

Reviewbericht – „greenBattNutzung - Begleitprojekt Batterielebenszyklus“

FKZ 03XP0302E: Sachbericht

Darmstadt, 27.01.2025

Förderzeitraum 01.09.2020 – 31.08.2024

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Autoren

Matthias Buchert, Johannes Klinge, Jürgen Sutter
Öko-Institut e.V.

Kontakt

m.buchert@oeko.de
www.oeko.de

Geschäftsstelle Freiburg

Postfach 17 71
79017 Freiburg

Hausadresse

Merzhauser Straße 173
79100 Freiburg
Telefon +49 761 45295-0

Büro Berlin

Borkumstraße 2
13189 Berlin
Telefon +49 30 405085-0

Büro Darmstadt

Rheinstraße 95
64295 Darmstadt
Telefon +49 6151 8191-0

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	5
1 Einführung	6
2 AP1 Monitoring und Szenarienentwicklung	9
2.1 Referenzbatterie	9
2.2 Referenzen für Erst- und Zweitnutzung	10
2.3 Referenz für die Prozesskette Recycling	11
3 AP2 Werkzeugentwicklung und szenarienbasierte Bewertung	13
4 AP3 Ergebnis-/ Technologietransfer	13
5 AP5 und AP6	14
6 Interne Bewertung des Reviewprozesses	15

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Partner des Begleitprojekts greenBattNutzung im Rahmen der Querschnittsinitiative Batterie-Lebenszyklus	6
Abbildung 1-2: Einordnung des Begleitprojekts in das Gesamtsystem der Querschnitts-initiative Batterie-Lebenszyklus	7
Abbildung 2-1: Bewertungsschema über den Lebenszyklus einer Batterie	9

Tabellenverzeichnis

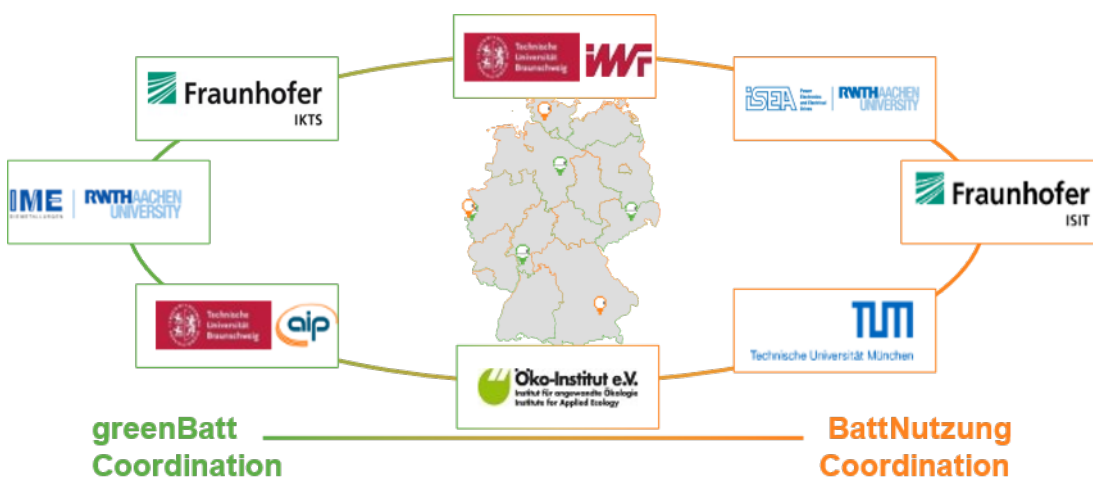
Tabelle 1-1: Übersicht zu AP4	7
Tabelle 2-1: Übersicht zu AP1	9
Tabelle 3-1: Übersicht zu AP2	13
Tabelle 4-1: Übersicht zu AP3	13
Tabelle 5-1: Übersicht zu AP5	14
Tabelle 5-2: Übersicht zu AP6	14

1 Einführung

Das Begleitprojekt „Batterielebenszyklus - greenBattNutzung“ wurde zu den beiden vom BMBF im Jahr 2020 auf den Weg gebrachten Forschungsclustern „Batterienutzungskonzepte - BattNutzung“¹ sowie „Recycling & grüne Batterie - greenBatt“² im Rahmen der Querschnittsinitiative Batterielebenszyklus bewilligt und eingerichtet.

Die Leitung des gesamten Begleitprojekts oblag der Technischen Universität Braunschweig, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF, Prof. Dr.-Ing. Christoph Herrmann). Weitere beteiligte Partner waren das Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS), die RWTH Aachen University, Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling (IME), die RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Elektrochemische Energiewandlung und Speichersystemtechnik (ISEA), die Technische Universität München, Lehrstuhl für Elektrische Energiespeichertechnik (EES), das Fraunhofer-Institut für Siliziumtechnologie (ISIT), die Technische Universität Braunschweig, Institut für Automobilwirtschaft und Industrielle Produktion (AIP) sowie das Öko-Institut e.V (siehe folgende Graphik).

Abbildung 1-1: Partner des Begleitprojekts greenBattNutzung im Rahmen der Querschnittsinitiative Batterielebenszyklus



Das Begleitprojekt nahm im September 2020 seine Arbeit auf und lief (nach einer Verlängerung um 6 Monate) bis einschließlich August 2024. Das gesamte Begleitprojekt umfasste die folgenden sechs Arbeitspakete:

- AP1: Monitoring und Szenarienentwicklung,
- AP2: Werkzeugentwicklung und szenarienbasierte Bewertung,
- AP3: Ergebnis-/Technologietransfer,
- AP4: Review und Handlungsempfehlungen,

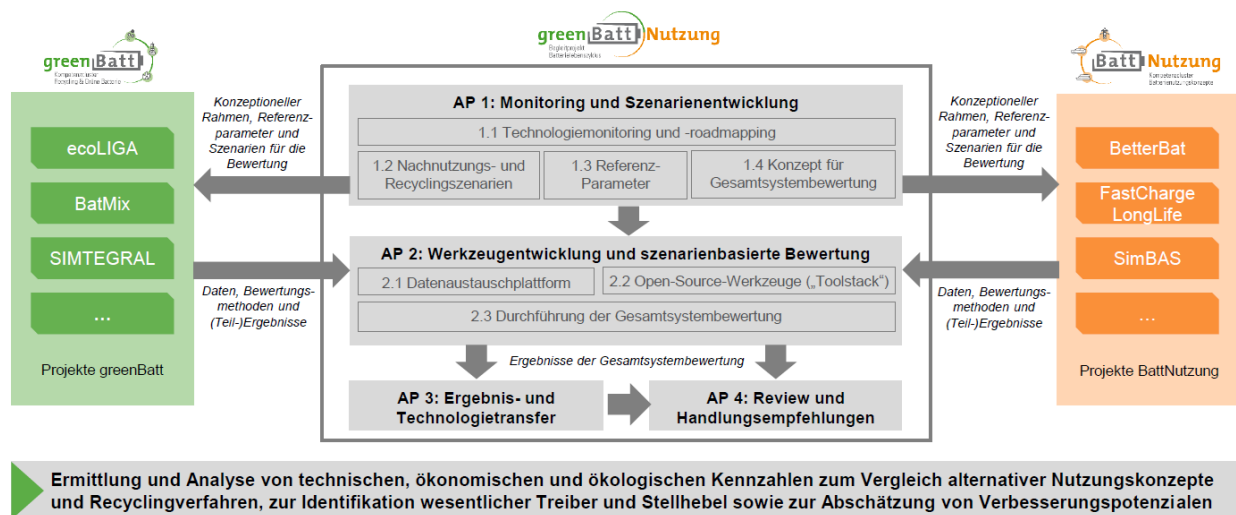
¹ <https://www.battnutzung-cluster.de/de/>

² <https://www.greenbatt-cluster.de/de/>

- AP5: Operatives Clustermanagement und
- AP6: Öffentlichkeitsarbeit.

Die folgende Abbildung zeigt die Einordnung der zentralen vier Arbeitspakete des Begleitprojekts in das Gesamtsystem der Cluster.

Abbildung 1-2: Einordnung des Begleitprojekts in das Gesamtsystem der Querschnittsinitiative Batterielebenszyklus



Das Öko-Institut zeichnete sich innerhalb des Verbundes zum Begleitprojekt für das **AP4 (Review und Handlungsempfehlungen)** (Übersicht: siehe Tabelle 1-1) verantwortlich. Zu den Aufgaben des Öko-Instituts zählte neben der Erstellung eines Policy Reports (UAP4.2 für politische Handlungsempfehlungen)³ die Erstellung eines neutralen Reviews (UAP4.1).

