

Ressourcen- schonende Batteriekreisläufe



Circular Economy
Initiative
Deutschland

Mit Circular Economy die
Elektromobilität antreiben

acatech/Circular Economy Initiative
Deutschland/SYSTEMIQ (Hrsg.)



SYSTEMIQ

 acatech
DEUTSCHE AKADEMIE DER
TECHNIKWISSENSCHAFTEN



Circular Economy
Initiative
Deutschland

Ressourcen- schonende Batteriekreisläufe

Mit Circular Economy die
Elektromobilität antreiben

acatech/Circular Economy Initiative
Deutschland/SYSTEMIQ (Hrsg.)



Leseanleitung für diesen Bericht

Dieser Bericht ist das **Ergebnis aus Diskussion und Zusammenarbeit** der Arbeitsgruppe „Traktionsbatterien“ der *Circular Economy Initiative Deutschland*. Die Initiative wird von acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften in Kooperation mit SYSTEMIQ koordiniert.

Der vorliegende Bericht stellt damit die **gemeinsame Expertise und Positionen aus Wissenschaft, Wirtschaft und Zivilgesellschaft** dar und **entspricht den acatech Leitlinien** einer wissenschaftsbasierten, unabhängigen, neutralen und gemeinwohlorientierten Beratung für Politik und Zivilgesellschaft.

Die **Zusammenfassung** gibt einen kondensierten allgemeinverständlichen Überblick über die Ergebnisse des Gesamtberichts.

Der **Hauptteil** des Berichts widmet sich der möglichst umfassenden Diskussion einer Circular Economy für Traktionsbatterien. Mehrere **Vertiefungen** zu besonders hervorzuhebenden Fokusthemen sind im Bericht detaillierter dargestellt und um Empfehlungen der Arbeitsgruppe ergänzt. **Die Struktur des Berichts** ist in Kapitel 1 Einleitung dargelegt.

Das **Glossar** enthält zentrale Definitionen zu Kernthemen und ist somit als wichtiger Bestandteil des Berichts zu berücksichtigen.

Zusätzlich enthält der Bericht Extrakte einer **Materialflussanalyse des Wuppertal Instituts**, die mögliche Effekte von Circular-Economy-Maßnahmen für Traktionsbatterien quantifiziert. Diese Analyse wurde unabhängig von der Arbeit der Arbeitsgruppe „Traktionsbatterien“ durchgeführt, wird hier aber der Vollständigkeit halber zitiert.

Der **Anhang** enthält die ausführlichen Berichte der Unterarbeitsgruppen zu den bearbeiteten **Pilotthemen**, einen Überblick über die **Mitglieder und die Struktur der Arbeitsgruppe** und eine Beschreibung der angewandten Methodik.

Inhalt

Zusammenfassung	5
Projekt	18
1 Einleitung	21
1.1 Fokus Traktionsbatterien und Einbettung in die Circular Economy Initiative Deutschland	24
1.2 Fokus der Arbeitsgruppe	24
1.3 Andere Initiativen im Vergleich und Mehrwert der Circular Economy Initiative Deutschland	26
2 Hintergrund einer Circular Economy für Traktionsbatterien in Deutschland	27
2.1 Relevanz des Themas Traktionsbatterien für die Circular Economy	27
2.2 Potenziale von Circular Economy für Traktionsbatterien	28
3 Zielbild für eine Circular Economy für Traktionsbatterien	37
3.1 Grundannahmen dieses Berichts	37
3.2 Rahmenbedingung eines treibhausgasneutralen Deutschlands als Teil einer europäischen Circular Economy bis 2050	38
3.3 Zielbild 2030 einer Circular Economy für Traktionsbatterien	39
3.4 Ökologische, soziale und wirtschaftliche Austauschbeziehungen (Trade-offs)	44
4 Pilotthemen der Arbeitsgruppe	46
4.1 Kenntnis des Batterielebens	46
4.2 Modellbasierte Entscheidungsplattform	49
4.3 Demontagenetzwerk für Traktionsbatterien	52
4.4 Integrierte Betrachtung der Pilotsteckbriefe	54
5 Handlungsempfehlungen für eine Circular Economy für Traktionsbatterien	55
5.1 Handlungsempfehlungen für die Politik	55
5.2 Handlungsempfehlungen für die Wirtschaft	63
5.3 Handlungsempfehlungen für die Wissenschaft	65



6 Roadmap und Ausblick	68
6.1 Nächste Schritte	70
7 Anhang	71
Literatur	128

Zusammenfassung

Zwischen Oktober 2019 und Mai 2020 hat die Arbeitsgruppe Traktionsbatterien der *Circular Economy Initiative Deutschland* einen Fahrplan ausgearbeitet, um eine Circular Economy für Traktionsbatterien zu erreichen. **Die Mitglieder der Arbeitsgruppe sind Vertreterinnen und Vertreter aus führenden akademischen Institutionen, deutschen Unternehmen und Vereinigungen mit ausgewiesenen Expertisen zu Traktionsbatterien – und zwar decken diese die gesamte Wertschöpfungskette von Traktionsbatterien ab:** von der Herstellung von Batteriematerial, Fertigungsanlagen, Batterien und Fahrzeugen bis hin zur Logistik, zum Recycling, zur Metallurgie, zu Softwareanwendungen und zur systemischen Integration. Damit konnte die Arbeitsgruppe ihr Ziel erreichen, eine möglichst gesamtheitliche Betrachtung des Themas zu gewährleisten.

Dieser Bericht ist das zentrale Ergebnis der Arbeitsgruppe Traktionsbatterien. Er umfasst die Diskussion über **Potenziale, Hürden und mögliche Zielkonflikte** einer Circular Economy für Traktionsbatterien, die Skizzierung eines **Zielbilds**, die Entwicklung **dreier Pilotsteckbriefe** zur Beschleunigung des Transformationsprozesses und die Ableitung von **Handlungsempfehlungen** für die zentralen Akteure. Damit unterstützen die Mitglieder die Initiierung und langfristige Verankerung der Circular Economy in Deutschland und darüber hinaus.

Hintergrund – die Circular Economy für Traktionsbatterien ist unabdingbar

I. **Für die Erreichung der Pariser Klimaziele ist die rechtzeitige Dekarbonisierung des Transportsektors unabdingbar. Neben einer allgemeinen Reduktion des Verkehrsaufkommens und einer Erhöhung von multi-modalen Mobilitätsangeboten ist dafür die schnelle Skalierung der Anzahl batterieelektrischer Fahrzeuge für den**

Individualverkehr von zentraler Bedeutung. Schon unter den heutigen Rahmenbedingungen können Elektrofahrzeuge bereits nach 50.000^{1,2} – 80.000³ gefahrenen Kilometern eine bessere Klimabilanz aufweisen als Fahrzeuge mit klassischen Verbrennungsmotoren. Neben verstärktem Einsatz von erneuerbaren Energien in Produktion und Nutzung der Fahrzeuge können Circular-Economy-Maßnahmen umfassend dazu beitragen, den CO₂-Fußabdruck der Batterieherstellung einschließlich Materialien weiter zu reduzieren. Das gesetzte Ziel Deutschlands ist gemäß Szenarien der nationalen Plattform Mobilität, dass in Deutschland im Jahr 2030 circa sieben bis zehn Millionen Elektrofahrzeuge fahren,^{4,5} und batterieelektrische Fahrzeuge werden voraussichtlich langfristig die überwiegende Mehrheit des PKW-Bestands ausmachen.^{6,7} Es ist also nötig, ihren Marktdurchbruch zu beschleunigen sowie sozialverträglich und umweltfreundlich zu gestalten.

II. **Circular-Economy-Maßnahmen verbessern die Ökologie und Ökonomie von Elektrofahrzeugen weiter und können außerdem zusätzliche Mehrwerte wie Kosteneinsparung, Sicherung der Beschäftigung und Steigerung wirtschaftlicher Resilienz bewirken. Kreislaufschließung trägt damit signifikant zur Erreichung der Pariser Klimaziele sowie der Entkopplung von Ressourcennutzung und Wohlstand bei.** Die Circular Economy umfasst insbesondere die produktivitätssteigernde Mehrfachnutzung, die Lebenszeitverlängerung (Reparatur und Instandsetzung) und ein effektives und effizientes Recycling. Diese Maßnahmen versprechen nicht nur eine deutliche Verbesserung der Umweltbilanz der Traktionsbatterien (zum Beispiel in Gestalt von bis zu vierzig Prozent reduzierten CO₂-Emissionen über deren Lebenszeit hinweg)⁸ und einen Beitrag zur Ressourcenenkopplung, sondern kurz- und mittelfristig auch die Sicherung und Beschleunigung des Markthochlaufs der Elektromobilität – mit einer Circular Economy könnten bis zu circa zehn Prozent der Nachfrage wichtiger Batteriematerialien im Jahr 2030 (bis zu vierzig Prozent bis 2050) bereitgestellt werden⁹ und bis zu etwa 20 Prozent Nettokosten über den Lebenszyklus der Batterien

1 | Vgl. Regett et al. 2019.

2 | Vgl. Regett 2019.

3 | Vgl. Agora Verkehrswende 2019.

4 | Vgl. Nationale Plattform Zukunft der Mobilität 2020.

5 | Einschließlich Hybridfahrzeuge und rein batterieelektrischer Fahrzeuge.

6 | Vgl. International Energy Agency 2019a.

7 | Zudem werden auch Brennstoffzellenfahrzeuge Lithium-Ionen-Batterien enthalten, um die Fahrdynamik und lange Lebenszeit der Brennstoffzelle zu gewährleisten.

8 | Vgl. World Economic Forum 2019.

9 | Vgl. Buchert et al. 2019.

hinweg gesenkt werden.¹⁰ Die Circular Economy leistet weiterhin einen Beitrag zu einer resilienteren Ökonomie und einer geringeren Abhängigkeit von Materialimporten, in dem nicht nur die sekundären Materialquellen im eigenen Land erschlossen werden, sondern auch exportfähige Wirtschafts-

einer solchen Wirtschaftsform auszuschöpfen, brauchen wir nun zum Beginn der Entwicklung dieser neu entstehenden Wertschöpfungsnetzwerke entschlossenes Handeln, um die richtigen Anreize, Technologien und Rahmenbedingungen zu schaffen.

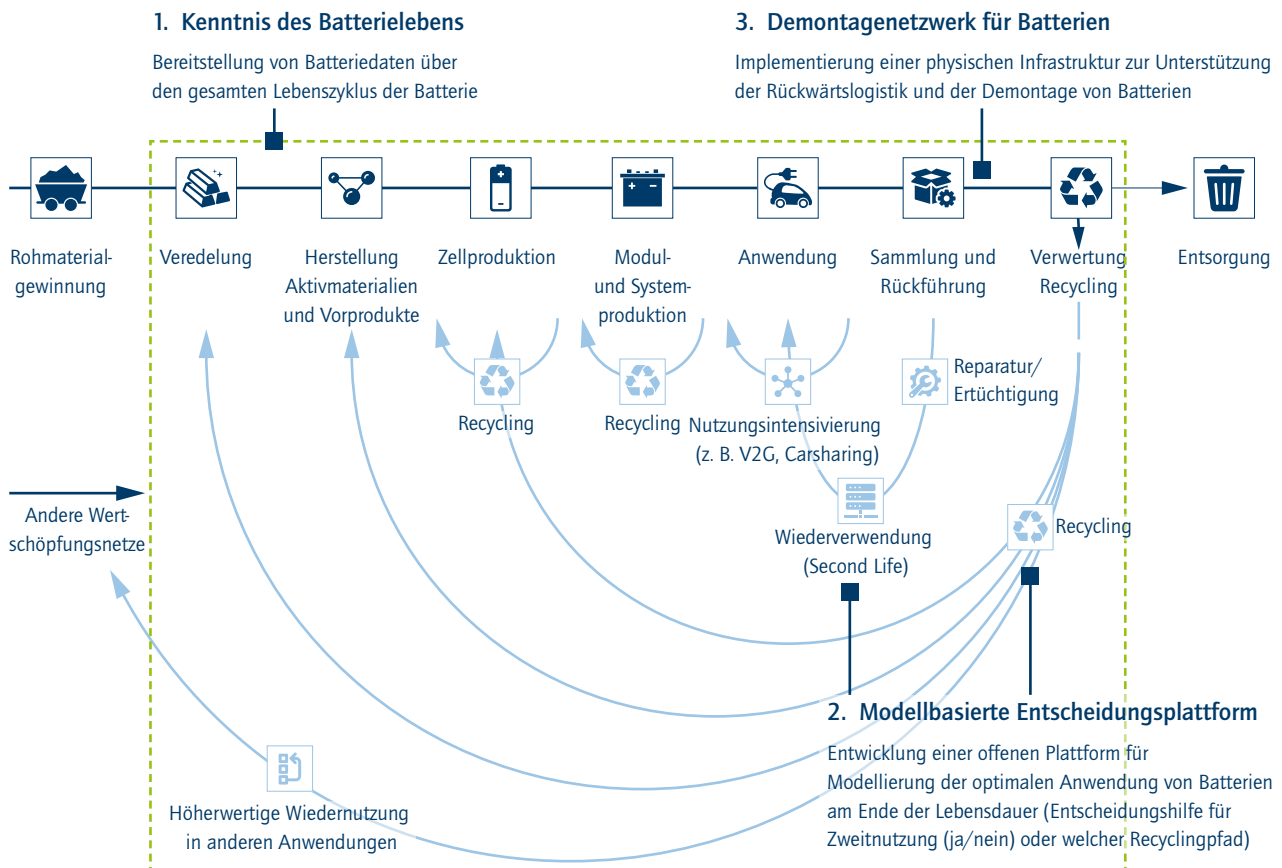


Abbildung 1: Darstellung der Circular Economy für Traktionsbatterien und Fokus der Arbeitsgruppe Traktionsbatterien. Die Ziffern 1. bis 3. verorten die bearbeiteten Pilotthemen entlang der Wertschöpfungskette (Quelle: eigene Darstellung, angelehnt an die Darstellung des World Economic Forum 2019)

modelle unterstützt werden. Derzeitige regulatorische Maßnahmen und Rahmenbedingungen (zum Beispiel niedrige, nicht nach Materialien differenzierte Rückgewinnungsquoten) sind jedoch nicht geeignet, um eine effektive Kreislaufführung von wichtigen Batteriematerialien zu unterstützen – sie müssen adjustiert werden. Es zeigt sich: Wir stehen am Anfang einer neuen Wirtschaftsform, bei der bereits vor und während der Produktentwicklung und -herstellung der Kreislauf mitgeplant werden muss. Um die Potenziale

