Elektrizität	2,405	kWh	Ecoinvent v3.11 - market for electricity, medium voltage (RER)
Prozesswärme	4,449	MJ	Ecoinvent v3.11 - market group for heat, district or industrial, natural gas (RER)
Salzsäure	0,007	kg	Ecoinvent v3.11 – market for hydrochloric acid, without water, in 30% solution state (RER)
Wasserstoffperoxid	0,254	Kg	Ecoinvent v3.11 – market for hydrogen peroxide, without water, in 50% solution state (RER)
Soda	0,016	kg	Ecoinvent v3.11 – market for soda ash, light (RER)
Natriumhydroxid	0,390	kg	Ecoinvent v3.11 – market for sodium hydroxide, without water, in 50% solution state (RER)
Schwefelsäure	0,780	kg	Ecoinvent v3.11 – market for sulfuric acid (RER)
Wasser	0,009	m³	Ecoinvent v3.11 – market group for tap water (RER)
Outputs	Menge	Einheit	Datensatz
Rückgewonnene Metallsalze	-	kg	-
Recyc. Kupfer	0,115	kg	Credit aus Ecoinvent v3.11 – market for copper, anode (GLO) ohne Transporte
Abwasser	0,008	m³	Credit aus Ecoinvent v3.11 – market for wastewater, average (Europe without Switzerland)

Die Berechnung der Credits wurde anhand der gegebenen Rückgewinnungsrate analog zur Berechnung bei der Zink-Luft-Batterie berechnet. Dafür wurde der Datensatz, der durch die Rückgewinnung ersetzt werden kann als Grundlage benutzt.

Für die spätere Berechnung der Ergebnisse pro über den gesamten Lebenszyklus abgegebenen kWh, wurde eine Zyklenzahl von 4000 angenommen. Die LFP-Zellen weisen nach Informationen aus ecoinvent eine Energiedichte von 0,159 kWh/kg auf. Durch das zusätzliche Gewicht der Modulbestandteile liegt die Energiedichte des Moduls bei 0,148 kWh/kg.

Vergleich mit State-of-the-Art Zellen

Der Vergleich der Zink-Luft (D2)- mit der dargestellten LFP-Batterie wurde wie bereits beschrieben auf Basis der über den gesamten Lebenszyklus abgegebenen Energie (unter Berücksichtigung der durchlaufenen Zyklenzahlen) durchgeführt. Der Vergleich im Ergebnis der Kategorie Climate change ist in Abbildung 19 dargestellt.