Tabelle 1-1: Übersicht zu AP4

AP4:	Review und Handlungsempfehlungen
Zielsetzung:	Vermittlung der Ergebnisse der Clusterprojekte an die Politik für das Einbeziehen bei zukünftigen Entscheidungen
AP-Leitung:	Öko-Institut e.V.
Beteiligte Partner:	ISEA, AIP, IWF, IME, IKTS, ISIT

Das Ziel in UAP4.1 war die Erstellung eines neutralen Reviews zu den in den AP1 (Monitoring und Szenarienentwicklung), in AP2 (Werkzeugentwicklung und szenarienbasierte Bewertung) sowie in AP3 (Ergebnis-/Technologietransfer) erarbeiteten Projektergebnissen im Hinblick auf die Bewertung von ökologischen und sozio-ökonomischen Auswirkungen. Die Reviewarbeiten wurden gemäß Arbeitsplan begleitend durchgeführt. Hierzu wurden in regelmäßigen Abständen die Zwischenergebnisse der Arbeitspakete sowie die verwendeten Daten und Methoden kritisch beleuchtet. Darauf aufbauend wurde anschließend die weitere Bearbeitung dieser Arbeitspakete geplant. Im Ergebnis

³ Dieser Policy Report des Öko-Instituts ist konzipiert als ein eigenständiges Dokument für eine umfassende Kommunikation und Vernetzung von Handlungsempfehlungen aus den Ergebnissen der beiden Forschungscluster.

liegt hiermit ein neutrales Review zu den Ergebnissen aus den AP1 bis AP3 des Begleitprojektes vor, aus dem Rückkopplungs- und Feedbackschleifen für die Partner resultierten und resultieren.

Für die Arbeiten zum neutralen Review innerhalb des Begleitprojektes wurden während der Projektlaufzeit zahlreiche und regelmäßige (üblicherweise alle 2 Wochen) Online-Treffen sowie ganztägige physische Treffen mit den anderen Partnern des Begleitprojektes durchgeführt. Bei diesen Gelegenheiten wurden von den Partnern methodische Ansätze, Projektfortschritte und Zwischenergebnisse vorgestellt, die das Öko-Institut entsprechend kommentierte und den Partnern basierend auf den eigenen Erfahrungen und Expertisen bei Bedarf unmittelbar Empfehlungen für die weiteren Arbeiten geben konnte. Durch die Kombination an physischen Treffen und Online-Treffen konnte nicht zuletzt den zeitweiligen Restriktionen während der Corona-Pandemie, die in weiten Teilen mit dem Förderzeitraum überlappte, effizient begegnet werden.

In den folgenden Kapiteln werden die Erfahrungen aus dem Reviewprozess bezogen auf die AP1 bis AP3 geschildert.

2 AP1 Monitoring und Szenarienentwicklung

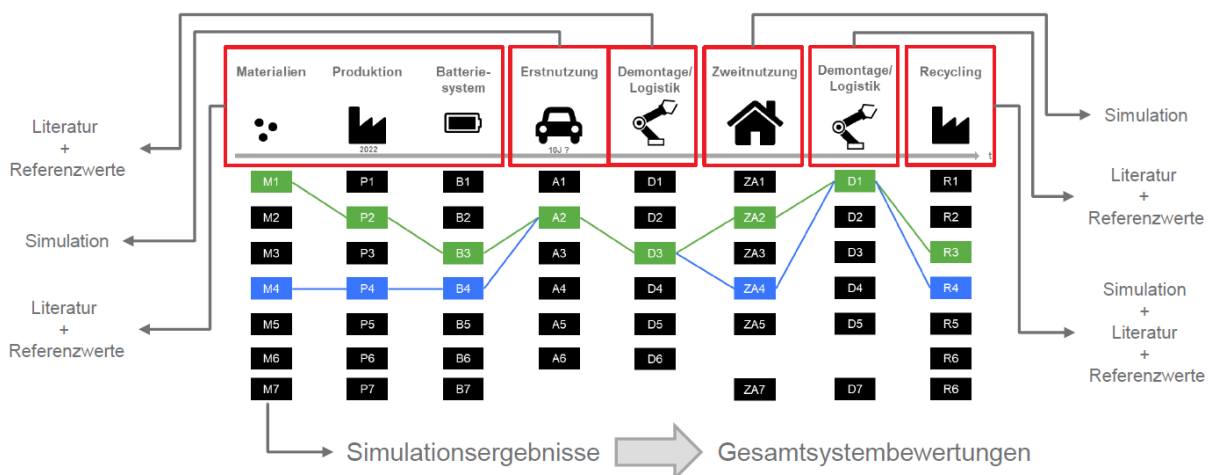
Tabelle 2-1: Übersicht zu AP1

AP1:	Monitoring und Szenarienentwicklung
Zielsetzung:	Schaffung von Referenzen für die Forschungscluster Batterienutzungskonzepte sowie Recycling & Green Battery sowie die Konzeption einer übergreifenden Systembewertung
AP-Leitung:	IKTS
Beteiligte Partner:	AIP, IWF, ISIT, IME, ISEA, EES

In AP1 (Übersicht: siehe Tabelle 2-1) ging es darum Technologiemonitoring und -roadmapping zu betreiben, Nachnutzungs- und Recyclingszenarien aufzustellen, Bewertungsparameter abzuleiten und ein Konzept für eine Konzeption der Gesamtsystembewertung für die verschiedenen Teilbereiche von GreenBatt und BattNutzung durchzuführen.

Die folgende Abbildung zeigt ein beispielhaftes Schema für die Bewertung von technischen (z. B. Lebensdauer, Effizienz), ökonomischen (z. B. NPV) und ökologischen (z. B. GWP-Fußabdruck) Parametern eines Batterietyps über den gesamten Lebenszyklus (inkl. Erst und Zweitnutzung).

Abbildung 2-1: Bewertungsschema über den Lebenszyklus einer Batterie



Für die Gesamtsystembewertung wurden verschiedene Referenzsysteme entwickelt und ausführlich diskutiert:

- Referenzbatterie
- Referenzen für Erst- und Zweitnutzung
- Referenz Prozesskette Recycling

2.1 Referenzbatterie

Die Referenzbatterie bildete die Grundlage für verschiedene Projektziele:

- Schaffung eines Toolstacks zur ökonomischen und ökologischen Bewertung von 2nd Life und Recycling an ausgewählten Systemen
- Allgemeine ökonomische und ökologische Bewertung von 2nd Life und Recycling aus Sicht des Gesamtlebenszyklus

Dafür musste die Referenzbatterie auf der einen Seite eine möglichst exakte Nachbildung eines existierenden Batteriesystems zur Validierung des Toolstacks sein, auf der anderen Seite sollte sie im Aufbau Eigenschaften beinhalten, die einen Mittelwert aller im Feld befindlichen Batterien darstellen. Daher sollte zunächst die Anwendbarkeit und das Zusammenspiel der Bewertungstools an einem durchgängigen, konsistenten Beispiel demonstriert werden. Daraufhin sollten unterschiedliche Lebenszykluspfade mit einem Benchmark Pfad verglichen werden, um Innovation zu bewerten. Hierzu war die Definition einer Referenzbatterie erforderlich, die sowohl den Anforderungen aus BattNutzung als auch den Anforderungen aus greenBatt entspricht. Die Referenzbatterie schaffte damit eine einheitliche und durchgängige Grundlage zur Demonstration der Anwendbarkeit und Funktionsfähigkeit der in greenBattNutzung entwickelten Analyse und Bewertungstools.

Zur Auswahl einer Batterie war besonders die Datenverfügbarkeit relevant. Auf der einen Seite war für BattNutzung eine vollständige elektrochemische Spezifikation (Kapazität, Ersatzschaltbild) und eine Verfügbarkeit von Alterungsdaten und/oder Alterungsmodellen sinnvoll. Für greenBatt war dafür eine vollständige und präzise Materialbilanz und Informationen über Konstruktion/Aufbau des Batteriesystems zur Abschätzung des Demontageaufwands und zur Ermittlung der Stoffströme relevant. Übergreifend musste auf Repräsentativität, Realitätsnähe, empirische Validierbarkeit und Reproduzierbarkeit des Verfahrens zur Definition geachtet werden.