III. Eine vom Wuppertal Institut durchgeführte Analyse inklusive Quantifizierung der möglichen Effekte von Circular-Economy-Hebeln auf Materialflüsse von Traktionsbatterien zeigt beträchtliche Potenziale für die Reduktion von Materialbedarf und Treibhausgas(THG)-Emissionen:¹¹ 8.100 Tonnen Lithium, 27.800 Tonnen Kobalt und 25.700 Tonnen Nickel könnten unter den dort gemachten Annahmen bis zum Jahr 2030 insgesamt aus in Deutschland auf den Markt gebrachten Fahrzeugen zurückgewonnen werden.

10 | Vgl. World Economic Forum 2019.
11 | Vgl. Wuppertal Institut [im Erscheinen].

Das entspräche nach heutigen Preisen (Stand: April 2020) einem Gesamtwert von circa 1,2 Milliarden Euro. Die Menge an Lithium würde dabei dem Zehnfachen des Bestands in Traktionsbatterien in Deutschland im Jahr 2020 entsprechen. Würden die Batterien in Deutschland recycelt, ergäbe sich in den hier vorgenommenen Berechnungen – basierend auf anerkannten Umwelteffekt-Datenbanken – bis zum Jahr 2050 eine kumulierte Energieeinsparung von 308 Petajoule, was dem Primärenergieverbrauch der Stadt Hamburg im Jahr 2019 entsprechen würde. Die Modellierung unterstützt damit die Aussagen, die von anderen renommierten Akteuren wie dem EU Joint Research Center, der Ellen MacArthur Foundation und Material Economics und insbesondere dem UN International Resource Panel getroffen werden: Circular-Economy-Maßnahmen haben großes Potenzial, den Fußabdruck von Industrieprodukten wie Traktionsbatterien signifikant zu verbessern, die Importunabhängigkeit von zentralen Batteriematerialien zu erhöhen und einen wirtschaftlichen Mehrwert zu schaffen. Detaillierte Ergebnisse einer Materialflussanalyse von Circular-Economy-Maßnahmen finden sich in Kapitel 2.2 und Anhang H.

IV. Der umfassende Einsatz digitaler Technologien ist notwendig, um ein zirkuläres Management von Traktionsbatterien einschließlich der notwendigen Datentransparenz zu ermöglichen. Die digitalen Technologien helfen unter anderem, geschäftsmodellrelevante Daten über den Lebenszyklus der Batterien zu generieren (insbesondere statische

Daten wie Herkunft und Umweltfußabdruck, dynamische Daten wie verbleibende Kapazität oder auch Standortdaten), zwischen relevanten Akteuren zu teilen und unternehmerischen wie auch gesellschaftlichen Nutzen zu maximieren. Erstmals wird durch digitale Technologien eine tatsächliche End-to-End-Transparenz über Wertverluste und -potenziale des neuen Mobilitäts- und Ressourcenparadigmas ermöglicht, das auch die sogenannte ACES (Autonomous, Connected, Electric, Shared)-Mobilität umfasst. Nicht zuletzt ermöglichen digitale Technologien zunehmende automatisierte zirkuläre Maßnahmen (etwa die Ortung am Lebensende, eine automatisierte Demontage, die Wiederaufbereitung und das Recycling) und hierdurch eine kostengünstigere, höherqualitative Produkt- und Material(wieder)nutzung. Daher richtet die *Circular Economy Initiative Deutschland* ihren Fokus nicht nur auf die stoffliche Circular Economy, sondern insbesondere auf die Relevanz digitaler Technologien für eine informationsgetriebene Circular Economy.

Grundsätzliche Erwägungen – Handlungsmaximen für die erfolgreiche Transformation

V. Die Circular Economy hat zur Aufgabe, mittelfristig einen fundamentalen Transformationsprozess in der gesamten Wirtschaft zu realisieren. Traktionsbatterien können in

Bereich	von ...	zu ...
 Wettbewerb	Konkurrenz	➔ „Coopetition“: Kollaborative Geschäftsmodelle
 Wertverständnis	Wert definiert durch kurzfristigen monetären Erfolg	➔ langfristiges, gesamtheitliches (ökonomisches, ökologisches, gesellschaftliches) Werteschaffen
 Anreizsetzung	Abfallentsorgung durch Extended Producer Responsibility	➔ Lebenszyklusmanagement durch Producer Ownership
 Informationsfluss	Fragmentierte Rohstoffmärkte und -flüsse	➔ Transparente, ökosoziale Prinzipien berücksichtigende Plattformen
 Ressourcennutzung	Optimierung auf schnellen linearen Produkt- und damit Materialdurchsatz	➔ Gesamtheitliche Wertmaximierung durch Fokus auf Produktivität und Werterhalt
 Basis der Wertschöpfung	Massenproduktion	➔ Smarte Verwertung von Informationen

Abbildung 2: Circular Economy bedeutet einen Transformationsprozess der Wirtschaft in vielen Bereichen (Quelle: eigene Darstellung)



diesem Kontext als prototypisches Beispiel gesehen werden, aus dem sich für die Gesamttransformation der Wirtschaft lernen lässt. Es gilt für die Transformation Herausforderungen zu meistern, sie verspricht aber große Chancen für die Generierung von gesamtgesellschaftlichem Wert und Zusammenhalt. Dafür sind unter anderem neue Kollaborationen zwischen den Akteuren sowie ein „Business-as-Unusual“-Denken nötig. Diese Transformation ist kein „nice to have“, sondern notwendig: zur Sicherung der Rohstoffversorgung für die Wirtschaft, zur Einhaltung von Klimazielen und letztlich zum Erhalt unserer Lebensgrundlage. Dabei können die Vorteile der Circular Economy für die betroffenen Unternehmen effektive Anreize zu selbstmotiviertem Handeln darstellen. Weitere Anreize sind durch den Gesetzgeber regulatorisch zu gestalten. Entschieden Handeln ist jetzt notwendig, um den Transformationsprozess zu ermöglichen. Die Arbeitsgruppe gibt hierzu zentralen Akteuren aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft grundlegende Überlegungen und Impulse an die Hand und auch praktische Ansätze für kurzfristig mögliches Handeln (Pilotprojekte) und Handlungsempfehlungen im Rahmen einer Roadmap.

VI. **Die Berücksichtigung einer systemischen Integration des Circular-Economy-Transformationsprozesses bei der Bewältigung von Zukunftsthemen ist wichtig – etwa beim ambitionierten Ausbau erneuerbarer Energien, bei der Harmonisierung europäischer Elektrizitätsmärkte und beim Ausbau multimodaler Elektromobilität.** Nur so können gesamtwirtschaftlich Produktivitätsgewinne erzielt werden. Die Mitglieder der Arbeitsgruppe unterstützen einen systemischen Ansatz ausdrücklich. In Kapitel 3.1 werden hierzu zehn grundsätzliche Empfehlungen und Positionierungen der Arbeitsgruppe Traktionsbatterien präsentiert.

VII. **Die Mitglieder der Arbeitsgruppe unterstützen die zehn Prinzipien für nachhaltige Batterien der Global Battery Alliance.** Diese beinhalten die Circular Economy für Batterien und umfassen dabei die produktive und sichere Nutzung von Batterien – als Beitrag zur Erreichung der Pariser Klimaziele –, die Sicherstellung von Transparenz, Energieeffizienz, Sektorkopplung und Nutzung erneuerbarer Energien, den Fokus auf die Erzeugung guter Arbeitsplätze weltweit und die unbedingte Einhaltung der Menschenrechte und die Orientierung an den UN-Nachhaltigkeitszielen. Denn die

Circular Economy ist kein Selbstzweck, sondern sie hat das klare Ziel, ökosoziale und wirtschaftliche Optimierung zu harmonisieren. Die Mitglieder der *Circular Economy Initiative Deutschland* unterstützen dies ausdrücklich.

Material	Empfohlene Rückgewinnungsraten*	
	2025 – verbindlich	2030 – anzustreben***, ****
Gesamtbatterie**	60 %	70 %
Lithium	50 %	85 %
Kobalt	85 %	90 %
Nickel	85 %	90 %
Kupfer	85 %	90 %
Stahl	90 %	95 %
Aluminium (ohne Al-Folien)	90 %	95 %

* über den Gesamt-Recyclingprozess exklusive Einsammlung beziehungsweise Rückführung ermittelt (siehe Abbildung 26), in Batteriequalität oder vergleichbar. Die Rückgewinnung der organischen Komponenten ist unter Optimierung der Exergie des Gesamtprozesses und nur sekundär nach Masseausbeute und nicht zulasten der Rückgewinnung hochwertiger Rezyklate der wichtigen Batteriematerialien auszulegen. Rückführungsverluste sind zusätzlich zu fakturieren und entsprechend zu minimieren.

** Die vorgeschlagenen Rückgewinnungsraten für die Gesamtbatterie sind flexibel anzusetzen, da organische und volatile Stoffe (Elektrolyt, Kunststoffe, Graphit) einen wesentlichen Anteil ausmachen (circa 30 bis 40 Prozent). Diese sind oft nicht oder nur unter hohem Aufwand in angemessener Qualität wiederzugewinnen, was zulasten der Energiebilanz und Ausbeute wichtiger Batteriematerialien gehen könnte. Da letzteren das Primat zukommt, sind strikte Mindestwerte für die Gesamtbatterie oder auch einzeln für Elektrolyt, Kunststoffe und Graphit voraussichtlich nicht als zielführend anzusehen. Ihre Rückgewinnung sollte nur unter Sicherstellung der Gesamtenergiebilanz und Rückgewinnung wichtiger Batteriematerialien in hoher Qualität angepeilt werden.

*** Aus Sicht der Agora Verkehrswende und des Öko-Instituts ist es unter regulatorischen Prämissen und aus Gründen der Investitionssicherheit vorzuziehen, auch die Werte für 2030 verbindlich zu machen und gegebenenfalls einer Revision zu unterziehen.

**** Aus Sicht des Öko-Instituts sind, basierend auf Arbeiten für die Europäische Kommission in Vorbereitung der Revision der EU Battery Directive, in Bezug auf Kobalt, Nickel und Kupfer für 2025 und 2030 ambitioniertere, jeweils fünf Prozent höhere Werte anzusetzen und im Sinne industrieller Best Practice erreichbar. Diese Werte sollten regelmäßig überprüft und in Abhängigkeit vom technischen Fortschritt auch in den gesetzlichen Vorgaben angepasst werden.