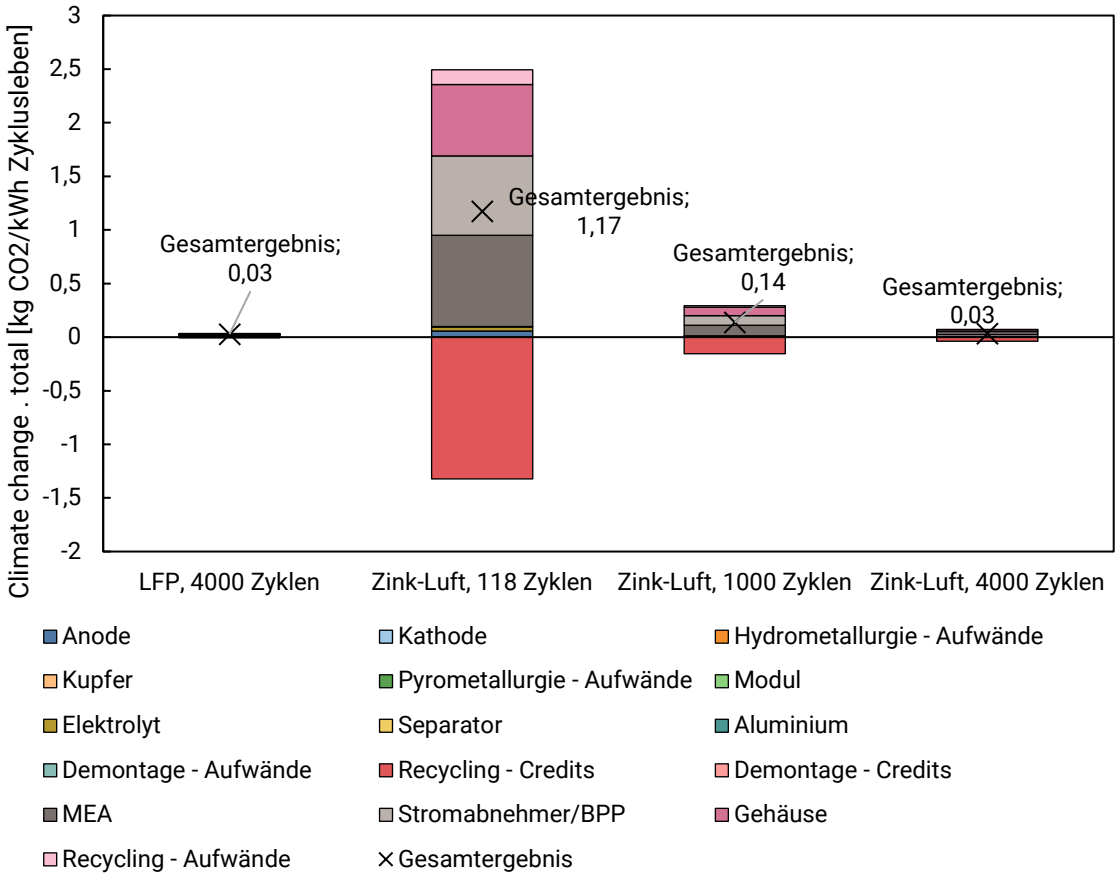

Abbildung 19: Vergleich des Climate change Ergebnisses des Referenzmodells mit dem Zink-Luft Modell bei Annahme verschiedener erreichbaren Zyklenzahlen

Dabei ist zu erkennen, dass die LFP-Batterie deutlich unter dem Ergebnis von Demonstrator 2 (mit 118 Zyklen) liegt. Dies lässt sich mit den deutlich geringeren Zyklenzahlen des Systems erklären. Bei der Annahme von 1000 erreichten Zyklen (wie ursprünglich im Projektantrag anvisiert) sinkt das Ergebnis deutlich, liegt aber immer noch um den Faktor >4 höher, als das LFP-System. Der letzte Balken zeigt das Ergebnis für die Annahme, dass die gleiche Zyklenzahl (4000) wie beim LFP-System erreicht wird. Dieser Vergleich, welcher als Potentialbewertung des Zink-Luft-Systems zu verstehen ist, ist auch nachfolgend in Abbildung 20 nochmal mit angepasstem Achsenausschnitt dargestellt.