Daher wurde sich letzten Endes auf ein real existierendes Batteriesystem geeinigt, welches durch eine vorherige Analyse schon komplett bekannt und analysiert worden war. Aus diesem Grund stand ein kompletter Datensatz zur Validierung verfügbar. Zwar entsprach der Datensatz nicht den Spezifikationen aktueller Batteriemodelle, die neu in den Markt kommen, allerdings wurde vom Öko-Institut ins Feld geführt, dass es dafür genau solchen Batteriemodellen entspricht, die zurzeit das Ende ihres ersten Lebens erreichen, d.h. in die Nachgebrauchsphase gehen. Dies machte dieses System ideal für die Ziele des Projekts. Auch wurde vom Öko-Institut zurückgemeldet, dass die Auswahl einer kobaltreichen Zelle als Referenz gut ist, da hier der Vergleich zur Wertschöpfung durch Recycling oder zur Lebensverlängerung durch 2nd Life ökologisch und ökonomisch besonders relevant ist. Grund dafür ist die hohe Werthaltigkeit von Kobalt und gleichzeitig eine hohe Lebensdauer der Zellen. Änderungen der Rohstoffpreise ändern dynamisch den Wertstoff-Fokus. Darüber hinaus können andere Zellanalysen aus der Literatur, wie die des ID3 der TUM, untersucht werden, um die Datenbasis in Zukunft zu verbreitern.

2.2 Referenzen für Erst- und Zweitnutzung

In diesem Teil wurden Konzepte besprochen, wie 2nd Life Ansätze bewertet werden können. Dabei stand die Berechnung von technischen (z. B. Lebensdauer, Effizienz), ökonomischen (z. B. NBW - Nettobarwert) und ökologischen (z. B. Carbon Footprint) Bewertungsparametern eines Batterietyps über den gesamten Lebenszyklus (inkl. Erst- und Zweitnutzung) im Zentrum.

Zwei verschiedene Bewertungsalternativen wurden diskutiert:

- Fall I: 2nd Life stellt günstige Zellen für zusätzliche Batterieanwendungen zur Verfügung, welche mit 1st Life Zellen nicht wirtschaftlich wären.

- Fall II: 2nd Life Zellen ersetzen Neuzellen in bestehenden Batterieanwendungen. Es muss somit eine geringere Menge an Neuzellen produziert werden.

Dabei wurde in Absprache mit dem Öko-Institut entschieden, dass der zweite Fall sinnvoller und für eine Analyse allgemein gängiger ist. Allerdings liegt die Wahrheit wahrscheinlich dazwischen.

Eine zentrale Frage, die in verschiedenen Treffen diskutiert wurde, ist die der Allokation von Emissionen zwischen dem 1st und dem 2nd Life einer Batterie. Dabei gibt es verschiedene Möglichkeiten der Allokation. Wenn man zum Beispiel eine Neubatterie mit einer 2nd Life Batterie für dieselbe Anwendung verwendet, wird der vollständige Lebenszyklus einer Batterie mit dem Lebenszyklus in einem erstem und einem zweiten Leben miteinander verglichen. Je nach Betrachtungsrahmen können dem Öko-Institut nach unterschiedliche Allokationsmethoden verwendet werden. Dabei ist es zentral, welche Frage beantwortet werden soll. Falls die Gesamtemissionen einer Batterie berechnet werden sollen, ist dabei eine andere Allokation zu verwenden, als wenn die Entscheidung getroffen werden muss, inwiefern eine Batterie in ein zweites Leben gehen oder direkt recycelt werden soll. Bei letzterem ist es möglich, der Batterie für ein zweites Leben keinerlei Emissionen aus ihrer ursprünglichen Produktion zuzurechnen, während im ersten Fall abgewogen werden muss, welcher Anteil dem ersten und zweiten Leben zugerechnet wird. Eine Möglichkeit dafür ist, den finanziellen Wert zu Beginn des jeweiligen Lebens anzurechnen.

Darüber hinaus wurden verschiedene Parameter und Aspekte diskutiert, wie EoL Kriterien im ersten bzw. zweiten Leben, Gutschriften für die Nutzung von Outputs, Zellverfügbarkeiten und Aspekte, welche ein zweites Batterieleben wahrscheinlicher oder unwahrscheinlicher erscheinen lassen. Vom Öko-Institut wurde auf die gegebenen Garantien der OEMs verwiesen, die von den wissenschaftlich meist verwendeten 80 % State of Health (SOH) abweichen.

Zusätzlich wurden die unterschiedlichen Wiederverwendungsansätze von Packs, Modulen und Zellen diskutiert:

- Primärregelleistung/Momentanreserve
- Netzspeicher für erneuerbare Energien
- Peak shaving
- Pufferspeicher
- Heimspeicher
- Notstromversorgung
- Industrieanwendungen
- Offgrid-Lösungen
- Maritime Anwendungen

Je nach Anwendung werden dabei andere Spezifikationen benötigt.

2.3 Referenz für die Prozesskette Recycling

Für die ökologische Bewertung des Recyclingprozesses mussten die Systemelemente und Systemgrenzen festgelegt werden. Die Anforderungen an den Referenzprozess sind Repräsentativität (weist aus Marktsicht relevante Charakteristika auf, z. B. hinsichtlich des Stands der Technik, ...), Realitätsnähe (d. h. möglichst in Anlehnung an real existierende Recyclingsysteme) und eine belastbare Vergleichsbasis (Recyclinginnovationen sollen vergleichbar mit der Referenz für die Prozesskette sein). Es musste eine möglichst vollständige und präzise Material- und Energiebilanz aufgestellt werden (Welche Materialien in welcher Menge?). Dafür war eine Kombination eines

daten- und modellbasierten Vorgehens basierend auf technischen Parametern der Recyclingprozessketten zur Ermittlung der Energie und Stoffströme angedacht. Es wurden LCI-Modelle und Daten für verschiedene Teilsysteme (Prozessmodule) benötigt, damit die einzelnen Prozesse separat mit praktischen Versuchen und Projekten verglichen werden können. Dabei wurde der Prozess auf ein bestimmtes Gewicht an Lithium-Ionen Batteriepack Input normiert und der laufende Betrieb angenommen.

Die einzelnen Prozessmodule wurden in einer ganzen Reihe von Treffen zwischen dem Öko-Institut und den Beteiligten systematisch durchgesprochen. Das Öko-Institut gab zu den Annahmen Feedbacks und nannte mögliche Quellen für eine weitere und verbesserte Datenbasis. Daten zu folgenden Aspekten wurden dabei diskutiert:

- EoL-Batterien
- Energieeinsatz
- Hilfs- und Betriebsmittel
- Zurückgewonnene Materialien/Rezyklate
- vermiedene Primärproduktion
- Emissionen
- vermiedenes Abfallaufkommen

Unter anderem wurde bei der Bilanzierungsmethode über Open-Loop und Closed-Loop diskutiert, inwiefern die Materialien wieder in Batterien eingesetzt werden, oder nicht. Der Literatur nach ist die Annahme i.d.R. Open Loop, wobei es teilweise Unterschiede in der Datensatzauswahl gibt, also welche Primärproduktion ersetzt wird. Abfallströme, die an verschiedenen Stellen auftreten (z. B. Kupfer, Aluminium) werden dafür oft zusammengefasst und es ist meist keine Differenzierung nach Rezyklatqualität möglich.

Die Rolle von Mangan wurde ebenfalls vertieft. Das Öko-Institut gab dafür den Hinweis, dass Mangan zurzeit kaum thematisiert wird, auch nicht im Rahmen der EU-Batterieverordnung. Darüber hinaus wurde angesprochen, inwiefern einzelne Schritte, wie die Co/Ni-Trennung weggelassen werden können. Dies wurde allerdings aufgrund des Fokus auf bestehende industrielle Verfahren nicht umgesetzt. Darüber hinaus sollte die Referenzkette gerade bewusst den Standardfall darstellen, mit dem dann solche Sonderfälle verglichen werden können.

Zusätzlich wurden verschiedene Aspekte wie die Wärmerückgewinnung und die Pyrometallurgie diskutiert. Vom Öko-Institut kam die klare Empfehlung bei allen Unsicherheiten, die größeren Einfluss auf das Ergebnis haben könnten, mit Sensitivitätsanalysen zu arbeiten, um den Einfluss direkt zu ermitteln.

Die verschiedenen methodischen Herausforderungen der LCI-Modellierung, wie Systemgrenzen: „End-of-Life-Modelling“ inkl. Betrachtung der Anwendung der Rezyklate, Auswahl der Ecoinvent-Datensätze für Gutschriften im Open Loop Recycling und die heterogene Datenherkunft für Bilanzierung wurden intensiv besprochen. Auf die Frage nach Erfahrungswerten mit Ecoinvent und Best Practices dazu, wurde vom Öko-Institut geantwortet, dass dies mit der Auswahl des Datensatzes zusammenhängt, also inwiefern die Produktreinheit aus dem gewählten Prozess hoch genug ist, oder das Produkt weiter aufgereinigt werden muss. Insgesamt muss immer die Transparenz der Datenherkunft für den Report gegeben sein, wobei dies auch qualitativ geschehen kann.