Tabelle 1: Empfehlungen der Arbeitsgruppe Traktionsbatterien für verbindlich geltend zu machende beziehungsweise anzustrebende Rückgewinnungsraten (unter Berücksichtigung der dazugehörigen Definitionen)

- VIII. **Regulatorische und anreizsetzende Maßnahmen durch die deutsche Regierung und die Institutionen der Europäischen Union sowie durch transnationale Unternehmenskooperationen sind unabdingbar, um ein effektives Marktumfeld für die Circular Economy von Batterien zu schaffen.** Hierzu gehören unter anderem faire Geschäftsbedingungen (Level Playing Fields) für die wirtschaftlichen Akteure durch harmonisierte Gesetzgebung, klare Definitionen, einheitliche Standards und (IT-)Infrastrukturen sowie Anreize für die Rückführung und hochwertige Weiternutzung beziehungsweise das Recycling von Traktionsbatterien. Diese Maßnahmen sollten an verschiedenen Interventionspunkten der Circular Economy ansetzen – von Anreizen zu dem Produkt- und System-Design for Circularity über die Einbettung der Traktionsbatterien in ressourcenproduktive Ökosysteme während der Nutzung und Sicherstellung einer hohen Sammelquote zum End-of-Life (EoL) bis zur **Beschreibung sinnvoller Definitionen und verbindlicher hoher Rückgewinnungsraten.** Insbesondere letzteren, den hohen Sammel- und Rückgewinnungsraten, kommen bei der Erreichung geschlossener Kreisläufe wichtige Rollen zu. Deshalb gibt die Arbeitsgruppe dazu – basierend auf der großen gemeinsamen Fachexpertise – konkrete, in die Praxis umsetzbare ambitionierte Empfehlungen. Diese berücksichtigen die Ergebnisse des gesamten Recyclingprozesses von der Demontage der Batterien bis hin zum Output der metallurgischen Verarbeitung zu hohen Qualitäten der Zielmaterialien (Vermeidung von Downcycling). Betrachtet werden sowohl die Optimierung der stofflichen Ausbeuten als auch die des Energieaufwands. **Die empfohlenen Werte sind daher unbedingt im Kontext der hier festgesetzten Systemgrenzen, Definitionen und weiteren Erläuterungen zu lesen** (siehe Vertiefung Batterierecycling).
- Auch und insbesondere die Bereitstellung geschäftsrelevanter Informationen über den Lebenszyklus hinweg muss hierbei berücksichtigt werden. So – und nur so! – kann die Circular Economy nicht nur den Wirtschaftsstandort Deutschland stärken, sondern zu einem nächsten Exportschlager „Made WITH Germany“ werden.
- IX. **Die Umsetzung muss in den europäischen Kontext, insbesondere in den European Green Deal (EGD) eingebettet werden.** Hierzu zählen vor allem die Pläne der Europäischen Kommission für die Schaffung von Produktpässen (Product Passports) im Rahmen der „European Data Spaces“, die Novelle relevanter Regularien (wie etwa die Batteriedirektive und Regulierung grenzüberschreitender Transporte) und weitere relevante Aktivitäten. Nur durch die Integration in den Europäischen Rahmen und „grüne“ Stimuluspakete kann eine zirkuläre Wirtschaft in Deutschland erfolgreich umgesetzt werden und eine nachhaltige Batteriewertschöpfung möglich sein.



Vertiefung I: Covid-19 und Circular Economy für Traktionsbatterien

Bis September 2020 forderte die Covid-19-Pandemie bereits über 800.000 Todesfälle weltweit. Die Auswirkungen des Virus waren und sind weiterhin gravierend: Neben gesundheitlichen Aspekten (der Versorgung von Erkrankten, den erforderlichen Maßnahmen bei der Bekämpfung der Ausbreitung des Virus, der Entwicklung von Medizin und Impfstoffen etc.) und Einschränkungen im öffentlichen und gesellschaftlichen Leben führte die Pandemie zur wahrscheinlich größten Rezession des letzten Jahrhunderts. Als Reaktion wurden weltweit, einschließlich Deutschland und der Europäischen Union, Förderpakete für die Wirtschaft in Billionenhöhe angeschoben.¹²

Wie EU-Kommissar Frans Timmermans betont, muss die Reaktion auf die Covid-19-Krise integraler Teil des European Green Deal sein.¹³ Entsprechende Investitionsprogramme **sollten auf die Transformation hin zu einer nachhaltigen Wirtschaft ausgerichtet werden** – so zum Beispiel in batterieelektrischen Fahrzeugen (Battery Electric Vehicles, BEV), bei erneuerbaren Energien, einer klimafreundlichen Infrastruktur¹⁴ – und einer Circular Economy. Denn aufgrund des wesentlichen Beitrags der Ressourcennutzung zum Klimawandel und der Bedrohung der planetaren Grenzen ist die Entkopplung des Wohlstands von der Ressourcennutzung unabdingbar. Die Circular Economy ist hierzu nötig und somit ebenfalls alternativlos.¹⁵ Jetzt getroffene Entscheidungen werden den Pfad der Treibhausgasemissionen und Ressourcennutzung für das nächste Jahrzehnt stark beeinflussen.

Förderpakete müssen daher kompatibel mit dem ambitionierten Transformationspfad hin zu einer klimafreundlichen Circular Economy gestaltet werden.

Dieser Bericht der Arbeitsgruppe Traktionsbatterien zeigt: **Die Circular Economy ermöglicht gesamtwirtschaftlich und spezifisch für Traktionsbatterien langfristig klare Vorteile** durch die Steigerung der Produktivität, Resilienz, Importunabhängigkeit und Beschäftigungssicherheit. Für Unternehmen ergeben sich grundsätzlich ähnliche Vorteile durch Kostensenkungen, neue Geschäftsmodelle, besseres Supply-Chain-Risk-Management etc. Doch um **diese Potenziale auszuschöpfen, bedarf es noch erheblicher gezielter Interventionen.**

Bei der Betrachtung des hier vorgeschlagenen Zielbilds und Transformationspfads zeigt die Covid-19-Krise zudem: Gravierende Veränderungen in unserer Lebensweise sind möglich und punktuelle ungewöhnlich erscheinende Maßnahmen können angemessen sein. So könnten neue Geschäftsmodelle und Wertschöpfungskettenstrukturen getestet und zur Skalierung gebracht werden, die ansonsten kaum rechtlich möglich, zu riskant (aus Gründen der Wirtschaftlichkeit oder kartellrechtlicher Bedenken) oder unrentabel wären.

Erfahrungen aus der Reaktion auf Covid-19 sollten daher bezüglich ihrer Übertragung auf die Transformation zur Circular Economy bewertet werden.

Die Ergebnisse der Arbeitsgruppe Traktionsbatterien können auch – oder gerade – in Zeiten der Covid-19-Krise dazu dienen, erste Schritte in Richtung des Transformationsprozesses hin zu einer klimafreundlichen, ressourcenentkoppelten Circular Economy für Traktionsbatterien zu ermöglichen.

Die Chance ergreifen – Zielbild einer Circular Economy für Traktionsbatterien und der Weg dorthin

- X. **Die Arbeitsgruppe hat ein gemeinsames Zielbild für die Circular Economy für Traktionsbatterien entwickelt.** Dieses beschreibt entlang der fünf Dimensionen Regulatorik,

Stoffströme, technische Entwicklung, Wertschöpfungsnetzwerke und innerbetriebliche Umsetzung, wie eine deutsche Circular Economy für Batterien im Jahr 2030 aussehen könnte.

Das Zielbild soll allen Beteiligten ermöglichen, eine gemeinsame Vorstellung der Circular Economy zu entwickeln und Maßnahmen sowie Erfolg daran auszurichten.

12 | Vgl. Nienaber/Wacket 2020.

13 | Vgl. Europäisches Parlament 2020.

14 | Vgl. Energy Transitions Commission 2020.

15 | Vgl. International Resource Panel 2020.



Abbildung 3: Zielbild der Arbeitsgruppe für eine Circular Economy für Traktionsbatterien (Quelle: eigene Darstellung)



Pilotprojekte

2021–2024: Kurzfristig „Grundlagen legen“

Politik



1. Festlegung klarer und verbindlicher **Definitionen** und **Standards**: zum Beispiel CO₂, Menschenrechte etc. unter Wahrung von Datenschutz und -sicherheit
2. Klarstellung von **Rechten und Pflichten** aller Akteure, zum Beispiel in den Bereichen Arbeitsschutz und -sicherheit, End-of-Waste-Pflichten, Reporting, und Start von **Anreizsystemen** (zum Beispiel Pfandsysteme)
3. Schaffung eines **zentralen institutionellen Trägers** zur Sicherstellung der Transformation
4. Sicherstellung von **Bildung und Ausbildung**

Wirtschaft



5. Kollaborative Initiierung gemeinsamer (**Mindest**-)Standards für Prozessketten- und Systemdesign im Sinne des systemischen Designs for Circularity
6. Etablierung industrieweiter Vereinbarungen, unter anderem zu Indikatoren für die **Messung von Zirkularität** (ökonomisch, ökologisch, sozial sowie deren Interaktionen) und sicherheitsrelevante Aspekte
7. Sicherstellung der **Ausbildung** von Fachkräften für EoL-Management von Traktionsbatterien

Wissenschaft



8. Wissenschaftlich fundierter Beitrag zur Etablierung allgemein akzeptierter **Kennzahlen, Messgrößen und -methoden**
9. Technische und transdisziplinäre **Grundlagenforschung**, insbesondere für die Unterstützung der Optimierung der gesamtsystemischen Effekte
10. Bereitstellung **akademischer Ausbildung** für Circular Economy

Pilotprojekte

Bis 2027: Mittelfristig „Struktur schaffen“

Politik



11. **Maßnahmen zur Erhöhung der Transparenz** in der Industrie und für Konsumierende sowie zu deren technischen Umsetzung durch Batteriepass und Data Spaces, wie etwa standardisierte Kennzeichnung des Umweltfußabdrucks
12. Skalieren der **Wirtschafts- und Wissenschaftsförderung** für relevante Technologien, Geschäftsmodelle und Wissen
13. **Harmonisierung** nationaler und transnationaler Regulatorik

Wirtschaft



14. Bereitstellung **relevanter Informationen** und Daten zwischen relevanten Akteuren, unter anderem durch die Anwendung **digitaler Technologien** wie von Produktpässen
15. Entwicklung und Skalierung **zirkulärer Geschäftsmodelle**, die über das Recycling der Altbatterien hinausgehend Produktivität steigern
16. Skalierung von **Investitionen** in die Circular Economy, unter anderem in die Infrastruktur für Sammlung und Management von EoL-Batterien und digitalen Technologien

Wissenschaft



17. **Anwendungsnahe Forschung und Entwicklung**, insbesondere für neue interdisziplinäre Lösungen für die Optimierung der gesamtsystemischen Effekte

Pilotprojekte

Bis 2030: Langfristig „Durchbruch erwirken“

Politik



18. Implementierung von **Sanktionen** für die Nichteinhaltung existierender Pflichten
19. **Berücksichtigung der systemischen Potenziale** von Traktionsbatterien im Zuge der Energiewende (unter anderem durch Simulationen und Big-Data-Analysen)
20. Transfer der Maßnahmen in den **globalen Kontext**, für Leitmärkte einerseits (Race to the Top) und sich entwickelnde Ökonomien andererseits (Entwicklungszusammenarbeit)

Wirtschaft



21. **Planung unter Berücksichtigung systemischer Ressourcen- und Energieeffizienz**, gemessen über den Wertschöpfungsprozess hinweg (Entropie/Exergie) als Maß der Zirkularität
22. Aufbau einer europaweiten **Infrastruktur zur Demontage und zum Recycling** der zum Ende ihres Lebens rücklaufenden Traktionsbatterien

Wissenschaft



23. Bereitstellung von **Methoden und Tools**, unter anderem für die Bewertung von Energie- und Stoffströmen und ihrer Effekte sowie von Geschäftsmodellen auch ohne technisches Fachwissen

Abbildung 4: Roadmap der Arbeitsgruppe Traktionsbatterien, basierend auf einer Synthese der Handlungsempfehlungen (siehe Kapitel 5) (Quelle: eigene Darstellung)

XI. Durch die Entwicklung von Handlungsempfehlungen für Politik, Wirtschaft und Wissenschaft sowie deren zeitlicher Priorisierung schafft die *Circular Economy Initiative Deutschland* eine Roadmap zur Erreichung des Zielbilds.

Damit einher geht der Aufruf der Arbeitsgruppe an die Entscheidungsträger, in ihrem Bereich und unter Kooperation mit den anderen Akteuren in Aktion zu treten. Die detaillierten Handlungsempfehlungen finden sich in Kapitel 5.

Der deutsche Gesetzgeber ist als zentraler Akteur aufgerufen, im europäischen Prozess ambitionierte Impulse zu setzen. Sowohl im europäischen als auch nationalen Kontext sollte die Bandbreite ressourcenpolitischer Instrumente (das heißt ökonomische, ordnungsrechtliche, informatorische, sowie Bildung und Forschung) genutzt werden, um den Transformationsprozess hin zur Circular Economy zu beschleunigen.

Die Mitglieder der Arbeitsgruppe Traktionsbatterien und die Geschäftsstelle der *Circular Economy Initiative Deutschland* bieten an, diesen Prozess durch ihre Expertise zu unterstützen.