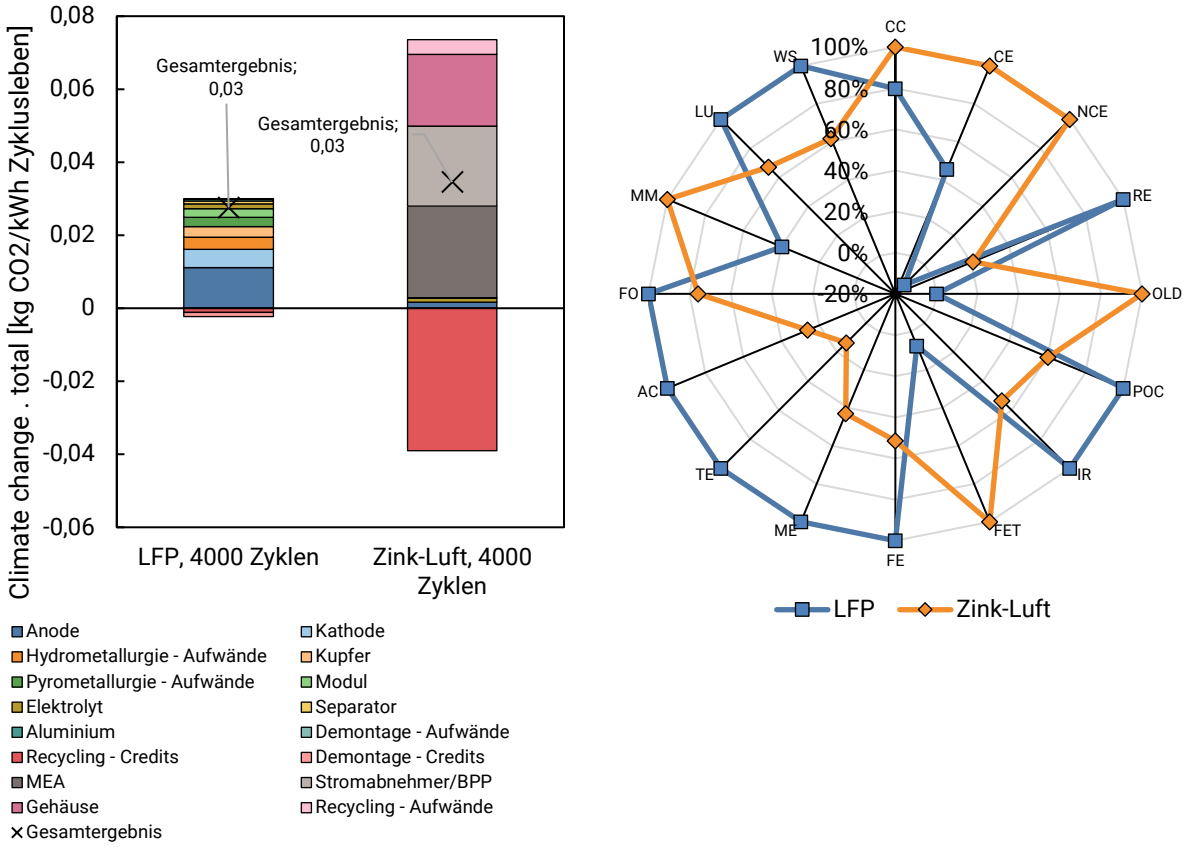

Abbildung 20: Potentialabschätzung: Vergleich von LFP mit Zink-Luft unter Annahme erhöhter Zyklenzahlen für die Zink-Luft-Batterie

Dabei ist zu erkennen, dass die Ergebnisse in der Kategorie CC vergleichbar sind. Im rechten Teil der Abbildung ist ebenfalls erkenntlich, dass das Zink-Luft System in einigen (9 von 16) Kategorien sogar niedrigere Ergebnisse als das LFP-System erzielen kann. Mit Verweis auf die bisher dargestellten Ergebnisse in diesem Bericht ist aber dennoch hervorzurheben, dass das umfangreiche Recycling der Zink-Luft-Batterie dringend nötig ist, um (selbst bei Annahme vergleichbarer Zyklenzahlen) konkurrenzfähige Ergebnisse zur LFP zu erzielen. Die aktuellen Zink-Luft-Demonstratoren müssten noch weitere Optimierung in Bezug auf die verwendeten Materialien (vor allem Stromabnehmer Kupfer) durchlaufen um auch ohne die Rückgewinnung vergleichbare Ergebnisse zu erzielen. Es ist ebenfalls anzumerken, dass die LFP-Batterie von lediglich geringen Rückgewinnungen aus dem Recycling profitiert, da nach der genutzten Datengrundlage als ökonomischen Gründen kaum Wertmaterialien aus den LFP-Zellen zurückgewonnen werden.

Zusammenfassung

Im Rahmen des Projekts ZinCycle wurden die Bestandteile des Zink Luft Stacks zunächst auf Komponentenebene mittels Screening Analysen detailliert untersucht. Bei diesen Untersuchungen wurden Submodelle entwickelt, die anschließend zu einem Gesamtmodell zusammengeführt wurden, um Aussagen auf Stackebene ableiten zu können. Ziel war es, die Umweltwirkungen der einzelnen Komponenten zu quantifizieren und daraus Optimierungsansätze abzuleiten. Zusätzlich wurden im Projektverlauf verschiedene

Ausführungsalternativen bewertet, um den Projektpartnern fundierte Entscheidungshilfen für die Weiterentwicklung der Zink-Luft-Batterie bereitzustellen.