3 AP2 Werkzeugentwicklung und szenarienbasierte Bewertung

Tabelle 3-1: Übersicht zu AP2

AP2:	Werkzeugentwicklung und szenarienbasierte Bewertung
Zielsetzung:	Entwicklung von Werkzeugen für die sowie die Durchführung der Gesamtbewertung der verschiedenen End-of-Life-Optionen für Batterien
AP-Leitung:	EES, IWF
Beteiligte Partner:	ISEA, ISIT, IKTS, AIP, IME

Bei AP2 (Übersicht: siehe Tabelle 3-1) lag der Fokus der Arbeiten in erster Linie um die Aufstellung einer Daten-, Dokumentaustausch- und Publikationsplattform, der (Weiter-)Entwicklung und Integration bzw. Kopplung von Open Source Werkzeugen zur Gesamtbewertung des Batterie- und Zelllebenszyklus (ökologische, betriebswirtschaftliche etc. Aspekte) und der Bewertung von Nachnutzungs- und Recyclingwegen aus Lebenszyklussicht. Das Öko-Institut war über seine Rolle im Reviewprozess stets in die Entwicklungsschritte der involvierten Partner bei der Entwicklung dieser Plattform eingebunden und konnte über zahlreiche Treffen und Workshopformate aus seiner langjährigen Expertise heraus direkte Rückmeldungen und Feedbacks im Detail geben, welche von den Ansprechpartnern im Verbund konstruktiv aufgenommen und umgesetzt worden sind.

4 AP3 Ergebnis-/ Technologietransfer

Tabelle 4-1: Übersicht zu AP3

AP3:	Ergebnis-/Technologietransfer
Zielsetzung:	Wissens- und Technologietransfer sowohl in Industrie als auch in Wissenschaft und Forschung mittels Workshops, Schulungen und Publikationen
AP-Leitung:	ISEA
Beteiligte Partner:	IME, IWF), EES, IKTS, ISIT

AP3 (Übersicht: siehe Tabelle 4-1) beinhaltete die Konzeptionierung und Durchführung von Industrieworkshops für den Ergebnistransfer, die Erstellung und Durchführung von Schulungskonzepten und die Entwicklung und Überwachung eines Publikationsplans. Das Öko-Institut unterstützte über seine Review Rolle fortlaufend diesen Prozess. Besonders zu erwähnen ist hierbei die Unterstützung des Öko-Instituts bei der Erstellung des YouTube-Videos greenBattNutzung⁴, welches prägnant und anschaulich die wichtigsten Ergebnisse und Empfehlungen aus den diversen Einzelprojekten der beiden Forschungscluster zusammenfasst.

⁴ <http://www.greenbattnutzung.de/>

5 AP5 und AP6

Die Arbeiten in AP5 (Operatives Clustermanagement; Übersicht: siehe Tabelle 5-1) und AP6 (Öffentlichkeitsarbeit; Übersicht: siehe Tabelle 5-2) waren nicht Teil des Reviewprozesses des Öko-Instituts.

Tabelle 5-1: Übersicht zu AP5

AP5: Operatives Clustermanagement	
Zielsetzung:	Management des Informationsaustauschs zwischen allen Beteiligten über verschiedene Formate
AP-Leitung:	IWF
Beteiligte Partner:	IKTS, ISEA, EES, ISIT, IME

Tabelle 5-2: Übersicht zu AP6

AP6: Öffentlichkeitsarbeit	
Zielsetzung:	Repräsentation des Clusters in der Öffentlichkeit und Kontaktpflege zu Industrie- und Forschungspartnern
AP-Leitung:	ISEA
Beteiligte Partner:	IKTS, IWF, IME, EES, ISIT

6 Interne Bewertung des Reviewprozesses

Zunächst soll nach Abschluss des Begleitprojekts nicht verschwiegen werden, dass in den ersten Jahren (vor allem 2020 bis 2022) der Arbeiten des Begleitprojekts sowie der Forschungscluster „Batterienutzungskonzepte - BattNutzung“ sowie „Recycling & grüne Batterie - greenBatt“ durch die gravierenden Auswirkungen der Corona-Pandemie (zeitweilig keine physische Treffen möglich, Lock-Downs bis hin zu Einschränkungen von Arbeiten in Büros und Laboratorien) die direkte Kommunikation und der Austausch zu den Forschungsfortschritten vor einige Herausforderungen gestellt wurde. Nicht zuletzt deshalb wurde auch das Begleitprojekt um 6 Monate kostenneutral verlängert.

Dennoch kann vom Öko-Institut vorbehaltlos konstatiert werden, dass trotz der zeitweise erschwerten Bedingungen aufgrund der guten Organisation durch die Begleitprojektleitung und durch das überdurchschnittliche Engagement aller beteiligten Partner ein effizienter und zeitnaher Austausch über die Projektlaufzeit sichergestellt werden konnte. Das Öko-Institut konnte sich deshalb im Rahmen seiner begleitenden Review Rolle stets zeitnah mit Empfehlungen zu den laufenden Arbeiten der Partner einbringen und von den beteiligten Akteuren wiederum wurden die Vorschläge des Öko-Instituts immer offen und konstruktiv aufgenommen. Auf diese Weise konnten die Forschungsarbeiten wie in der Gesamtvorhabenbeschreibung geplant „just-in-time“ befruchtet werden.

Zusammenfassend kann vom Öko-Institut als Ergebnis des Reviewprozesses festgehalten werden, dass der intensive begleitende Austausch zahlreiche Synergien zum Tragen gebracht und die Validität der einzelnen Forschungsergebnisse sicherlich erhöht hat. Das Öko-Institut kann daher die Einschätzung formulieren, dass ein ausgesprochen konstruktiver und effizienter Prozess über das Begleitvorhaben erreicht worden ist, der sicherlich auch positiv in zukünftige Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Batterieforschung in Deutschland einzahlen wird.

Kurzbericht – „greenBattNutzung - Begleitprojekt Batterielebenszyklus“

FKZ 03XP0302E: Kurzbericht

Darmstadt, 27.01.2025

Förderzeitraum 01.09.2020 – 31.08.2024



Autoren

Matthias Buchert, Johannes Klinge, Jürgen Sutter
Öko-Institut e.V.

Kontakt

m.buchert@oeko.de
www.oeko.de

Geschäftsstelle Freiburg

Postfach 17 71
79017 Freiburg

Hausadresse

Merzhauser Straße 173
79100 Freiburg
Telefon +49 761 45295-0

Büro Berlin

Borkumstraße 2
13189 Berlin
Telefon +49 30 405085-0

Büro Darmstadt

Rheinstraße 95
64295 Darmstadt
Telefon +49 6151 8191-0

1 Einführung

Das Begleitprojekt „Batterielebenszyklus - greenBattNutzung“ wurde zu den beiden vom BMBF im Jahr 2020 auf den Weg gebrachten Forschungsclustern „Batterienutzungskonzepte - BattNutzung“¹ sowie „Recycling & grüne Batterie - greenBatt“² im Rahmen der Querschnittsinitiative Batterielebenszyklus bewilligt und eingerichtet.

Die Leitung des gesamten Begleitprojekts oblag der Technischen Universität Braunschweig, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF, Prof. Dr.-Ing. Christoph Herrmann). Weitere beteiligte Partner waren das Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS), die RWTH Aachen University, Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling (IME), die RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Elektrochemische Energiewandlung und Speichersystemtechnik (ISEA), die Technische Universität München, Lehrstuhl für Elektrische Energiespeichertechnik (EES), das Fraunhofer-Institut für Siliziumtechnologie (ISIT), die Technische Universität Braunschweig, Institut für Automobilwirtschaft und Industrielle Produktion (AIP) sowie das Öko-Institut e.V (siehe folgende Graphik).

Abbildung 1-1: Partner des Begleitprojekts greenBattNutzung im Rahmen der Querschnittsinitiative Batterielebenszyklus



Das Begleitprojekt nahm im September 2020 seine Arbeit auf und lief (nach einer Verlängerung um 6 Monate) bis einschließlich August 2024. Das gesamte Begleitprojekt umfasste die folgenden sechs Arbeitspakete:

- AP1: Monitoring und Szenarienentwicklung,
- AP2: Werkzeugentwicklung und szenarienbasierte Bewertung,
- AP3: Ergebnis-/Technologietransfer,
- AP4: Review und Handlungsempfehlungen,

¹ <https://www.battnutzung-cluster.de/de/>

² <https://www.greenbatt-cluster.de/de/>

- AP5: Operatives Clustermanagement und
- AP6: Öffentlichkeitsarbeit.