XII. Durch die Arbeit an drei Pilotsteckbriefen konkretisiert die Arbeitsgruppe Traktionsbatterien Themen von zentraler Wichtigkeit und skizziert mögliche Schritte für die konkrete Umsetzung, um den Transformationsprozess zu beschleunigen. Folgende Kernaussagen fassen die grundsätzliche Relevanz des jeweiligen Pilotthemas für die erfolgreiche Implementierung einer zirkulären Batteriewertschöpfung zusammen (siehe Steckbriefe, Kapitel 4 und Anhang für ausführlichere Ergebnisse):

1. **Pilotsteckbrief „Kenntnis des Batterielebens“** (Zielsetzung: systematische Bereitstellung von Batteriedaten (Datenverfügbarkeit) über den gesamten Lebenszyklus der Traktionsbatterie)

- Die Nutzung von Daten und Informationen aus den Batterielebenszyklen spielt eine zentrale Rolle bei der Initiierung und Umsetzung unternehmens- und lieferkettenübergreifender Zusammenarbeit. Durch eine gesteigerte Datentransparenz können ökologische („Dekarbonisierung“) und soziale (Responsible Sourcing)

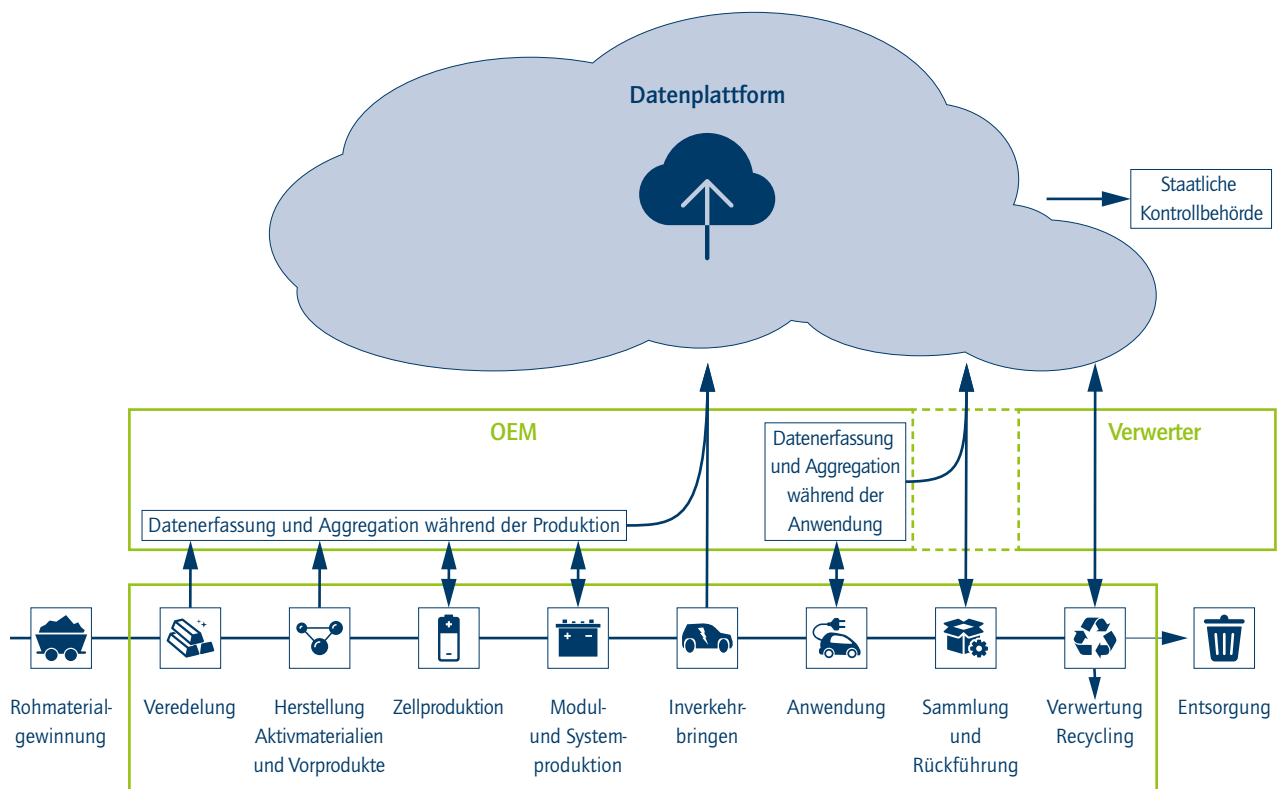


Abbildung 5: Kernprodukt der Unterarbeitsgruppe 1 sind Empfehlungen hinsichtlich der Informationsflüsse zur Förderung der Kreislaufführung von Traktionsbatterien (Quelle: eigene Darstellung, angelehnt an die Darstellung des World Economic Forum 2019)

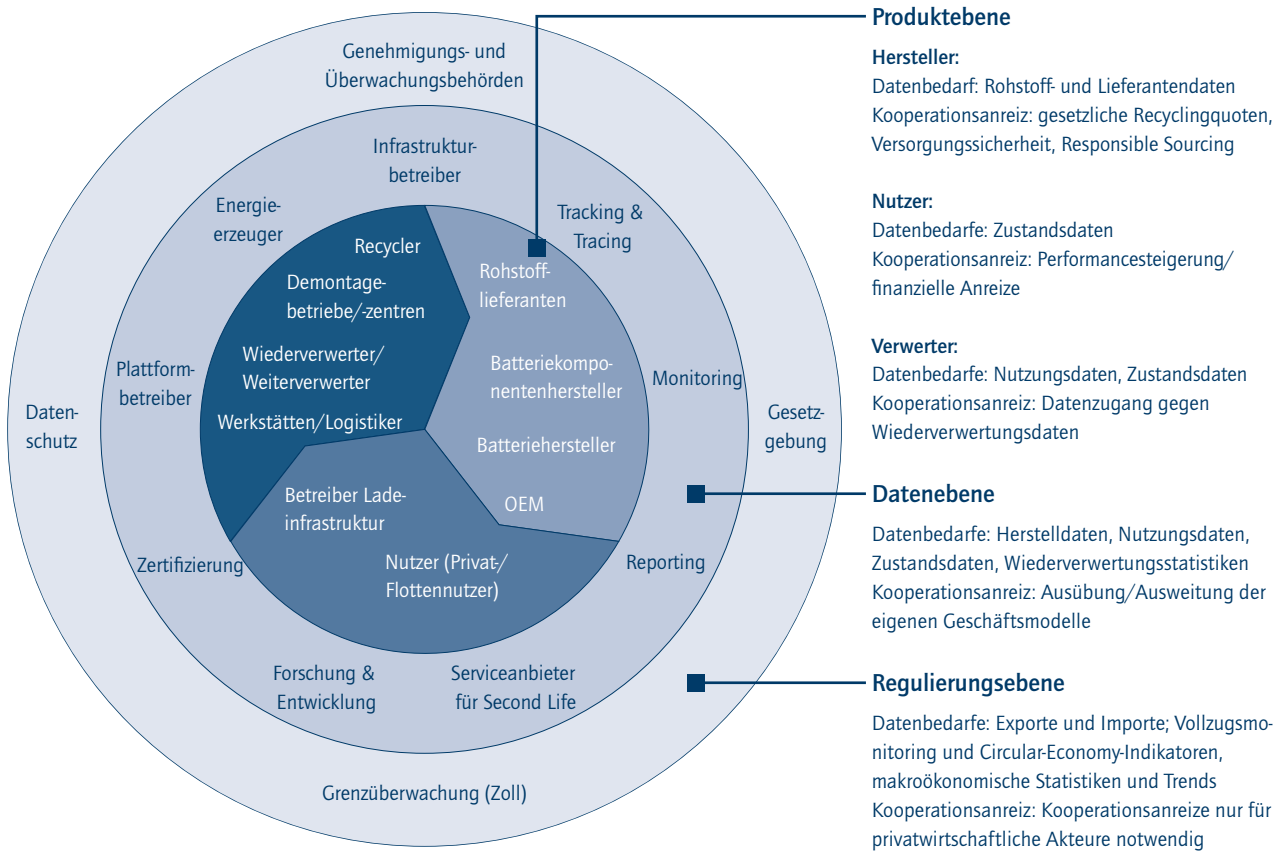


Abbildung 6: Akteure, Datenbedarfe und Kooperationsanreize für eine Pilotumsetzung (Quelle: eigene Darstellung)

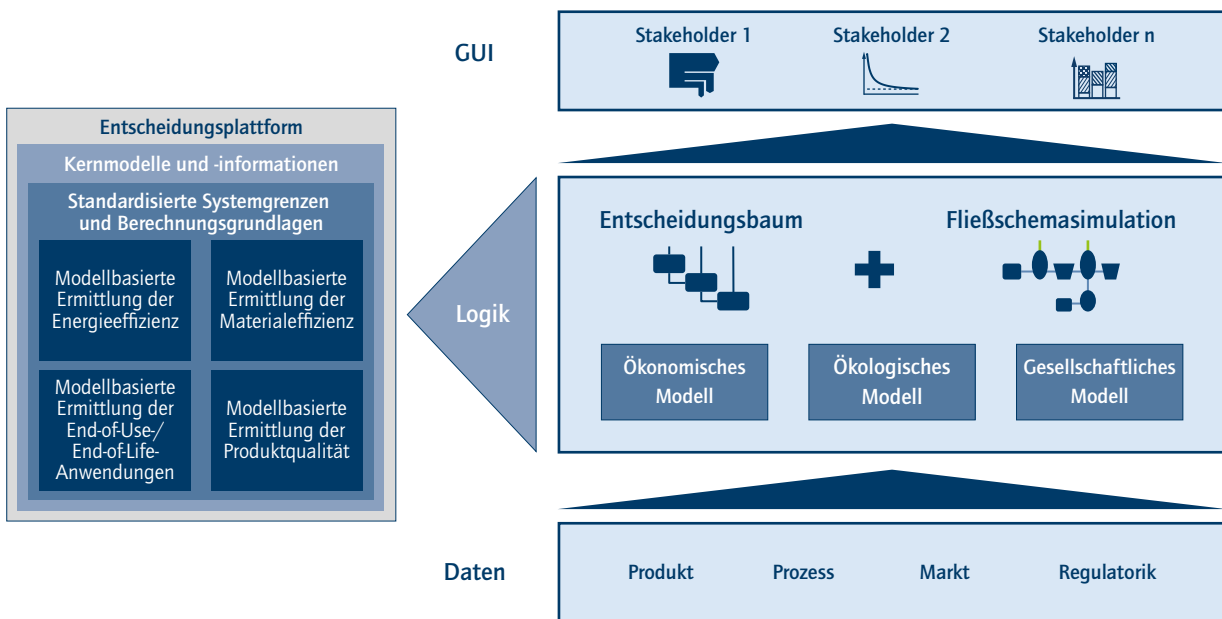


Abbildung 7: Modellstruktur der Entscheidungsplattform (Quelle: eigene Darstellung)

Zielparame-ter verdeutlicht und das ökonomische Nutzungspotenzial der Batterien (Effizienz und Rohstoffverfügbarkeit) über ihren gesamten Lebensweg gesteigert werden.

- Die Mitglieder der Arbeitsgruppe machen Vorschläge zu Effekten, Inhalten und Anreizen für relevante Akteure und strukturelle Bedingungen in der Umsetzung. Eine zentrale Erkenntnis: Da grundsätzlich bereits viele Daten über den Zustand einer Batterie vorhanden, aber meist nicht verfügbar sind, liegt eine große Herausforderung darin, für alle beteiligten Akteure Anreize zum Teilen von Daten zu schaffen. Insbesondere die Verfügbarkeit der Daten der Fahrzeughersteller über die Erst-anwendung und das entsprechende Batterieverhalten sowie über die Verortung der Batterie am Ende der (Erst-)Nutzungsphase sind als zentrale Punkte identifiziert worden. Diesbezüglich müssen verstärkt Anreize für Fahrzeughersteller und Nutzerinnen und Nutzer/ Eigentümerinnen und Eigentümer zur Bereitstellung von Betriebsdaten unter Berücksichtigung des Datenschutzes geschaffen werden.
2. **Pilotsteckbrief „Modellbasierte Entscheidungsplattform“** (Zielsetzung: Bereitstellung einer Entscheidungsgrundlage über eine offene Plattform zur Modellierung der optimalen Anwendung von Batterien am Ende der Lebensdauer)
- Eine modellbasierte Entscheidungsunterstützung trägt zur optimierten Entscheidungsfindung (Second Life oder verschiedene Recyclingrouten) für die Behandlung von gebrauchten Traktionsbatterien bei. Das Ziel ist die übergeordnete, optimierte Gestaltung des Batterie-lebenszyklus und des Netzwerks der Akteure mit fairer Verteilung von Aufwendungen und Erlösen.
 - Die Mitglieder skizzieren die grundlegenden Bedingungen eines solchen Werkzeugs sowie Mehrwerte und Anreize für beteiligte Akteure. Eine Kernaussage: Die modellbasierte Entscheidungsunterstützung muss auf reale, validierte Daten zurückgreifen und insbesondere auf-tretende Exergieverluste und erzielbare Outputqualitäten in den verschiedenen Optionen für das Management der Traktionsbatterien am Ende ihres ersten Lebens im Fahr-zeug transparent berücksichtigen.