Anode und Glasbeschichtung

Für die Anode lagen unterschiedliche Ausführungen mit und ohne Glasbeschichtung vor, die in den Demonstratoren eingesetzt wurden. Ohne Glasbeschichtung besteht der Slurry überwiegend aus Zinkpulver und Elektrolyt, wobei das Zinkpulver die Umweltwirkungen der Anode klar dominiert. Durch die zusätzliche Glasbeschichtung entstehen weitere Aufwände auf der Herstellungsseite. In den Screening Analysen zeigte sich, dass die zunächst eingesetzten Bismuth Gläser sehr hohe Umweltwirkungen verursachen. Im Projektverlauf wurden daher Alternativen untersucht. Eine Reduktion des Bismuth Anteils führte zu ersten Einsparungen. Alternativen wie Sol Gel Verfahren senken zwar die Ergebnisse in der Kategorie Climate change, erhöhen jedoch andere Wirkungskategorien deutlich. Die zuletzt genutzten Gläser auf Phosphor Basis zeigten im Vergleich zu den ursprünglichen Varianten klare ökologische Vorteile und sind daher, neben der verbesserten Performance, auch aus Umweltsicht zu empfehlen. Die spätere Stack Analyse unter Einbezug der performancebedingten Vorteile zeigte zudem, dass die zusätzlichen Impacts der Glasintegration durch die verbesserte Performance kompensiert werden, sodass sich geringere LCA-Ergebnisse pro kWh über den gesamten Lebenszyklus ergeben. Damit kann die Glasbeschichtung insgesamt als empfehlenswert bewertet werden.

Membran Elektroden Einheit (MEA)

Die MEA setzt sich aus der Luft Elektrode sowie der von Rhenotherm aufgebrachten Beschichtung zusammen. Auf Ebene der Luft Elektrode wurden als zentrale Hot Spots vor allem der Binder PTFE und der Silberoxid Katalysator identifiziert. Der Einsatz alternativer Binder wie PVDF oder PP sowie alternativer Katalysatoren wie Manganoxid zeigt ein hohes Einsparpotenzial und könnte die ökologische Verträglichkeit der Luft Elektrode deutlich verbessern. Im Projektverlauf wurde die eingesetzte Silberoxidmenge bereits deutlich reduziert, um den Einfluss zu begrenzen. Die Alternativen benötigen allerdings weiterhin Entwicklungsarbeit, bevor sie stacktauglich eingesetzt werden können. Sollte dies künftig aus Performancesicht möglich sein, ist ihr Einsatz aus ökologischer Sicht klar zu empfehlen. Für die Beschichtung der Luft Elektrode wurden zwei Polymervarianten betrachtet. Das fluorfreie PVB zeigte dabei deutlich niedrigere Umweltwirkungen in den untersuchten Kategorien und kann daher eindeutig empfohlen werden. Insgesamt trägt die MEA auf Cradle-to-gate Ebene relevant zu den Umweltwirkungen des Stacks bei. Die untersuchten Alternativen bieten somit konkrete Ansatzpunkte, die Umweltwirkungen der MEA weiter zu reduzieren.

Stromabnehmer, Compound und Massenoptimierung

Der betrachtete Stromabnehmer Compound verursacht aufgrund hoher Kupfer und Grafitanteile bislang erhebliche Umweltwirkungen. Eine Reduktion des Grafitgehalts konnte diese bereits verringern, dennoch bleibt eine Rückgewinnung der Bestandteile zur weiteren Reduktion empfehlenswert. Generell wird im Demonstratorbau noch mit hohen, nicht massenoptimierten Mengen an Gehäuse und Stromabnehmern gearbeitet. Dadurch ist der Stromabnehmer, sowohl in der Kupfer als auch in der Compound Variante, als deutlicher Hot Spot auf Stackebene zu identifizieren. Auch die eingesetzte Menge des 3D Druck Harzes liegt möglicherweise über der final notwendigen Menge und trägt entsprechend zu den

Herstellungsimpacts bei. Eine künftige Massenreduktion dieser Komponenten würde die Cradle to gate Ergebnisse deutlich verbessern.

Recycling und Nettoergebnisse

Die hohen Massen des Stromabnehmers führen im Recyclingmodell zu hohen erzielbaren Gutschriften. Kupfer beziehungsweise Compound erreichen im LCA-Modell die größten Credits, gefolgt von Abschlussplatten und Schrauben, die aufgrund der Schraubverbindungen zerstörungsfrei demontiert und zurückgewonnen werden können. Da Zink im Vergleich einen geringeren ökologischen Fußabdruck aufweist, übersteigen die Gutschriften der genannten Komponenten die Gutschriften aus der Zinkrückgewinnung. Der im LCA-Modell berücksichtigte Recyclingweg ist insgesamt in der Lage, große Teile des Stacks zurückzugewinnen und damit die Gesamtergebnisse signifikant zu reduzieren. Insbesondere Beiträge aus Katalysator, Kupfer und Grafit können durch deren Rückgewinnung deutlich gesenkt werden. Die Nettoergebnisse werden daher vor allem durch die nicht oder nur eingeschränkt rückgewinnbaren Bestandteile dominiert. Gleichzeitig ist zu berücksichtigen, dass die Ökobilanzierung des Recyclings auf mehreren Annahmen basiert und damit eine Potenzialanalyse darstellt, da Energieverbräuche und Rückgewinnungsraten aus hochskalierten Labortests oder Berechnungen abgeleitet wurden. Dennoch kann das Recyclingkonzept als vielversprechend bewertet werden.