Die folgende Abbildung zeigt die Einordnung der zentralen vier Arbeitspakete des Begleitprojekts in das Gesamtsystem der Cluster.

Abbildung 1-2: Einordnung des Begleitprojekts in das Gesamtsystem der Querschnittsinitiative Batterielebenszyklus



Das Öko-Institut zeichnete sich innerhalb des Verbundes zum Begleitprojekt für das **AP4 (Review und Handlungsempfehlungen)** (Übersicht: siehe Tabelle 1-1) verantwortlich. Zu den Aufgaben des Öko-Instituts zählte neben der Erstellung eines Policy Reports (UAP4.2 für politische Handlungsempfehlungen)³ die Erstellung eines neutralen Reviews (UAP4.1).

Tabelle 1-1: Übersicht zu AP4

AP4:	Review und Handlungsempfehlungen
Zielsetzung:	Vermittlung der Ergebnisse der Clusterprojekte an die Politik für das Einbeziehen bei zukünftigen Entscheidungen
AP-Leitung:	Öko-Institut e.V.
Beteiligte Partner:	ISEA, AIP, IWF, IME, IKTS, ISIT

Das Ziel in UAP4.1 war die Erstellung eines neutralen Reviews zu den in den AP1 (Monitoring und Szenarienentwicklung), in AP2 (Werkzeugentwicklung und szenarienbasierte Bewertung) sowie in AP3 (Ergebnis-/Technologietransfer) erarbeiteten Projektergebnissen im Hinblick auf die Bewertung von ökologischen und sozio-ökonomischen Auswirkungen. Die Reviewarbeiten wurden gemäß Arbeitsplan begleitend durchgeführt. Hierzu wurden in regelmäßigen Abständen die Zwischenergebnisse der Arbeitspakete sowie die verwendeten Daten und Methoden kritisch beleuchtet. Darauf aufbauend wurde anschließend die weitere Bearbeitung dieser Arbeitspakete geplant. Im Ergebnis

³ Dieser Policy Report des Öko-Instituts ist konzipiert als ein eigenständiges Dokument für eine umfassende Kommunikation und Vernetzung von Handlungsempfehlungen aus den Ergebnissen der beiden Forschungscluster.

liegt hiermit ein neutrales Review zu den Ergebnissen aus den AP1 bis AP3 des Begleitprojektes vor, aus dem Rückkopplungs- und Feedbackschleifen für die Partner resultierten und resultieren.

Für die Arbeiten zum neutralen Review innerhalb des Begleitprojektes wurden während der Projektlaufzeit zahlreiche und regelmäßige (üblicherweise alle 2 Wochen) Online-Treffen sowie ganztägige physische Treffen mit den anderen Partnern des Begleitprojektes durchgeführt. Bei diesen Gelegenheiten wurden von den Partnern methodische Ansätze, Projektfortschritte und Zwischenergebnisse vorgestellt, die das Öko-Institut entsprechend kommentierte und den Partnern basierend auf den eigenen Erfahrungen und Expertisen bei Bedarf unmittelbar Empfehlungen für die weiteren Arbeiten geben konnte. Durch die Kombination an physischen Treffen und Online-Treffen konnte nicht zuletzt den zeitweiligen Restriktionen während der Corona-Pandemie, die in weiten Teilen mit dem Förderzeitraum überlappte, effizient begegnet werden.

2 Interne Bewertung des Reviewprozesses

Zunächst soll nach Abschluss des Begleitprojekts nicht verschwiegen werden, dass in den ersten Jahren (vor allem 2020 bis 2022) der Arbeiten des Begleitprojekts sowie der Forschungscluster „Batterienutzungskonzepte - BattNutzung“ sowie „Recycling & grüne Batterie - greenBatt“ durch die gravierenden Auswirkungen der Corona-Pandemie (zeitweilig keine physische Treffen möglich, Lock-Downs bis hin zu Einschränkungen von Arbeiten in Büros und Laboratorien) die direkte Kommunikation und der Austausch zu den Forschungsfortschritten vor einige Herausforderungen gestellt wurde. Nicht zuletzt deshalb wurde auch das Begleitprojekt um 6 Monate kostenneutral verlängert.

Dennoch kann vom Öko-Institut vorbehaltlos konstatiert werden, dass trotz der zeitweise erschwerten Bedingungen aufgrund der guten Organisation durch die Begleitprojektleitung und durch das überdurchschnittliche Engagement aller beteiligten Partner ein effizienter und zeitnaher Austausch über die Projektlaufzeit sichergestellt werden konnte. Das Öko-Institut konnte sich deshalb im Rahmen seiner begleitenden Review Rolle stets zeitnah mit Empfehlungen zu den laufenden Arbeiten der Partner einbringen und von den beteiligten Akteuren wiederum wurden die Vorschläge des Öko-Instituts immer offen und konstruktiv aufgenommen. Auf diese Weise konnten die Forschungsarbeiten wie in der Gesamtvorhabenbeschreibung geplant „just-in-time“ befruchtet werden.

Zusammenfassend kann vom Öko-Institut als Ergebnis des Reviewprozesses festgehalten werden, dass der intensive begleitende Austausch zahlreiche Synergien zum Tragen gebracht und die Validität der einzelnen Forschungsergebnisse sicherlich erhöht hat. Das Öko-Institut kann daher die Einschätzung formulieren, dass ein ausgesprochen konstruktiver und effizienter Prozess über das Begleitvorhaben erreicht worden ist, der sicherlich auch positiv in zukünftige Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Batterieforschung in Deutschland einzahlen wird.



BMBF-Begleitprojekt Batterielebenszyklus

Zusammenstellung von Handlungsempfehlungen im Rahmen des Begleitprojektes Batterielebenszyklus

FKZ 03XP0302E

Förderzeitraum 01.09.2020 – 31.08.2024

// Buchert, M.; Klinge, J.; Sutter, J.

Öko-Institut e. V.



Das Begleitvorhaben „Batterie-Lebenszyklus - greenBattNutzung“ war für das zentrale Management der beiden BMBF- Kompetenzcluster greenBatt und BattNutzung verantwortlich: für die Koordination der Aktivitäten, das Ergebniscontrolling und die Fortschrittskontrolle sowie die Clusterkommunikation und die Veranstaltungsorganisation. Im Rahmen der beiden Kompetenzcluster haben zahlreiche Nachwuchswissenschaftler*innen ihre wissenschaftlichen und fachlichen Kompetenzen und Erfahrungen deutlich ausbauen können. Es ist essenziell, die Batterieforschung als zentrales Zukunftsthema für Deutschland anzuerkennen und entsprechend weitere und nachhaltige Perspektiven für neue Generationen an Nachwuchswissenschaftler*innen in diesem Bereich zu schaffen. Diese Kompetenzträger*innen sind die zukünftigen Gründer*innen von Start-Ups, die zukünftigen Forschungs- und Betriebsleiter*innen in Unternehmen und einige von ihnen auch die zukünftigen Hochschullehrer*innen und Institutsleiter*innen, die zukünftig selbst nachhaltig für exzellent ausgebildeten Nachwuchs und damit nicht zuletzt auch für industrielle und wirtschaftliche Prosperität in Deutschland sorgen werden. In diesem Policy Brief werden die folgenden zentralen Handlungsempfehlungen aus den umfassenden Arbeiten abgeleitet.

Zentrale Handlungsempfehlungen

- Handlungsempfehlung 1: Steigerung der Recyclingeffizienzen + Rückgewinnungsquoten
- Handlungsempfehlung 2: Informationsweitergabe entlang der Wertschöpfungskette
- Handlungsempfehlung 3: Design für Recycling und Wiederverwendung/Umnutzung
- Handlungsempfehlung 4: Unterstützung der Wiederverwendung/Umnutzung
- Handlungsempfehlung 5: Gesamtsystembewertung

1 Zentrale Fragestellungen

Mit der steigenden Marktdurchdringung von Lithium-Ionen-Batterien wächst die Anforderung, die mit den Batterien verbundenen Umweltauswirkungen so weit wie möglich zu reduzieren. Dazu müssen die Nutzungsdauer der Batteriezellen maximiert und die Stoffkreisläufe der Rohstoffe geschlossen werden. Zu diesem Zweck wurden vom BMBF im Jahr 2020 zwei Kompetenzcluster im Rahmen der Querschnittsinitiative Batterielebenszyklus auf den Weg gebracht. Im Fokus des Kompetenzclusters „Batterienutzungskonzepte - BattNutzung“¹ steht die Verlängerung der Batterienutzungsdauer und Unterstützung der Entwicklung neuer Material- und Zellkonzepte. Das Kompetenzcluster „Recycling & grüne Batterie - greenBatt“² schafft die Grundlagen für das nachhaltige Recycling von Batterien und Rohstoffen sowie die Schließung von Stoff- und Materialkreisläufen im Batterielebenszyklus.