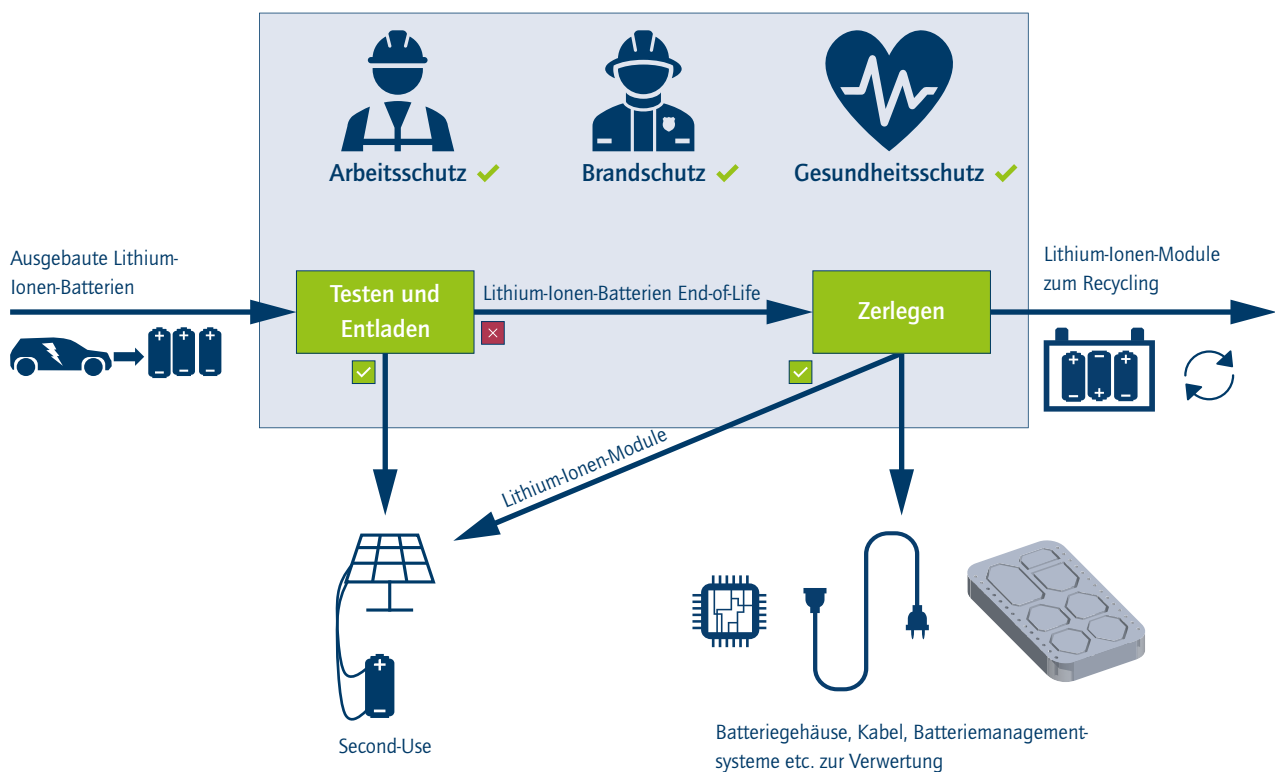


Abbildung 8: Konzept einer Demontageanlage für Traktionsbatterien (Quelle: eigene Darstellung)

3. **Pilotsteckbrief „Demontagenetzwerk für Traktionsbatterien“** (Zielsetzung: Skizzierung eines „Projektplans“ zur Implementierung eines europäischen Demontagenetzwerks)

- Der Aufbau eines europaweiten Netzwerks von leistungsfähigen Demontageanlagen für Traktionsbatterien ist essenziell für den Erfolg der gesamten Recycling- beziehungsweise Wiederverwendungskette, da sie das wichtige Zwischenglied zwischen Erfassung/Sammlung (Vertragswerkstätten etc.) und Weiterbehandlung/Recycling (oder Second Life) der Batteriemodule darstellen.
- Die Mitglieder der Arbeitsgruppe beschreiben die Bedingungen, die für die sichere und effiziente Handhabung von End-of-Life(EoL)-Traktionsbatterien zu berücksichtigen sind, sowie die relevanten (Industrie-)Standards und die nötigen Schritte hin zu einem paneuropäischen Demontagenetzwerk. Zentral dabei: Investitionsentscheidungen für neue Demontageanlagen müssen hinsichtlich Zeitpunkt, Wahl des Anlagenstandorts,

Dimensionierung der Anlagengröße entsprechend künftig wachsenden Rücklaufmengen und Konkretisierungen der Anlagenausstattung (Grad und Anpassungsfähigkeit der Automatisierung in Bezug auf wechselnde Batterieformate und -chemien) auf einer validen Datengrundlage getroffen werden. So kann die Recyclinginfrastruktur passgenau verbessert und im europäischen Maßstab skalierbar gemacht werden. Zudem müssen dringend Standards insbesondere für die sichere Handhabung der potenziell gefährlichen Batteriesysteme etabliert werden und die zugehörige Ausbildung von Fachpersonal sichergestellt werden.

Durch die Entwicklung exemplarischer Roadmaps sollen die Pilotthemen überdies die schnelle Umsetzung der Circular Economy erleichtern. Die Pilotsteckbriefe wurden zusätzlich in ihren Wechselwirkungen diskutiert und entsprechende Schnittstellen definiert (siehe Abbildung 9). Die Steckbriefe beinhalten damit ein tiefgehendes themenspezifisches Wissen und Handlungsempfehlungen zur Arbeit der Arbeitsgruppe Traktionsbatterien.



Abbildung 9: Wechselwirkungen und Synergien zwischen den Pilotthemen (Quelle: eigene Darstellung)

XIII. **Offene Fragen verbleiben, bei deren Klärung die weitere Kooperation und Forschung sowie Entwicklung notwendig sind. Auch der Zivilgesellschaft kommt dabei eine aktive Rolle zu.** Insbesondere traten hierbei hervor:

1. **Lebenszeit von Traktionsbatterien verlängern.** Wie kann das ökonomische und ökologische Potenzial von Second-Life-Anwendungen von Traktionsbatterien realisiert werden und inwieweit ist dies gesamtheitlich (unter anderem längere Verweildauer der Materialien im Kreislauf) erstrebenswert?
2. **Kreisläufe schließen.** Wie sind Anreiz- und Sanktionsmechanismen sowie Wertschöpfungsnetzwerke konkret auszugestalten, um eine optimale Rückführung und eine hochwertige Verwertung von Traktionsbatterien zu gewährleisten?
3. **Systemische Produktivität maximieren.** Wie kann das Potenzial von Traktionsbatterien für die Optimierung der Elektrizitätsnetze genutzt werden (Sektorkopplung, Vehicle-to-X - V2X)? Welche Rolle kommt den Bürgerinnen und Bürgern sowie Konsumierenden zu?

Im Rahmen der Transformation hin zur Circular Economy für Traktionsbatterien gilt es auch diese Herausforderungen zu adressieren.

Nächste Schritte

Mit diesem Bericht leisten die Mitglieder der Arbeitsgruppe Traktionsbatterien der *Circular Economy Initiative Deutschland* einen Beitrag zur Realisierung einer Circular Economy für Traktionsbatterien. Wie der Sektor insgesamt, so steht auch die Circular Economy noch am Anfang und benötigt weiterhin einen starken interdisziplinären und kollaborativen Austausch.

Denn auch in Deutschland sind wir trotz aller Fortschritte im Abfallmanagement heute noch weit von einer realen Circular Economy im Sinne des beschriebenen Zielbilds entfernt, doch durch inkrementelle Verbesserungen allein wird sich diese nicht erreichen lassen. Es bedarf eines fundamentalen Wandels bei Design, Nutzung und Verwertung von Batterien und einer umfassenden Weiterentwicklung von Regulatorik und Geschäftsmodellen, um den systemischen Wandel hin zur Ressourcenproduktivität durch eine physische Circular Economy zu ermöglichen. Der Auftrag geht an alle beteiligten Akteure in Politik, Wirtschaft und Wissenschaft, die gemeinsame Weiterentwicklung und Umsetzung der hier aufgezeigten Handlungsempfehlungen unmittelbar zu starten.

Ziel und Vision der Circular Economy für Traktionsbatterien

Traktionsbatterien stellen eine große Chance für die Dekarbonisierung dar. Sie müssen dafür jedoch im Sinne einer smarten Circular Economy gemanagt werden. Bis 2030 müssen Traktionsbatterien für eine Kreislaufwirtschaft gestaltet, höchst produktiv und so lange wie möglich eingesetzt, vollständig eingesammelt und in hoher Qualität recycled werden. So können sie langfristig ein zentrales Element einer weitgehend zirkulären und dadurch ressourcenproduktiven, dekarbonisierten Wirtschaft mit minimierten Systemverlusten und maximierter Rohstoffproduktivität sein. Die hier vorgestellten Empfehlungen einschließlich Roadmap zeichnen einen Weg hin zu diesem Zielbild, für das Entscheider aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft kurz-, mittel-, und langfristig Maßnahmen umsetzen müssen.



Projekt

Herausgeber

- acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften
- Geschäftsstelle Circular Economy Initiative Deutschland (CEID)
- SYSTEMIQ Ltd.

Leitung der Arbeitsgruppe

- Dr.-Ing. Christian Hagelüken, Umicore
- Prof. Dr.-Ing. Arno Kwade, Technische Universität Braunschweig

Mitglieder der Arbeitsgruppe

- Dr. Matthias Buchert, Öko-Institut e. V.
- Dr. Matteo Carrara, BMW Group
- Steven Daelemans, Covestro
- Prof. Dr. Helmut Ehrenberg, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
- Dr. Sarah Fluchs, PEM Motion
- Prof. Dr.-Ing. Daniel Goldmann, Technische Universität Clausthal
- Georg Henneboel, SAP
- Prof. Dr.-Ing. Christoph Herrmann, Technische Universität Braunschweig
- Dr.-Ing. Julia Hobohm, GRS Batterien
- Prof. Dr.-Ing. Holger Kohl, Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik (IPK)/ Technische Universität Berlin
- Dr. Michael Krausa, Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien
- Johanna Lettgen, Reverse Logistics Group
- Kerstin Meyer, Agora Verkehrswende

- Manuel Michel, Daimler
- Marcel Rakowski, Reverse Logistics Group
- Prof. Dr. Markus Reuter, Helmholtz-Zentrum Dresden Rossendorf (HZDR)
- Prof. Dr. Dirk Uwe Sauer, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH)
- Michael Schnell, Daimler
- Magnus Schulz, Daimler
- Dr. Paul Spurk, Umicore
- Sebastian Taubensee, Siemens
- Wassilij Weber, Interseroh
- Dr.-Ing. Hartmut Zefferer, Trumpf

Inhaltliche Unterstützung der Arbeitsgruppe

- Steffen Blömeke, Technische Universität Braunschweig
- Dr. Christian Bussar, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH)
- Juan Felipe Cerdas, Technische Universität Braunschweig
- Laura Gottschalk, Technische Universität Braunschweig
- Alexander Hahn, Technische Universität Braunschweig
- Elisa Reker-Gluhic, acatech Geschäftsstelle/Nationale Plattform Zukunft der Mobilität
- Dr. Jörn Kobus, SYSTEMIQ
- Bernd Muschard, Technische Universität Berlin
- Wolf Christian Schliephack, Technische Universität Berlin
- Dr. Florian Sigel, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
- Philipp Stöcker, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH)
- Dr.-Ing. Moritz Teuber, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH)
- Tilmann Vahle, SYSTEMIQ
- Dr. Reinhard von Wittken, CEID Geschäftsstelle/acatech Geschäftsstelle
- Dr. Susanne Kadner, Leitung CEID Geschäftsstelle/acatech Geschäftsstelle

Koordination und Redaktion

- Tilmann Vahle, SYSTEMIQ
- Dr. Reinhard von Wittken, CEID Geschäftsstelle/acatech Geschäftsstelle
- Dr. Jörn Kobus, SYSTEMIQ
- Dr. Susanne Kadner, Leitung CEID Geschäftsstelle/acatech Geschäftsstelle

Externe Reviewer

- Jonathan Eckhardt, Global Battery Alliance
- Prof. Dr. Sabine Flamme, Fachhochschule Münster
- Prof. Dr. Bernd Friedrich, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH)
- Prof. Dr. Achim Kampker, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH)
- Julia Poliscanova, Transport & Environment
- Prof. Dr. Alexander Sauer, Universität Stuttgart
- Prof. Dr. Gerhard Sextl, Julius-Maximilians-Universität Würzburg
- Prof. Dr. Martin Winter, Westfälische Wilhelms-Universität Münster (WWU)

Projektgruppe zum Pilotsteckbrief 1 „Kenntnis des Batterielebens“

Moderation

- Prof. Dr.-Ing. Holger Kohl, Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik (IPK)/ Technische Universität Berlin
- Philipp Stöcker, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH)

Mitglieder

- Dr. Christian Bussar, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH)
- Dr. Matteo Carrara, BMW Group
- Laura Gottschalk, Technische Universität Braunschweig
- Dr.-Ing. Christian Hagelüken, Umicore
- Georg Henneboel, SAP
- Dr. Michael Krausa, Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien
- Prof. Dr.-Ing. Arno Kwade, Technische Universität Braunschweig
- Johanna Lettgen, Reverse Logistics Group
- Kerstin Meyer, Agora Verkehrswende
- Manuel Michel, Daimler
- Prof. Dr. Markus Reuter, Helmholtz-Zentrum Dresden Rossendorf (HZDR)
- Michael Schnell, Daimler
- Magnus Schulz, Daimler
- Dr. Florian Sigel, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
- Dr.-Ing. Moritz Teuber, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH)



Projektgruppe zum Pilotsteckbrief 2 „Modellbasierte Entscheidungs- plattform“

Moderation

- Prof. Dr.-Ing. Christoph Herrmann, Technische Universität Braunschweig
- Juan Felipe Cerdas, Technische Universität Braunschweig
- Steffen Blömeke, Technische Universität Braunschweig

Mitglieder

- Dr. Matteo Carrara, BMW Group
- Dr.-Ing. Christian Hagelüken, Umicore
- Alexander Hahn, Technische Universität Braunschweig
- Dr. Michael Krausa, Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien
- Prof. Dr.-Ing. Arno Kwade, Technische Universität Braunschweig
- Kerstin Meyer, Agora Verkehrswende
- Prof. Dr. Markus Reuter, Helmholtz-Zentrum Dresden Rossendorf (HZDR)
- Michael Schnell, Daimler
- Magnus Schulz, Daimler
- Dr.-Ing Hartmut Zefferer, Trumpf

Projektgruppe zum Pilotsteckbrief 3 „Demontagenetzwerke für Traktionsbatterien“

Moderation

Dr. Matthias Buchert, Öko-Institut e.V.