Vergleich mit Referenzsystem

Abschließend wurden die Ergebnisse des Zink Luft Stacks mit einer Referenz LFP-Batterie verglichen. Auf Basis der bisher erreichten Performancedaten erzielt das Zink Luft System noch keine konkurrenzfähigen Ergebnisse gegenüber der LFP-Referenz. Hauptgrund ist die deutlich geringere Zyklenzahl. Szenarien mit Annahmen vergleichbarer Leistungswerte wie bei LFP zeigen jedoch, dass perspektivisch ähnliche Ergebnisse möglich sind und unterstreichen damit das Potenzial von Zink Luft Batterien als Alternative zu lithiumbasierten Systemen. Wenn die Performance in den kommenden Entwicklungsschritten weiter optimiert werden kann, zeigt die Zink Luft Batterie damit ein klares Potenzial, als echte Alternative zu Lithium-Ionen-Batterien zu gelten.

Dissemination des Projekts

Im Projektzeitraum erfolgte die Teilnahme an zwei Fachkonferenzen, die wesentliche Impulse für die Weiterentwicklung der Arbeiten im Bereich der Ökobilanzierung lieferten.

OpenLCA Konferenz 2025, Berlin, 10. - 11.04.2025

Poster mit dem Titel “Life cycle assessment of emerging zinc-based battery technologies: Hot-Spot analysis, challenges and comparison with lithium-ion batteries”

Auf der OpenLCA Konferenz wurde ein wissenschaftliches Poster zur LCA-Studie vorgestellt. Die Poster-Session ermöglichte einen intensiven fachlichen Austausch mit deutschen und internationalen Expertinnen und Experten. In mehreren vertiefenden Gesprächen wurden methodische Ansätze, Modellierungsstrategien und Anwendungsszenarien diskutiert, wodurch wichtige Anregungen für die Weiterentwicklung der eigenen methodischen Vorgehensweise gewonnen werden konnten. Das umfangreiche Vortragsprogramm bot

zudem einen breiten Einblick in unterschiedliche Modellierungs- und Bewertungskonzepte innerhalb der LCA-Community.

LCM 2025, Palermo, 09. - 12.09.2025

Vortrag mit dem Titel "Prospective Life Cycle Assessment of Emerging Battery Technologies and Recycling Pathways"

EurA war auf der 12th International Conference on Life Cycle Management (LCM 2025) in Palermo, Italien, vertreten. Die LCM-Konferenz gilt als eine der zentralen internationalen Plattformen für Lebenszyklusmanagement und Lebenszyklusanalysen und bringt Fachleute aus Wissenschaft, Industrie und Politik zusammen. Der diesjährige Schwerpunkt lag auf der wachsenden Bedeutung von LCA als strategischem Instrument für Innovation, Investitionsentscheidungen und nachhaltige Wertschöpfung.

Die fachlichen Diskussionen der Konferenz spiegelten mehrere übergreifende methodische und inhaltliche Trends wider. Deutlich wurde insbesondere der starke Fokus auf Kreislaufwirtschaft und Recycling: Zahlreiche Beiträge befassten sich mit der Frage, wie Recyclingprozesse in Ökobilanzen realistischer abgebildet werden können, etwa durch differenziertere Modellierung von Substitutionseffekten, Materialqualitäten und Marktentwicklungen. Parallel dazu rückten Mass-Balance- und Chain-of-Custody-Ansätze stärker in den Vordergrund, weil sie zunehmend als Grundlage für Produktzertifizierung und belastbare Product Carbon Footprints dienen. Weitere zentrale Themen waren die weiterhin anspruchsvolle Bilanzierung biogenen Kohlenstoffs, vor allem bei biobasierten Materialien, sowie die fortschreitende Digitalisierung der LCA, beispielsweise durch Digital Product Passports und interoperable Datenräume für eine dynamische Verfügbarkeit von Lieferkettendaten. Ergänzend zeigte sich ein klarer Trend zur erweiterten Nachhaltigkeitsbewertung im Sinne des Life Cycle Sustainability Assessment, in dem ökologische, ökonomische und soziale Wirkungen integriert betrachtet werden, um unternehmerische Entscheidungen im Kontext von CSRD und EU-Taxonomie besser zu unterstützen.