2 Forschungsagenda und Akteure der Kompetenzcluster

Die Größe und Struktur der beiden Kompetenzcluster erforderte eine Unterstützung durch ein Begleitprojekt, damit die Erreichung der Clusterziele gesteuert und sichergestellt werden kann (Abbildung 2-1 zeigt eine Übersicht der beteiligten Partner im Begleitprojekt). Das Begleitvorhaben „Batterielebenszyklus - greenBattNutzung“ übernahm das zentrale Management der beiden Kompetenzcluster durch Koordination der Aktivitäten, Ergebniscontrolling und Fortschrittskontrolle sowie Clusterkommunikation und Veranstaltungsorganisation³. Zudem erfolgte eine Bündelung und Integration der Forschungsergebnisse durch Zusammenführung der im Rahmen der Clusterprojekte erarbeiteten Daten, Methoden, Werkzeuge und Erkenntnisse in einer zentralen Daten- und Dokumentaustauschplattform. Dadurch wurde die Vernetzung der unterschiedlichen Forschungseinrichtungen gestärkt und es fand ein optimaler Ergebnistransfer im Clusternetzwerk statt. Darüber hinaus wurden im Begleitprojekt durch eine zentrale Entwicklung und Bereitstellung von Parametern und Szenarien Referenzen und Standards für die Arbeit in den Clusterprojekten definiert, wodurch eine einheitliche Bewertungsgrundlage geschaffen wurde. Weiterhin erfolgte im Begleitprojekt aufbauend auf den Ergebnissen der Clusterprojekte die ganzheitliche Bewertung verschiedener Nachnutzungs- und Recyclingoptionen für Batterien hinsichtlich der wirtschaftlichen, technologischen und ökologischen Auswirkungen aus Lebenszyklussicht. Die entwickelten Methoden und Werkzeuge für die Gesamtsystembewertung wurden Open Source zur Verfügung gestellt, wodurch die Auswahl von optimalen Nachnutzungs- und Recyclingoptionen für ein breites Feld von Anwendungen ermöglicht wurde. Basierend auf den Erkenntnissen aus den Clusterprojekten wurden Handlungsempfehlungen für verschiedene Akteure aus den Bereichen Politik, Wirtschaft und Forschung abgeleitet, um ein Einbeziehen in zukünftige Entscheidungen zu bewirken.

¹ <https://www.battnutzung-cluster.de/de/>

² <https://www.greenbatt-cluster.de/de/>

³ <http://www.greenbattnutzung.de/>

Abbildung 2-1: Partner des Begleitprojekts greenBattNutzung im Rahmen der Querschnittsinitiative Batterielebenszyklus



Die Ziele des Begleitprojekts „Batterielebenszyklus - greenBattNutzung“ umfassten:

- Definition von Referenzen und Standards:
 - Zentrale Entwicklung und Bereitstellung von Informationen und Modellierungsparametern basierend auf einem begleitenden Technologie-monitoring und -roadmapping.
 - Definition von Szenarien für die Clusterarbeit.
- Integration von Forschungsergebnissen und Bereitstellung von Methoden und Werkzeugen für die Gesamtsystemanalyse und -bewertung:
 - Zusammenführung der im Rahmen der Clusterprojekte erarbeiteten Daten, Methoden, Werkzeuge und Forschungsergebnisse in einer zentralen Daten- und Dokumentaustausch- und Publikationsplattform.
 - Bereitstellung von Open Source Werkzeugen aus den beiden Clustern „Batterienutzungskonzepte“ sowie „Recycling & grüne Batterie“ für die Gesamtsystemanalyse und -bewertung.
 - Durchführung der Gesamtsystemanalyse und -bewertung auf Basis von Szenarien, der während der gesamten Projektlaufzeit der Clusterprojekte erhobenen Daten, entwickelten Modelle und gewonnenen Erkenntnisse sowie der Kooperation mit weiteren Kompetenzclustern (z. B. Excel-Bat-Mat, ProZell, FestBatt).
 - Die ganzheitliche Bewertung des Gesamtsystems über alle Batterielebenszyklusphasen unter Einbezug der Clusterprojekte sowie der Ergebnisse der weiteren Kompetenzcluster im Dachkonzept Batterieforschung.

- Ableitung von Handlungsempfehlungen für verschiedene Akteure aus den Bereichen Politik, Wirtschaft und Forschung und Diskussion dieser mit der Öffentlichkeit.
- Unterstützung der strukturierten Zielerreichung des Clusters und des Ergebnistransfers innerhalb des Clusternetzwerks durch:
 - Koordination und Bündelung der Aktivitäten beider Kompetenzcluster,
 - Ergebniscontrolling und Fortschrittskontrolle,
 - Clusterkommunikation,
 - Veranstaltungsorganisation.

Basierend auf den im Begleitprojekt erarbeiteten Grundlagen soll zukünftig die Auswahl von optimalen Nachnutzungs- und Recyclingoptionen ermöglicht werden. Abbildung 2-2 zeigt eine Übersicht zu den beiden Kompetenzclustern mit den zugeordneten Einzelvorhaben sowie Akteure der Clusterkoordination.

Abbildung 2-2: Übersicht Cluster greenBatt & BattNutzung



Die umfassenden Forschungsarbeiten in den Einzelvorhaben innerhalb der beiden Kompetenzcluster sowie das Begleitvorhaben „greenBattNutzung“ wurden beginnend im Herbst 2020 bis zum Jahr 2024 durchgeführt. Im Folgenden werden wichtige Handlungsempfehlungen aus den Forschungsaktivitäten und -ergebnissen zusammengefasst.

3 Abgeleitete Handlungsempfehlungen

Basierend auf den Ergebnissen und Erkenntnissen aus den Clusterprojekten können die nachfolgend formulierten Handlungsempfehlungen für verschiedene Akteure aus den Bereichen Politik, Wirtschaft und Forschung abgeleitet werden, die in zukünftige Entscheidungen einfließen sollten.

3.1 Handlungsempfehlung 1: Steigerung der Recyclingeffizienzen und Rückgewinnungsquoten

Recycling ist generell mit Materialverlust verbunden. Das stoffliche Recycling ersetzt nicht einen effektiveren Umgang mit vorhandenen funktionsfähigen Produkten. Dennoch können Vorgaben zur Recyclingeffizienz und Rückgewinnungsquoten auf strategische Materialien der Kreislaufwirtschaft einen guten gesetzlichen Rahmen gestalten und Anreize liefern.

Die EU gibt in der 2023 verabschiedeten Batterieverordnung für bestimmte Materialien Rückgewinnungsquoten vor (Kobalt, Kupfer, Nickel, Lithium). Um jedoch die Recyclingeffizienz insgesamt zu steigern, müssen auch weitere Materialien wie Graphit, Aluminium und Mangan zurückgewonnen werden. Gerade die Rückgewinnungsquote von Aluminium beeinflusst die Treibhausgasbilanz aufgrund des großen Anteils im Batteriepack und der energieintensiven Herstellung sehr stark.

Recyclingprozesse können selektiv auf bestimmte Zielmaterialien ausgerichtet werden, um deren Rückgewinnung gegenüber anderen Materialien zu erhöhen. Die gesetzlichen Rahmenbedingungen müssen dabei regelmäßig angepasst werden, um diese Selektivität neben Anreizen aus dem Markt auch an klare ökologische und strategische Ziele zu koppeln. Beispielsweise könnte auch für weitere Materialien wie Kunststoffe und Elektrolyte über spezifische Rückgewinnungsquoten nachgedacht werden, falls dies sich in Zukunft als technisch möglich, ökologisch sinnvoll, aber wirtschaftlich nur bedingt tragfähig erweisen sollte.

Dies ist besonders zentral, da sich die Batteriechemien noch ständig verändern und zum Teil weiter je nach Anwendung diversifizieren. Beispiele sind der erhöhte Anteil von Batteriezellen mit Lithium-Eisen-Phosphat als Kathodenmaterial, der wachsende Siliziumanteil in der Anode und das steigende Interesse an Natrium-Ionen- oder Festkörper-Batterien. Die zukünftigen Recyclingprozessketten sollten mit steigender technologischer Komplexität und Diversität von Energiespeichern entweder robuster oder flexibler/modularer ausgelegt werden, da voraussichtlich weitere neue Materialien mit sehr unterschiedlichen Anforderungen (größere Härte, hohe Reaktivität, hohe adhäsive Bindung der Elektroden etc.) in die Recyclingströme gebracht werden.