Mitglieder

- Dr. Matteo Carrara, BMW Group
- Steven Daelemans, Covestro
- Dr. Sarah Fluchs, PEM Motion
- Prof. Dr.-Ing. Daniel Goldmann, Technische Universität Clausthal
- Dr.-Ing. Christian Hagelüken, Umicore
- Prof. Dr.-Ing. Arno Kwade, Technische Universität Braunschweig
- Manuel Michel, Daimler
- Marcel Rakowski, Reverse Logistics Group
- Michael Schnell, Mercedes Benz AG
- Dr. Paul Spurk, Umicore
- Sebastian Taubensee, Siemens
- Wassilij Weber, Interseroh

Projektlaufzeit:

März 2019 – Februar 2021

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

1 Einleitung

Für die **Erreichung der Pariser Klimaziele** ist die rechtzeitige Dekarbonisierung des Transportsektors unabdingbar. Neben einer allgemeinen Reduktion des Verkehrsaufkommens und einer Erhöhung von multi-modalen Mobilitätsangeboten ist die schnelle **Skalierung der Anzahl batterieelektrischer Fahrzeuge** (Battery Electric Vehicle, BEV)¹⁶ **für den Individualverkehr** von zentraler Bedeutung. Schon unter den heutigen Rahmenbedingungen können sie bereits nach 50.000^{17, 18} – 80.000¹⁹ gefahrenen Kilometern eine bessere Klimabilanz auf als Fahrzeuge mit klassischen Verbrennungsmotoren aufweisen. Neueste Studien zeigen sogar auf, dass dies bei batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) mit neuesten Batteriegenerationen unter heutigen Bedingungen bereits ab nur 30.000 km der Fall sein kann²⁰ und dass diese Vorteile über verschiedenste Fahrzeugtypen und Anwendungsbereiche robust sind.^{21, 22} Neben verstärktem Einsatz von erneuerbaren Energien in Produktion und Nutzung der Fahrzeuge können Circular-Economy-Maßnahmen umfassend dazu beitragen, den CO₂-Fußabdruck der Batterieherstellung einschließlich Materialien weiter zu reduzieren. Das gesetzte Ziel Deutschlands ist gemäß Szenarien der nationalen Plattform Mobilität, dass in Deutschland 2030 circa sieben bis zehn Millionen Elektrofahrzeuge fahren,^{23, 24} und batterieelektrische Fahrzeuge werden voraussichtlich langfristig die überwiegende Mehrheit des PKW-Bestands ausmachen.^{25, 26} Es ist also nötig, ihren Marktdurchbruch zu beschleunigen sowie sozialverträglich und umweltfreundlich zu gestalten.

Circular-Economy²⁷-Maßnahmen haben das Potenzial, nicht nur die Umweltbilanz von batterieelektrischen Fahrzeugen weiter zu verbessern, sondern auch deren Markthochlauf durch Materialbereitstellung und Nettokostensenkung über den Lebenszyklus hinweg zu beschleunigen. Außerdem können sie einen Beitrag zu einer resilienteren Ökonomie leisten und die Ressourcenentkopplung²⁸ unterstützen, indem verstärkt Sekundärrohstoffquellen

im eigenen Land genutzt werden.²⁹ Es besteht dabei die Notwendigkeit eines systemischen, umfassenden Ansatzes, der von der wartungs- und recyclinggerechten Gestaltung der Batterie über die Sicherstellung einer möglichst produktiven und langen Anwendung der Batterie bis hin zu einer effektiven Verwertungs-³⁰ und Recyclinginfrastruktur den gesamten Lebenszyklus berücksichtigt. Nur so kann langfristig eine weitgehend zirkuläre und dadurch ressourcenproduktive, dekarbonisierte Wirtschaft mit minimierten Systemverlusten und maximierter Rohstoffproduktivität erreicht werden.

Von besonderer Bedeutung ist in diesem Kontext zum einen die Schließung des Batteriestoffkreislaufs (**Recycling**),³¹ zum anderen kann die Lebenszeitverlängerung zum Beispiel durch **Reparatur³² oder Instandsetzung³³** (Refurbishment) beziehungsweise **Wiederaufbereitung³⁴** zur Weiterverwendung von Batterien führen. Hier können auch andere, stationäre Anwendungen (Second Life, **SL**) vor dem eigentlichen Recycling wichtige Beiträge liefern. Auch während der Nutzungsphase existieren Circular-Economy-Maßnahmen, die die Produktivität der Produkte und Materialien – insbesondere durch Mehrfachnutzung – steigern können. Hierzu gehören insbesondere **smartes Laden (V1G/V2G/V2X)**³⁵ und **Car- und Ridesharing**. Durch diese Maßnahmen sollen die Ressourcenproduktivität in der Batteriewertschöpfung verbessert sowie die Potenziale einer konsequenten Kreislaufführung entlang des Lebenszyklus der Lithium-Ionen-Traktionsbatterie unter Einbeziehen aller relevanten Akteure genutzt werden.

Werden außerdem **digitale Technologien und Daten** umfassend genutzt, kann die Circular Economy auf ein neues Level gehoben werden. Wenn geschäftsmodellrelevante Daten über den Lebenszyklus der Batterien hinweg (insbesondere statische Daten wie Herkunft und Umweltfußabdruck, dynamische Daten wie verbleibende Kapazität oder auch Standortdaten bei Eigentumsübergang) bereitgestellt werden, wird es möglich, unternehmerischen und gesellschaftlichen Nutzen gleichzeitig zu

16 | Zum heutigen Stand der Technik spricht man bei elektrischen Fahrzeugen von batterieelektrischen Fahrzeugen (Battery Electric Vehicles – BEV), Brennstoffzellenfahrzeugen (Fuel Cell Electric Vehicles – FCEV), Elektrofahrzeugen mit Reichweitenverlängerung (Range Extended Electric Vehicles – REEV), Plug-in-Hybridfahrzeugen (Plug-in Hybrid Electric Vehicles – PHEV) und Fahrzeugen, die Verzögerungsenergie rekuperieren und zur Unterstützung nutzen (Hybrid Electric Vehicles – HEV).

17 | Vgl. Regett et al. 2019.

18 | Vgl. Regett 2019.

19 | Vgl. Agora Verkehrswende 2019.

20 | Vgl. Hoekstra/Steinbuch.

21 | Vgl. Hill et al. 2020.

22 | Vgl. Transport & Environment 2020.

23 | Vgl. Nationale Plattform Zukunft der Mobilität 2020.

24 | Einschließlich Hybridfahrzeuge und rein batterieelektrischer Fahrzeuge.

25 | Vgl. International Energy Agency 2019a.

26 | Zudem werden auch Brennstoffzellenfahrzeuge Lithium-Ionen-Batterien enthalten, um die Fahrdynamik und lange Lebenszeit der Brennstoffzelle zu gewährleisten.

27 | Siehe Glossar.

28 | Siehe Glossar.

29 | Vgl. International Resource Panel 2019.

30 | Siehe Glossar.

31 | Siehe Glossar.

32 | Siehe Glossar.

33 | Siehe Glossar.

34 | Siehe Glossar.

35 | Siehe Glossar.



optimieren – vorausgesetzt, Datenschutz- und Geheimhaltungsfragen werden im Sinne einer ganzheitlichen Circular Economy gelöst. Erstmals wird durch digitale Technologien eine tatsächliche End-to-end-Transparenz über Wertverluste und -potenziale des neuen Mobilitäts- und Ressourcenparadigmas ermöglicht, das auch die sogenannte ACES (Autonomous, Connected, Electric, Shared)-Mobilität³⁶ umfasst. Nicht zuletzt befähigen digitale Technologien und Daten zunehmend automatisierte zirkuläre Maßnahmen (etwa die Ortung am Lebensende, die (teil-)automatisierte Demontage, die Wiederaufbereitung und das Recycling) und hierdurch kostengünstigere, höherqualitative Produkt- und Material(wieder)nutzung.

Um allerdings ein angemessenes **zirkuläres Ökosystem** für Traktionsbatterien unter Berücksichtigung der Potenziale und Herausforderungen digitaler Technologien und Daten zu schaffen, bedarf es noch gezielter Beiträge aller beteiligten Akteure – in Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft. Denn, wie etwa der Sachverständigenrat für Umweltfragen unterstreicht, ist der Weg von der heute in Deutschland praktizierten „kreislauforientierten Abfallwirtschaft“ hin zu einer tatsächlichen Kreislaufwirtschaft noch weit.³⁷

Zu den offenen Fragen für Traktionsbatterien gehören insbesondere:

1. Lebenszeit von Traktionsbatterien verlängern
 - a. Wie kann die Umsetzung von Design for Circularity³⁸ in Produkt- und Systemgestaltung beschleunigt werden?
 - b. Wie können die Voraussetzungen für ökologisch und ökonomisch sinnvolle sowie technisch machbare Second-Life-Anwendungen systematisch erfüllt und sichergestellt werden?
 - c. Wie können Lebenszyklusdaten der Batteriesysteme unter dem Gesichtspunkt von Datenschutz und Geheimhaltungsmaximen der Industrie zugänglich gemacht werden?
2. Kreisläufe schließen
 - a. Welche innovativen Anreizsysteme können den Rücklauf der Traktionsbatterien in hochwertige Verwertungsstrukturen weiter verbessern?

- b. Wie können die Recyclingquoten³⁹ und Rezyklatreinheiten⁴⁰ maximiert werden?
 - c. Wie kann Circular Economy die Grenzen eines „Nationalstaats“ überwinden?
 - d. Wie können transnationale, sogar globale Wertschöpfungsnetzwerke für die Circular Economy von Traktionsbatterien gestaltet werden?
3. Systemische Produktivität maximieren
 - a. Wie kann das Potenzial von Traktionsbatterien für die Optimierung der Elektrizitätsnetze genutzt werden (Sektorkopplung, Vehicle-to-X (V2X))?
 - b. Welche (aktive oder kontrollierende) Rolle können die Konsumierenden spielen?
 - c. Wie kann der negative Einfluss von geopolitischen Spannungen auf eine nachhaltige Entwicklung reduziert werden?
 - d. Wie interagieren Vehicle-to-X (V2X) und andere Mehrfachnutzungskonzepte wie Car- und Ridesharing⁴¹ – beispielsweise in Bezug auf Batteriealterung, Nutzerkomfort und Standzeiten?

Diese und weitere Fragen zu erörtern und entsprechende Handlungsempfehlungen abzuleiten, war das Ziel der Arbeitsgruppe „Traktionsbatterien“ der Circular Economy Initiative Deutschland (CEID). Zwischen Oktober 2019 und Mai 2020 erarbeitete die Arbeitsgruppe Traktionsbatterien, bestehend aus führenden wirtschaftlichen Akteuren des Batteriewertschöpfungsnetzwerks und aus akademischen Institutionen Deutschlands, Grundlagen für die Umsetzung der Circular Economy für Traktionsbatterien in Deutschland. Dieser Bericht enthält die Ergebnisse der Arbeitsgruppe.

Die Wahl des Themas Traktionsbatterien für die *Circular Economy Initiative Deutschland* war aus mehreren Gründen naheliegend:

- Es besteht die Notwendigkeit eines systemischen, umfassenden Ansatzes, der von der wartungs- und recyclinggerechten Gestaltung der Batterie über die Sicherstellung einer möglichst produktiven und langen Anwendung der Batterie bis hin zu einer effektiven Verwertungs- und Recyclinginfrastruktur den gesamten Lebenszyklus berücksichtigt.

36 | Siehe Glossar.

37 | Vgl. Sachverständigenrat für Umweltfragen 2020.

38 | Siehe Glossar.

39 | Siehe Glossar.

40 | Siehe Glossar.

41 | Siehe Glossar.