EurA trug mit der Präsentation über die Ökobilanzierung von Batterietechnologien zum Programm der Konferenz bei. Diskutiert wurden dabei insbesondere methodische Herausforderungen, die sich bei Technologien im Labormaßstab ergeben, etwa Datenlücken, Skalierbarkeit, Unsicherheiten zur Vergleichbarkeit und die Modellierung künftiger Recyclingrouten.
Neben dem wissenschaftlich-technischen Programm nutzte EurA AG die Konferenz gezielt zur Vernetzung mit relevanten Akteuren. Der Austausch mit Forschenden, Industrievertreterinnen und -vertretern sowie politischen Stakeholdern ermöglichte Einblicke in aktuelle Anforderungen an datenbasierte und gleichzeitig reviewfähige LCA-Workflows. Diese Impulse sind für die Weiterentwicklung methodischer Beratungskompetenz von hoher Relevanz, insbesondere in dynamischen Technologiefeldern wie Batterien, Elektromobilität und Kreislaufwirtschaft. Insgesamt bestätigte die LCM 2025 den Trend, LCA von einer primär retrospektiven Bewertungsmethode zu einem strategischen Entscheidungsinstrument in der nachhaltigkeitsorientierten Innovations- und Transformationspraxis weiterzuentwickeln.

Fortschreibung des Verwertungsplans

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

- Im Projekt entstandenes Know-how zur ökologischen Bewertung von Zink-Luft-Batteriekomponenten und dem Recyclingverfahren kann in zukünftigen Projekten oder Dienstleistungen strategisch genutzt werden.
- Bereits während der Projektlaufzeit konnten erste Verwertungserfolge in Form von Industrieaufträgen erzielt werden. Für den Projektpartner Grillo wurden an mehreren Standorten Product Carbon Footprint Studien für verschiedene Produkte durchgeführt, die auf unternehmensspezifischen Primärdaten basierten. Diese Aufträge gingen in ihrer Detailtiefe deutlich über den Projektumfang hinaus. Die im Projekt aufgebaute und verfügbare Expertise ermöglichte eine fachgerechte Bearbeitung der Studien. Die anschließende externe Verifizierung der ermittelten Carbon Footprints wurde jeweils erfolgreich bestanden.
- Wir befinden uns derzeit im Austausch zu einem weiteren Industrieprojekt im Bereich metallischer Wertschöpfungsketten mit internationalen, außereuropäischen Stakeholdern, das wir auf Basis der im Projekt gewonnenen Erfahrungen mit Zink akquirieren konnten. Ausschlaggebend hierfür waren insbesondere die aufgebauten Kompetenzen bei der Ökobilanzierung von metallischen Wertschöpfungsketten. Durch die Projektarbeit konnten wir unsere Fachkundigkeit in diesem Themenfeld vertiefen und möchten diese Positionierung auch künftig strategisch für die Akquise und Bearbeitung weiterer Vorhaben nutzen.

Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten

- 1 – 2 Jahre nach Projektende: Aufbau von Expertise im Bereich Batteriefertigung und Batterierecycling führt zu fundierter und schnellerer ökologischer und ökonomischer Bewertung von industriellen Batterien für den Europäischen Markt. Hauptvorteil für den Standort Deutschland ist Beratungsmöglichkeit von Unternehmen in Bezug auf die Battery Regulation, Carbon Footprint Berechnung nach Battery Regulation, Batterierecycling
- 2-4 Jahre nach Projektende: Positionierung als Experte am Markt im Bereich ökologischer Bewertung von Batterien

Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

- Das Vorhaben hat die EurA AG in ihrer fachlichen und methodischen Kompetenz im Batterie- und Speicherbereich weiter gestärkt. Durch die Projektarbeit konnten zusätzliche Erfahrungen und verwertbare Erkenntnisse zu nachhaltiger Batterieproduktion und Recycling aufgebaut und in die ökologische Bewertungs- sowie Beratungsexpertise integriert werden.
- Auf dieser Basis wurde die Weiterentwicklung und perspektivische Erweiterung des Dienstleistungsportfolios im Bereich Technologie- und Innovationsberatung unterstützt. Gleichzeitig verbessert der Kompetenzzuwachs die Positionierung der EurA AG als qualifizierter Partner für künftige, insbesondere europäische, Fördervorhaben in den Themen Sustainability Assessment, Circular Economy und Batteries, die auch langfristig hohe Relevanz behalten.