Sehr entscheidend bei den gesetzlichen Regelungen sind auch gute Definitionen, z. B. der Recyclingeffizienz. Die Vorgaben der Batterieverordnung differenzieren bisher bei der Recyclingeffizienz nicht zwischen Zell, Modul- und Packebene. Alle Bestandteile sind zunächst Teil der Berechnung, wenn sie nicht durch delegierte Rechtsakte explizit ausgeschlossen werden. Mit der Einführung des Batteriepasses werden dem Recycling bestimmte Informationen zur Zusammensetzung der Batterien zur Verfügung gestellt. Für eine konsistente Ermittlung der Recyclingeffizienz für den Gesamtprozess und die Einzelfraktionen wird die detaillierte Zusammensetzung des Batteriemoduls in Form von Massenanteilen auf Komponenten- (Kathodenaktivmaterial, Anodenaktivmaterial, Stromleiterfolien, Elektrolyt, Separator, Gehäuse, etc.) und

Stoffebene (Aluminium, Kupfer, Nickel, Lithium, Graphit, etc.) benötigt. Nur auf diese Weise ist eine Bilanzierung zwischen Input und Output möglich. Die spezifische Recyclingeffizienz beispielsweise von Lithium setzt sich dann aus der Masse an Lithium im Lithiumsalz-Rezyklat (Recyclingprodukt) über der Masse an Lithium im Batteriemodul (Recyclingedukt) zusammen. Die zukünftige Vergleichbarkeit der Güte von Recyclingprozessrouten hängt damit auch von der Verfügbarkeit dieser Daten ab und dem Willen der Mitgliedsstaaten, diese auch zu erheben.

Dabei ist es wichtig nicht nur den Mitgliedsstaaten Quoten vorzugeben, sondern dass diese auch mit konkreten Maßnahmen hinterlegt werden, sodass diese auch erreicht werden. Andernfalls ist zu besorgen, dass es zu einem ähnlichen Ergebnis kommt wie bei der Sammelquote der Elektroaltgeräte, die Deutschland seit Jahren deutlich verfehlt.

Eine einheitliche Gestaltung von Batterien (Material, Zelltyp, etc.) mindert die Varianz im Eingangsstrom für das Recycling und erleichtert die Datenerfassung und -auswertung. Dies ermöglicht so eine gute Prozessanpassung an einen bestimmten Produkttyp und damit höhere Ausbeute und Reinheit im Vergleich zu robusten Recyclingprozessen für eine Vielzahl unterschiedlicher Batterien. Dies hemmt jedoch auch die technologische Weiterentwicklung. Der Gesetzgeber sollte Anreize bieten, die Varianz der auf dem Markt verfügbaren Batterietypen so zu limitieren, damit ausreichend fähige Recyclingprozesse für diese zur Verfügung stehen, ohne dabei die technologische Weiterentwicklung von Batterien zu hemmen.

Darüber hinaus kann die Digitalisierung allgemein zur Erhöhung und Überwachung der Recyclingquoten auf verschiedene Arten beitragen, zum Beispiel durch die kontinuierliche Überwachung und automatische Regelung aller kritischen Prozessparameter für Idealbedingungen und Fehlervermeidung, durch die Erstellung datengetriebener Modelle zur Prozessoptimierung und Anpassung der Betriebsparameter für maximale Ausbeuten sowie digitales Material-Tracking für Rückverfolgbarkeit und gezielte Logistik-/Prozessoptimierung basierend auf Materialdaten.

Der Gesetzgeber sollte Rahmenbedingungen für risikoarme Kooperationen zwischen Batterieherstellern und -recyclern schaffen. Hersteller werden so befähigt recyclingfähigere Produkte zu entwickeln, während die Recycler durch hohe Informationstransparenz über die zu recycelnden Produkte in der Prozessgestaltung und -auslegung profitieren. Dies sollte, gekoppelt mit einer zu erwartenden Recyclingeffizienz, für die Batterie im Optimalfall vor dem Inverkehrbringen geschehen. Dies könnte durch eine Informationsplattform gekoppelt an den Batteriepass passieren.

3.2 Handlungsempfehlung 2: Informationsweitergabe entlang der Wertschöpfungskette

Die Wertschöpfungskette einer Batterie zieht sich von der Gewinnung der Rohstoffe, über die Produktion der Batterie, deren Nutzung in einer oder mehrerer aufeinanderfolgenden Anwendungen bis zum Recycling. Dabei können Daten über die einzelnen Schritte die Kreislaufwirtschaft in ihrer erweiterten Definition voranbringen, wenn diese über die verschiedenen Schritte den zentralen Akteuren zur Verfügung gestellt werden.

Beispiele stellen Felddaten aus der Erstnutzung dar. Diese sollten Verwertern für eine Zweitnutzungsphase in ausreichendem Detailgrad für felddatenbasierte Analysen zur

Verfügung gestellt werden, um die Chancen für ein Geschäftsmodell rund um die Zweitnutzung von Batterien zu erhöhen und damit die Lebensdauer der Batterien zu verlängern (intensivierte Nutzung). Entscheidend ist dabei der Zugriff auf das Batteriemanagementsystem, welches im Zweifelsfall auch die Weiternutzung und die optimierte Entladung ermöglicht.

Die Schaffung umfangreicher öffentlich verfügbarer Datensätze aus dem Feld und aus Alterungstests stellt einen großen Mehrwert dar und sollte entsprechend gefördert werden. Der Mehrwert liegt vor allem in der Möglichkeit, basierend auf diesen Daten die Batterien langlebiger gestalten zu können und auch gesetzliche Regulierung basierend auf diesen Daten anzupassen. Ein Beispiel können verpflichtende Garantien sein.

Für den einzelnen Akteur sind spezifische Daten der vorliegenden Batterie essenziell. Dies gilt nicht nur für die Entscheidung über eine mögliche Zweitnutzung, sondern auch für die optimierte, ggf. automatisierte Demontage und das Recycling. Für die Einschätzung des Risikos, welches von einer Altbatterie ausgeht, sind Daten über den Gesundheitszustand (SOH⁴) und den Ladezustand (SOC⁵) wichtig. Für eine (zukünftig automatisierte) Demontage ist eine Datenbasis in Form von Bildern der Demontage hilfreich. In Zukunft können darüber beispielsweise neuronale Netzwerke angelernt werden. Unbekannte Batterietypen können bisher nicht (teil-)automatisiert demontiert werden, sondern die Software muss die Demontage eines bestimmten Batterietyps erlernen. Dafür sind auch CAD-Modelle⁶ der Batterie nützlich.

Auch beim Recycling selbst kann die computergestützte Datenverarbeitung sehr hilfreich sein. Erst mit der Verknüpfung von Prozess- und Materialflussdaten lassen sich Material- und Energieströme über Recyclingprozessketten hinweg rückverfolgen. Das Konzept der Cyber-Physischen Recyclingsysteme bietet einen strukturierten Ansatz für die Digitalisierung von Recyclingprozessinfrastruktur. Für einen standortübergreifenden Datenaustausch sind technische und organisatorische Rahmenbedingungen für offene Schnittstellen zu schaffen sowie Datenstrukturen zu synchronisieren.

Zu einem guten Batterierecycling tragen nicht nur die Recycler bei. Diese sind auf Informationstransparenz und Kooperation mit den Batterieherstellern angewiesen. Insbesondere die Schaffung von Datenschnittstellen für automatisierten Datenzugriff zwischen den Akteuren im Batterieökosystem können ein wichtiger Hebel in der Erreichung ambitionierter Recyclingquoten sein.

Das Zusammenspiel der Akteure benötigt auch Definitionen der Qualitätsansprüche an die Stoffströme, um die benötigte Qualität der Wiedereinführung in die Produktion sicherzustellen. Dabei können Standards bzgl. der Materialqualität eine wichtige Rolle spielen, z. B. für Schwarzmasse als ein Zwischenprodukt der Recyclingindustrie, welches die meisten kritischen Rohstoffe enthält. Dafür sollten auch Handelsqualitäten genormt werden. Jedoch ist mit aller Wahrscheinlichkeit noch immer eine intensive Abstimmung innerhalb einer Handelsbeziehung notwendig, um die Prozesse aufeinander abzustimmen, da bei Schwarzmasse sehr viele Parameter relevant sind.