- Aufgrund der großen Bedeutung des Automobilssektors für den Standort Deutschland und der zentralen Rolle der Traktionsbatterie in der beginnenden sektoriellen Transformation zur Elektromobilität besitzt das Thema hohe wirtschaftliche Relevanz. Die – im Optimalfall kostengünstigere und zuverlässigere – Bereitstellung von wichtigen Batteriematerialien und -stoffen – von essenziellen Batteriemetallen über Mehrstoff-Funktionsmaterialien bis hin zu komplexen Materialverbänden (siehe Glossar für eine detaillierte Erläuterung) – kann zu einer deutlichen Verbesserung der Versorgungssicherheit für Schlüsselrohstoffe beitragen.
- Gleichzeitig ist die nachhaltige Gestaltung dieses Transformationsprozesses durch die Minimierung des ökologischen Fußabdrucks der Batterie in Herstellung und über den Lebenszyklus hinweg notwendig, um das Dekarbonisierungspotenzial der Elektromobilität angemessen auszuschöpfen. Circular-Economy-Maßnahmen sind hierzu essenziell, steigern sie doch die Ressourcenproduktivität und haben das Potenzial, den Primärrohstoffeinsatz deutlich zu reduzieren.
- Nicht zuletzt kann die Traktionsbatterie ein gutes Referenzbeispiel mit Signalwirkung für andere Branchen darstellen, anhand dessen der Transformationsprozess zu

Vertiefung I: Covid-19 und Circular Economy für Traktionsbatterien

Bis September 2020 forderte die Covid-19-Pandemie bereits über 800.000 Todesfälle weltweit. Die Auswirkungen des Virus waren und sind weiterhin gravierend: Neben gesundheitlichen Aspekten (der Versorgung von Erkrankten, den erforderlichen Maßnahmen bei der Bekämpfung der Ausbreitung des Virus, der Entwicklung von Medizin und Impfstoffen etc.) und Einschränkungen im öffentlichen und gesellschaftlichen Leben führte die Pandemie zur wahrscheinlich größten Rezession des letzten Jahrhunderts. Als Reaktion wurden weltweit, einschließlich Deutschland und der Europäischen Union, Förderpakete für die Wirtschaft in Billionenhöhe angeschoben.⁴²

Wie EU-Kommissar Frans Timmermans betont, muss die Reaktion auf die Covid-19-Krise integraler Teil des European Green Deal sein.⁴³ Entsprechende Investitionsprogramme **sollten auf die Transformation hin zu einer nachhaltigen Wirtschaft ausgerichtet werden** – so zum Beispiel in batterieelektrischen Fahrzeugen (Battery Electric Vehicles, BEV), bei erneuerbaren Energien, einer klimafreundlichen Infrastruktur⁴⁴ – und einer Circular Economy. Denn aufgrund des wesentlichen Beitrags der Ressourcennutzung zum Klimawandel und der Bedrohung der planetaren Grenzen ist die Entkopplung des Wohlstands von der Ressourcennutzung unabdingbar. Die Circular Economy ist hierzu nötig und somit ebenfalls alternativlos.⁴⁵ Jetzt getroffene Entscheidungen werden den Pfad der Treibhausgasemissionen und Ressourcennutzung für das nächste Jahrzehnt stark beeinflussen.

Förderpakete müssen daher kompatibel mit dem ambitionierten Transformationspfad hin zu einer klimafreundlichen Circular Economy gestaltet werden.

Dieser Bericht der Arbeitsgruppe Traktionsbatterien zeigt: **Die Circular Economy ermöglicht gesamtwirtschaftlich und spezifisch für Traktionsbatterien langfristig klare Vorteile** durch die Steigerung der Produktivität, Resilienz, Importunabhängigkeit und Beschäftigungssicherheit. Für Unternehmen ergeben sich grundsätzlich ähnliche Vorteile durch Kostensenkungen, neue Geschäftsmodelle, besseres Supply-Chain-Risk-Management etc. Doch um **diese Potenziale auszuschöpfen, bedarf es noch erheblicher gezielter Interventionen.**

Bei der Betrachtung des hier vorgeschlagenen Zielbilds und Transformationspfads zeigt die Covid-19-Krise zudem: Gravierende Veränderungen in unserer Lebensweise sind möglich und punktuelle ungewöhnlich erscheinende Maßnahmen können angemessen sein. So könnten neue Geschäftsmodelle und Wertschöpfungskettenstrukturen getestet und zur Skalierung gebracht werden, die ansonsten kaum rechtlich möglich, zu riskant (aus Gründen der Wirtschaftlichkeit oder kartellrechtlicher Bedenken) oder unrentabel wären.

Erfahrungen aus der Reaktion auf Covid-19 sollten daher bezüglich ihrer Übertragung auf die Transformation zur Circular Economy bewertet werden.

Die Ergebnisse der Arbeitsgruppe Traktionsbatterien können auch – oder gerade – in Zeiten der Covid-19-Krise dazu dienen, erste Schritte in Richtung des Transformationsprozesses hin zu einer klimafreundlichen, ressourcenentkoppelten Circular Economy für Traktionsbatterien zu ermöglichen.

42 | Vgl. Nienaber/Wacket 2020.

43 | Vgl. Europäisches Parlament 2020.

44 | Vgl. Energy Transitions Commission 2020.

45 | Vgl. International Resource Panel 2020.



einer Circular Economy verdeutlicht werden kann. Wie im nachfolgenden Kapitel ausgeführt, hat die Circular Economy für den Sektor der Elektromobilität höchste Relevanz. Eine Kreislaufführung ist – neben der weiteren Dekarbonisierung des Fahrstroms für den breiten Einsatz von Elektromobilität – fundamental, um die Ökobilanz der Elektromobilität weiter zu verbessern und die Abhängigkeit von wichtigen Primärmaterialien zu reduzieren.

1.1 Fokus Traktionsbatterien und Einbettung in die Circular Economy Initiative Deutschland

Die Ergebnisse der Arbeitsgruppe Traktionsbatterien sind im vorliegenden Bericht wie folgt strukturiert:

1. Zunächst wurde eine gemeinsame Definitionsgrundlage für die zirkuläre Batteriewertschöpfung geschaffen – für das Glossar und die thematischen Vertiefungen wurde auch die Arbeit bestehender Initiativen berücksichtigt und darauf aufgebaut.
2. Aufbauend auf einer Abschätzung von Potenzialen- und Herausforderungen (siehe Kapitel 2) werden ein gemeinsames Zielbild für 2030 beschrieben sowie mögliche Zielkonflikte entlang der Wertschöpfungskette identifiziert (siehe Kapitel 3).
3. Anschließend folgen die Bestimmung und Analyse konkreter Pilotthemen, die einen signifikanten Beitrag zur Erreichung des Zielbilds leisten können (siehe Kapitel 4).
4. Abgerundet wird dieser Ergebnisbericht durch die Formulierung von Handlungsempfehlungen für Politik, Wirtschaft und Wissenschaft (siehe Kapitel 5) und deren Verortung in einer Roadmap für die kommenden Jahre (siehe Kapitel 6).

Die Arbeitsgruppe Traktionsbatterien hat drei aufeinander aufbauende Pilotthemen mit unterschiedlichen Schwerpunkten inhaltlich vertieft und dafür jeweils zentrale Herausforderungen, Lösungsansätze und mögliche Implementierungszeitpläne entwickelt.

Pilotthema 1 „Kenntnis des Batterielebens“ (siehe Pilotsteckbrief I, Anhang I) adressiert die Voraussetzungen für den Aufbau einer gemeinsamen Dateninfrastruktur entlang des gesamten Batterielebenszyklus. Somit soll eine effiziente Erfassung und

Sammlung, Handhabung sowie Aufbereitung⁴⁶ und Verwertung von Batterien in nachgelagerten Recycling- und Wiederverwendungsschritten sichergestellt werden (siehe Kapitel 4.1).

Pilotthema 2 „Modellbasierte Entscheidungsplattform“ (siehe Pilotsteckbrief II, Anhang I) zielt darauf ab, Anforderungen an datengestützte Modellierungen auszuarbeiten, die es ermöglichen, volkswirtschaftliche Zielgrößen zu quantifizieren und betriebliche Entscheidungen zur optimalen Anwendung von Batterien am Ende ihrer Lebenszeit quantitativ zu unterstützen (siehe Kapitel 4.2).

Pilotthema 3 „Demontagenetzwerk für Traktionsbatterien“ (siehe Pilotsteckbrief III, Anhang I) befasst sich schließlich mit Fragen zum Aufbau einer industriellen Infrastruktur, welche die Rückwärtslogistik und Demontage von Altbatterien länderübergreifend ermöglicht (siehe Kapitel 4.3).

Diese Pilotthemen wurden von den Mitgliedern der Arbeitsgruppe als zentrale Herausforderungen – und daher, wenn adressiert, als potenzielle Hebelpunkte – für ein erfolgreiches zirkuläres Management von Traktionsbatterien identifiziert.

Die Ergebnisse der Arbeitsgruppe Traktionsbatterien sind integraler Bestandteil der Arbeit der *Circular Economy Initiative Deutschland* und fließen in den Abschlussbericht und die darin entwickelte Circular-Economy-Roadmap ein.

1.2 Fokus der Arbeitsgruppe

Um das Thema Traktionsbatterien entlang seiner gesamten Wertschöpfungskette betrachten zu können, sind in der Arbeitsgruppe Traktionsbatterien Akteure aus Wirtschaft, Wissenschaft sowie themenspezifischen Plattformen und Netzwerken mit unterschiedlichen Kompetenzen und Expertisen vertreten. Die Arbeitsgruppe vereint unternehmensseitig die spezifischen Sichtweisen mehrerer Fahrzeughersteller, Material- und Komponentenhändler, Recyclingunternehmen und Systemdienstleister. Auf der Forschungsseite ergänzen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler unterschiedlicher Fachrichtungen die Arbeitsgruppe mit ihrer Fachexpertise.

Mit den gemeinsamen Kompetenzen der Teilnehmenden kann der Großteil der Batteriewertschöpfungskette abgebildet werden: von der Veredelung der gewonnenen Rohmaterialien über die Herstellung und Produktion der Aktivmaterialien, Batteriezellen und Systeme und über die Anwendungsphase bis hin zur Sammlung,

46 | Siehe Glossar.

Rückführung und (Wieder-)Verwertung der Batterien (siehe Abbildung 10). Durch die unterschiedlichen Expertisen der Akteure können neue Konstellationen für Kooperationen identifiziert werden und potenzielle, die Circular Economy unterstützende Geschäftsmodelle entwickelt werden.

Nicht betrachtet werden Rohstoffabbau, Entsorgung sowie Deponie von Reststoffen und auch nicht die Einbettung der Traktionsbatterien in Energiesysteme, zum Beispiel via Smart Charging (V1G) und Vehicle-to-Grid (V2G) oder Vehicle-to-X (V2X). Die Teilnehmenden der Arbeitsgruppe befürworten ausdrücklich die Exploration der Potenziale letzterer, denn aufgrund ihrer Potenziale zur Steigerung systemischer Produktivität sind sie als zentrale Elemente einer Circular Economy zu werten.^{47, 48} Die Arbeitsgruppe selbst konzentriert sich aber auf das Produkt Traktionsbatterie und seine Kreislaufführung im engeren Sinne.

Ein besonderer Fokus der Arbeitsgruppe Traktionsbatterien liegt auf digitalen Lösungen und Daten einschließlich deren Verarbeitung zur Verbesserung der Anreize und Informationsverfügbarkeit für die Circular Economy. Grund hierfür ist zum einen der Wert einer verbesserten Informationslage zur Lokalisierung und effizienten Handhabung der Batterien (Transport, Zerlegung, Wiederaufbereitung, Recycling etc.). Zum anderen ermöglichen erst hinreichend verfügbare Informationen und Daten die Erstellung von Nutzungsszenarien und Geschäftsmodellen, um damit theoretisch mögliche Maßnahmen zur Realität werden zu lassen.