Literatur

[1] The Advanced Rechargeable & Lithium Batteries Association, „PEFCR - Product Environmental Footprint Category Rules for High Specific Energy Rechargeable Batteries for Mobile Applications“. Februar 2018.

[2] International Zinc Association, „Special High grade Zinc - Life Cycle Assessment - 2023“. 5. Dezember 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.zinc.org/wp-content/uploads/sites/30/2024/11/IZA-LCA-Update-Report_v1.4_FINAL.pdf

[3] A. S. G. Andrae, N. Itsubo, H. Yamaguchi, und A. Inaba, „Life Cycle Assessment of Japanese High-Temperature Conductive Adhesives“, *Environ. Sci. Technol.*, Bd. 42, Nr. 8, S. 3084–3089, Apr. 2008, doi: 10.1021/es0709829.

[4] T. Ibn-Mohammed *u. a.*, „Life cycle assessment and environmental profile evaluation of lead-free piezoelectrics in comparison with lead zirconate titanate“, *Journal of the European Ceramic Society*, Bd. 38, Nr. 15, S. 4922–4938, Dez. 2018, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2018.06.044.

[5] Teck Cominco, „Teck Cominco Sustainability Report 2006“, 2006.

[6] P. Nuss und M. J. Eckelman, „Life Cycle Assessment of Metals: A Scientific Synthesis“, *PLOS ONE*, Bd. 9, Nr. 7, S. e101298, Juli 2014, doi: 10.1371/journal.pone.0101298.

[7] R. D.-K. Heubach, „Verfahren und Vorrichtungen zur Herstellung von Bismutoxid und Bismutlegierungsoxiden“, EP0704408A1, 3. April 1996 Zugegriffen: 8. Februar 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://patents.google.com/patent/EP0704408A1/de?q=(Verfahren+und+Vorrichtungen+zur+Herstellung+von+Bismutoxid+und+Bismutlegierungsoxiden)&oq=Verfahren+und+Vorrichtungen+zur+Herstellung+von+Bismutoxid+und+Bismutlegierungsoxiden

[8] X. Hu, A. K. J. An, und S. S. Chopra, „Life Cycle Assessment of the Polyvinylidene Fluoride Polymer with Applications in Various Emerging Technologies“, *ACS Sustainable Chem. Eng.*, Bd. 10, Nr. 18, S. 5708–5718, Mai 2022, doi: 10.1021/acssuschemeng.1c05350.

[9] N. Bogolowski, O. Ngaleu, M. Sakthivel, und J.-F. Drillet, „Long-life bifunctional BaSrCoFeO3/C gas diffusion electrode“, *Carbon*, Bd. 119, S. 511–518, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.carbon.2017.04.051.

[10] W. W. White, „Preparation of ultra-pure silver nitrate“, US5000928A, 19. März 1991 Zugegriffen: 9. Februar 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://patents.google.com/patent/US5000928A/en

[11] R. Freudenreich, I. D. Mielke, K. Rettenbeck, und T. D. Schöttle, „Verfahren zur Herstellung von Hexafluorpropen“, EP0337127B1, 21. April 1993 Zugegriffen: 9. Februar 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://patents.google.com/patent/EP0337127B1/en?oq=EP0337127B1

[12] Kuraray Europe GmbH, „ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATION as per ISO 14025 and EN 15804+A2 - Ionoplast film (SentryGlas®) interlayer“. 5. Dezember 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.trosifol.com/fileadmin/user_upload/about_us/sustainability/environmental-product-decleration-as-per-iso-14025-and-en-15804_a2-ionoplast-frilm-sentryglas-interlayer.pdf

[13] „Wärmekapazität Metalle“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.schweizer-fn.de/stoff/wkapazitaet/wkapazitaet_metall.php

[14] „Schmelzwärme“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.chemie.de/lexikon/Schmelzw%C3%A4rme.html
[15] „Zink“. [Online]. Verfügbar unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Zink