⁴ Engl. State of Health

⁵ Engl. State of Charge

⁶ CAD steht für Computer Aided Design, also Konstruktionen erstellt mithilfe von bestimmter Software

Die Wahl der Prozessschritte und deren Reihenfolge hat entscheidende Auswirkungen auf das Rückgewinnungs- und Reinheitspotenzial sowie den Energie- und Hilfsstoff- bzw. Prozessmedienbedarf des Recyclings. Anforderungen der nachgelagerten Prozessschritte müssen an die vorgelagerten Prozessschritte kommuniziert werden. Beispielsweise muss die Hydrometallurgie unerwünschte Verunreinigungen und deren obere Grenzwerte für die zu verarbeitende Schwarzmasse für die mechanische Aufbereitung bzw. Pyrolyse angeben.

3.3 Handlungsempfehlung 3: Design für Recycling und Wiederverwendung/Umnutzung

Für eine Verwendung eines Batteriesystems bzw. einer Batteriezelle in einer weiteren Anwendung stehen große Hürden entgegen. Gleichzeitig sind die möglichen Einsparungen erheblich, wenn die Batterien in einer erneuten Anwendung neue Batterien ersetzen oder die Dekarbonisierung unterstützen. Um Batterien eine Wiederverwendung oder Umnutzung zu ermöglichen, ist vor allem eine geringe Alterung über die Zeit bzw. über die aktive Nutzung entscheidend (kalendarische bzw. zyklische Alterung).

Eine lange Lebensdauer geht häufig auf Kosten anderer Parameter, z. B. der Energiedichte oder den Kosten pro speicherbare Energie. Dafür müssen die Batterien demnach ausgelegt werden. Die Auslegung von Batteriesystemen auf eine lange Lebenszeit hat auch andere positive ökologische Auswirkungen, wenn sie damit länger in ihrer ersten Nutzung verbleiben kann. Dies sollte demnach regulatorisch gefördert werden.

Die Normierung und Standardisierung des Batteriedesigns kann für eine optimierte Reparatur bzw. ein Austausch einzelner Zellen oder Module, eine leichtere (automatisierte) Demontage und ein verbessertes Recycling entscheidend sein. Es sollten Anstrengungen unternommen werden, um die Normierung und Standardisierung auch über verschiedene Hersteller hinweg voranzubringen. Besonders für eine automatisierte Demontage ist die Zugänglichkeit zu Komponenten und Verbindungselementen entscheidend, sodass ein Roboter an die Verbindungen gelangen, diese lösen und Komponenten entnehmen kann.

3.4 Handlungsempfehlung 4: Unterstützung der Wiederverwendung/Umnutzung

Wenn Batteriesysteme das Ende ihrer ersten Anwendung erreicht haben, sollte eine Überprüfung stattfinden, inwiefern diese in der gleichen Anwendung wiederverwendet bzw. einer anderen Anwendung (Umnutzung) zugeführt werden können. Damit dies einfacher realisiert werden kann, sollte bei der Überführung eines Batteriesystems ein Grund für das Ende der ersten Anwendung angegeben werden, um noch funktionsfähige Systeme bzw. Batteriezellen mit geringer Alterung besser identifizieren zu können. Dies kann auch im Rahmen des Batteriepasses geschehen.

Das gleiche gilt für Daten zur verwendeten Zellchemie bzw. Zellgeneration, besonders wenn diese innerhalb eines Modells Änderungen erfährt. Diese sollten bestimmten Akteuren in diesem Feld in einer Dokumentation standardisiert zur Verfügung gestellt werden, um diesen die Gruppierung gleichartiger Systeme zu ermöglichen.

Zur Einstufung und Gruppierung der Batteriesysteme für eine weitere Nutzung können Felddaten aus der Erstnutzung sehr hilfreich sein. Diese sollten Verwertern für eine Zweitnutzungsphase in ausreichendem Detailgrad für felddatenbasierte Analysen zur Verfügung gestellt werden.

Zur Reduzierung des Umrüstaufwandes kann eine Weiternutzung des Batteriemanagementsystems in Betracht gezogen werden. Dies setzt jedoch den Zugriff auf die oft proprietäre Kommunikationsschnittstelle voraus. Durch öffentlich zugängliche Kommunikationsprotokolle kann hier der Umrüstaufwand deutlich verringert werden.

3.5 Handlungsempfehlung 5: Gesamtsystembewertung

Durch die Nutzung entsprechender zusammengeführter digitaler Simulationen können die Potenziale neuer Materialien auf Systemebene in relevanten Anwendungen und damit die ökologischen Auswirkungen sehr schnell abgeschätzt werden. Dies könnte in Zukunft nicht nur für Investitionsentscheidungen, sondern auch für staatlich geförderte Projekte als Grundlage dienen. Für Letztere müsste dies als Kriterium genannt werden.

Die Forschung in den Clusterprojekten hat auch einige Zielkonflikte aufgedeckt. Zum Beispiel können die Quoten für die Nutzung von Rezyklaten in der Batterieproduktion zu einem kurzfristigen Bedarf an Recyclingmaterialien führen. Dies ist zunächst gewünscht. Jedoch kann es auf Kosten einer ökologisch sinnvolleren Zweitnutzung gehen, falls die Batteriesysteme aufgrund des Anreizes direkt einem Recycling zugeführt werden.

Die Batterien in einem Fahrzeug können der Energiespeicherung für externe Zwecke genutzt werden. Dies wird unter dem Begriff V2X⁷ zusammengefasst. Es hat sich gezeigt, dass diese Technologie große Potenziale zur Netzstabilisierung und Zwischenspeicherung von Energie hat. Daher sollte die Regulatorik für die Netzintegration von Batteriesystemen so angepasst werden, dass auch ein Einsatz flexibler und nicht dauerhaft verfügbarer Systeme im Netz möglich ist und wirtschaftliche Anreize bietet. Dafür sind auch einheitliche Standards und Protokolle notwendig, die vorangetrieben werden sollten, um eine flächendeckende Integration von Fahrzeugen in das Energienetz zu ermöglichen.

4 Ausblick

Aus den Ergebnissen der BMBF-Kompetenzcluster greenBatt und BattNutzung lassen sich einerseits die ermutigenden Fortschritte der Batterieforschung in Deutschland und die damit verbundene potenzielle Ausstrahlung auf die entsprechende industrielle Landschaft erkennen. Andererseits zeigen nicht zuletzt die in diesem Policy Brief formulierten Handlungsempfehlungen den dringenden Bedarf für eine verstärkte und gleichzeitig auf wichtige verbleibende Herausforderungen fokussierte, mit öffentlichen Mitteln unterstützte Batterieforschung deutlich auf. Dies gilt umso mehr in einer Zeit, in der Staaten und Unternehmen vornehmlich in Asien und Nordamerika mit erheblichen Mitteln die Forschung und Entwicklung und damit verbunden die industrielle Umsetzung von Innovationen beim Design, der Entwicklung und Herstellung, der Wiederverwendung und dem Recycling von Antriebsbatterien (Lithium-

⁷ Vehicle to X

Ionen-Batterien und z. T. weitere Entwicklungen) weiterhin offensiv vorantreiben – nicht zuletzt um Marktanteile auf diesem dynamischen globalen Wachstumsmarkt zu sichern oder auszubauen.

Im Rahmen der BMBF-Kompetenzcluster greenBatt und BattNutzung haben zahlreiche Nachwuchswissenschaftler*innen ihre wissenschaftlichen und fachlichen Kompetenzen und Erfahrungen deutlich ausbauen können. Es ist essenziell die Batterieforschung als zentrales Zukunftsthema für Deutschland anzuerkennen und entsprechend weitere und nachhaltige Perspektiven für neue Generationen an Nachwuchswissenschaftler*innen in diesem Bereich zu schaffen. Diese Kompetenzträger*innen sind die zukünftigen Gründer*innen von Start-Ups, die zukünftigen Forschungs- und Betriebsleiter*innen in Unternehmen und einige von ihnen auch die zukünftigen Hochschullehrer*innen und Institutsleiter*innen, die zukünftig selbst nachhaltig für gut ausgebildeten Nachwuchs und damit nicht zuletzt auch für industrielle und wirtschaftliche Prosperität in Deutschland sorgen werden.

Öko-Institut e.V | Freiburg | Darmstadt | Berlin

Das Öko-Institut ist eines der europaweit führenden, unabhängigen Forschungs- und Beratungsinstitute für eine nachhaltige Zukunft. Seit der Gründung im Jahr 1977 erarbeitet das Institut Grundlagen und Strategien, wie die Vision einer nachhaltigen Entwicklung global, national und lokal umgesetzt werden kann. Das Institut ist an den Standorten Freiburg, Darmstadt und Berlin vertreten.

www.oeko.de | info@oeko.de

Kontakt

Dr. Matthias Buchert | m.buchert@oeko.de
Dr. Johannes Klinge | j.klinge@oeko.de
Jürgen Sutter | j.sutter@oeko.de