Die Ausformulierung solcher Maßnahmen ist daher Inhalt der drei gewählten Pilotprojekte. Eine detailliertere Diskussion über zirkuläre Geschäftsmodelle, Metriken und die Rolle digitaler Technologien für die Circular Economy bietet der Ergebnisbericht

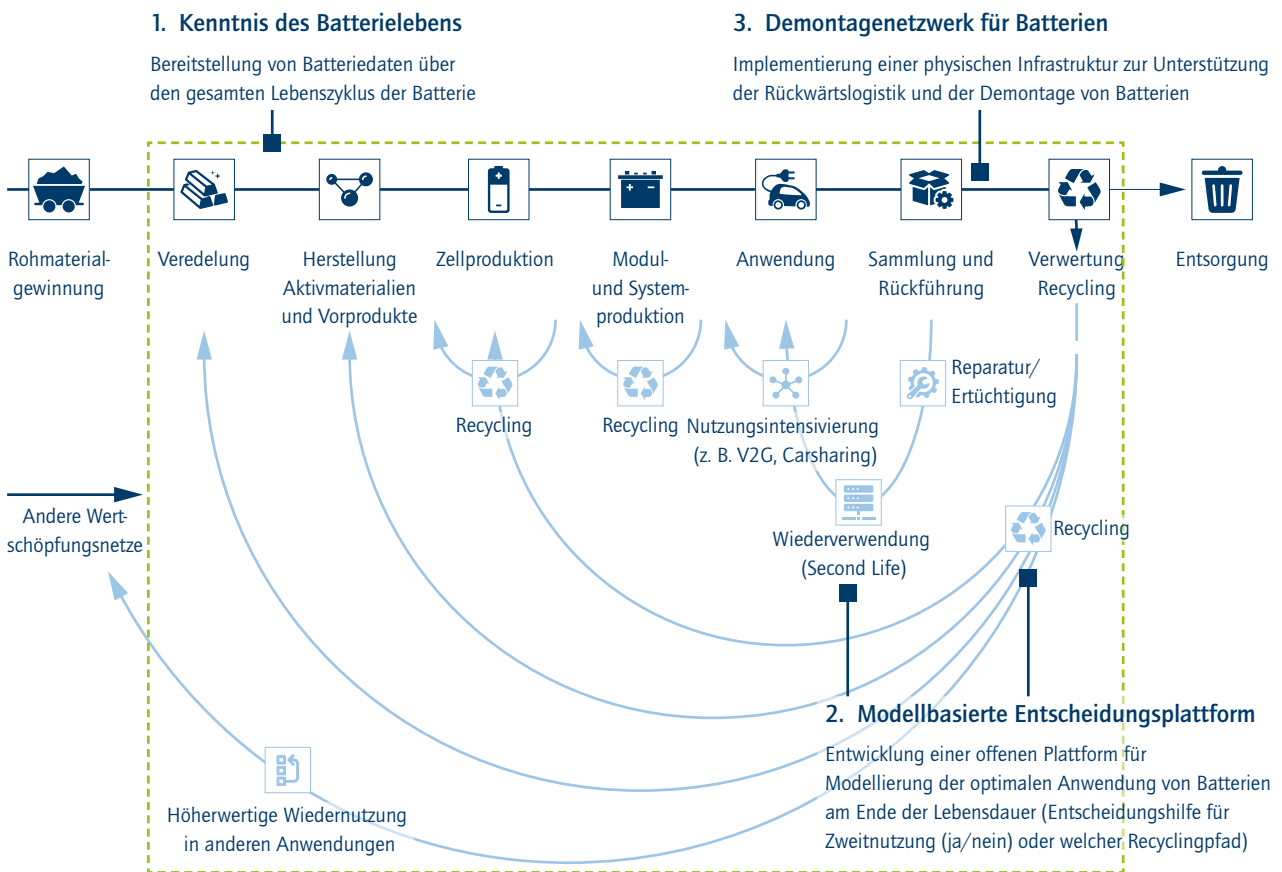


Abbildung 10: Darstellung der Circular Economy für Traktionsbatterien und Fokus der Arbeitsgruppe Traktionsbatterien. Die Ziffern 1. bis 3. verorten die bearbeiteten Pilotthemen entlang der Wertschöpfungskette (Quelle: eigene Darstellung, angelehnt an die Darstellung des World Economic Forum 2019)

47 | Vgl. elementenergy 2019.

48 | Vgl. World Economic Forum 2019.



„Geschäftsmodelle“ einer weiteren Arbeitsgruppe der *Circular Economy Initiative Deutschland AG*.⁴⁹

1.3 Andere Initiativen im Vergleich und Mehrwert der Circular Economy Initiative Deutschland

Andere Initiativen befassen sich ebenfalls mit Circular Economy in Batterien, insbesondere das Dachkonzept „Forschungsfabrik Batterie“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) mit der Querschnittsinitiative Batterie-Lebenszyklus. Diese Initiative wird von den beiden BMBF-Kompetenzclustern „Recycling / Grüne Batterie“ sowie Batterienutzungskonzepte (Fragestellungen zu Alterung, Lebensdauer und Second Life) getragen. Weitere Initiativen sind das BMBF-Kompetenzcluster Batteriezellproduktion (ProZell), die European Technology and Innovation Platform (ETIP) „BatteRies Europe“, die European Battery Alliance (EBA) und nicht zuletzt die Global Battery Alliance (GBA). Auch die ReziProK-Projekte des BMBF sind zu nennen, da sie unter anderem auf das Ziel hinarbeiten, sich im Automobilssektor einer ressourcen-effizienten Kreislaufwirtschaft anzunähern.⁵⁰

Die Arbeit der *Circular Economy Initiative Deutschland* ist mit der Arbeit der genannten Initiativen kompatibel und adressiert verbleibende Lücken. Der Mehrwert der Arbeitsgruppe

Traktionsbatterien innerhalb der *Circular Economy Initiative Deutschland* ergibt sich insbesondere durch

1. das Erzeugen eines offenen Multi-Stakeholder-Diologs zwischen Wirtschaft, Politik, Wissenschaft und Zivilgesellschaft,
2. die gemeinsame Formulierung von Makroperspektiven, einschließlich Perspektiven auf Forschung und Entwicklung, Investitionsbedarfe, Markthochläufe, systemische Informationsbedarfe für Politik und Wirtschaft etc.,
3. die Identifikation von Anreiz-/Nutzen-Kombinationen sowie möglichen Hindernissen und Zielkonflikten zwischen relevanten Akteuren, die Handlungsoptionen erzeugen können und
4. das Aufzeigen systemischer Interaktionen zwischen den identifizierten Pilotthemen und deren Beitrag zur Transformation zu einer ressourcenproduktiven Kreislaufwirtschaft und exportfähigen, zukunftsträchtigen Mobilitätsträgern.

Die Formulierung aufeinander aufbauender Handlungsempfehlungen zur Etablierung und Beschleunigung der Circular Economy für Batterien – in Deutschland und darüber hinaus – runden die Arbeit der Arbeitsgruppe Traktionsbatterien ab. Die Stoßrichtung der Arbeitsgruppe deckt sich zudem mit anderen zur Circular Economy arbeitenden Expertengremien wie beispielsweise dem Sachverständigenrat für Umweltfragen.⁵¹



Abbildung 11: Selektive Darstellung einzelner relevanter Initiativen zur Circular Economy für Traktionsbatterien (Quelle: eigene Darstellung)

49 | Veröffentlichung des Berichts der Arbeitsgruppe Geschäftsmodelle folgt im Herbst 2020.

50 | Vgl. Bundesministerium für Bildung und Forschung 2020.

51 | Vgl. Sachverständigenrat für Umweltfragen 2020.

2 Hintergrund einer Circular Economy für Traktionsbatterien in Deutschland

Der Verkehrssektor trägt heute global circa 24 Prozent aller CO₂-Emissionen bei⁵², in Deutschland 19 Prozent.⁵³ Die Verkehrsemissionen in Deutschland sind im Gegensatz zu den insgesamt rückläufigen Emissionen seit 1990 sogar um ein gutes Drittel angestiegen – und stellen für die Erreichung der Emissionsziele eine wesentliche Herausforderung dar.^{54, 55}

Insbesondere im Individualverkehr stehen Lösungen in Form der batterieelektrischen Mobilität kurz vor dem Durchbruch, wie die rapide ansteigende Marktkapitalisierung batterieelektrischer PKW-Anbieter einerseits und die teils ambitionierten Elektrostrategien etablierter Fahrzeug(teile)hersteller zeigen. Durch die angekündigten Investitionen⁵⁶ der Automobilindustrie und den regulativen Druck in Gestalt etwa der CO₂-Flottenziele der EU-Kommission von 95 Gramm CO₂ pro Kilometer ab 2020 sowie weiterer Senkungen um 15 Prozent bis 2025 und um 37,5 Prozent bis 2030 im Vergleich zu 2021⁵⁷ wird für das kommende Jahrzehnt ein exponentielles Wachstum der Absatzzahlen von Elektrofahrzeugen erwartet. In Deutschland allein werden im Jahr 2030 voraussichtlich circa 7 bis 10 Millionen Elektrofahrzeuge zugelassen sein, davon zwischen 6 und 8 Millionen batteriebetriebene Fahrzeuge (Battery Electric Vehicle, BEV) und zusätzlich 2 bis 4 Millionen Fahrzeuge mit einem Plug-in-Hybrid-Antrieb (Plug-in Hybrid Electric Vehicle, PHEV).^{58, 59, 60} Weltweit könnten dann 30 bis 50 Prozent der jährlich 90 Millionen verkauften PKW elektrifiziert sein.⁶¹

Insbesondere im Schwerlast- und Luftverkehr wird auch der Brennstoffzelle signifikantes Potenzial zugeschrieben.⁶² Jedoch ist ihre Kommerzialisierung noch nicht erreicht. Die Brennstoffzelle wird außerdem für PKW voraussichtlich langfristig nicht mehr als 5 bis 10 Prozent des elektrifizierten Markts ausmachen.^{63, 64} Nicht zuletzt ist die Anwendung von

Brennstoffzellen für PKW aus Klimaperspektive kritisch zu betrachten, da der systemische Wirkungsgrad im Vergleich zu batterieelektrischen Fahrzeugen weniger als halb so hoch liegt.⁶⁵ **Daher liegt der Fokus dieser Arbeitsgruppe auf der Verbesserung der Kreislaufwirtschaft für Traktionsbatterien.** Viele der Ansätze und Handlungsempfehlungen gelten aber grundsätzlich auch für Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV), nicht zuletzt, weil auch diese stets zur Zwischenspeicherung des generierten Stroms eine Lithium-Ionen-Batterie enthalten werden.

2.1 Relevanz des Themas Traktionsbatterien für die Circular Economy

Durch das zu erwartende rapide Wachstum der Marktanteile von batteriebetriebenen und Plug-in-Hybrid-Fahrzeugen wird die Jahresproduktion von Lithium-Ionen-(Traktions-)Batterien (LIB) im kommenden Jahrzehnt voraussichtlich stark ansteigen. Schätzungen der Global Battery Alliance zufolge könnte sich die Nachfrage um den Faktor 14 bis 19 im Vergleich zu 2018 erhöhen.⁶⁶ Damit einhergehend würde sich die jährliche Nachfrage nach zentralen Batteriematerialien vervielfachen – insbesondere für Kobalt (um Faktor 2 bis 3,6),⁶⁷ Lithium (um Faktor 6,4) und Nickel (um Faktor 24 für hochreines „Class 1 Battery Grade“-Material).⁶⁸

Einerseits verspricht diese Marktexpansion weltweit große Potenziale für eine neue wirtschaftliche Wertschöpfung und Wohlstandssteigerung. Dies könnte somit der Erreichung der UN-Nachhaltigkeitsziele zugutekommen, nicht zuletzt in den beteiligten rohstofffördernden und produzierenden Ländern. Andererseits gilt es, die ökosozialen Herausforderungen, die hierdurch entstehen können – Umweltbelastungen, Herausforderungen der Arbeitssicherheit, Menschenrechtsverletzungen –, von Anfang an entlang der Lieferkette vom Abbau der Rohmaterialien bis zum Recycling zu minimieren.⁶⁹

Nicht zuletzt deshalb ist es nötig, die Produktivität der eingesetzten Materialien während der Lebenszeit der Batterien

52 | Vgl. International Energy Agency 2019b.

53 | Vgl. Umweltbundesamt 2020b.

54 | Vgl. Umweltbundesamt 2020a.

55 | Vgl. Agora Verkehrswende 2017.

56 | Vgl. Rauwald 2019.

57 | Vgl. Europäische Union 2019.

58 | Vgl. Boston Consulting Group/Prognos 2019.

59 | Vgl. Agora Verkehrswende 2018.

60 | Vgl. Nationale Plattform Zukunft der Mobilität 2020.

61 | Vgl. Buchert et al. 2019.

62 | Vgl. Hall et al. 2018.

63 | Vgl. Buchert et al. 2019.

64 | Vgl. VDI/VDE 2019.

65 | Vgl. Agora Verkehrswende/Agora Energiewende 2018.

66 | Vgl. World Economic Forum 2019.

67 | Vgl. Buchert et al. 2019.

68 | Vgl. World Economic Forum 2019.

69 | Vgl. World Economic Forum 2020.



zu maximieren und eine sichere Verwertung am Ende der nützlichen Lebenszeit zu garantieren: So könnte eine „Entkopplung“ von Wertschöpfung und Ressourcenaufwand einschließlich assoziierter Umwelteinflüsse erreicht werden, wie vom United Nations International Resource Panel (UN IRP) dargestellt. Da der Ressourcenaufwand 50 Prozent aller CO₂-Emissionen, 90 Prozent des Wasserverbrauchs und der Schäden an der Biodiversität sowie 30 Prozent der mit Luftverschmutzung in Zusammenhang stehenden Gesundheitsprobleme weltweit verursacht, ist diese Entkopplung für die Einhaltung der planetaren Grenzen und somit für die Grundlagen menschlichen Wohlbefindens unabdingbar.⁷⁰

Durch die Elektrifizierung verschiebt sich bei Fahrzeugen der Umweltfußabdruck (Treibhausgase, aber auch andere Aspekte wie Feinstaub, Eutrophierung etc.) von der Nutzungsphase (End-of-Pipe) auf die Herstellung der genutzten Elektrizität und bei Betrieb mit erneuerbaren Energieträgern insbesondere auf deren Herstellung (Cradle-to-Gate). Daher wird das Materialmanagement in der Dekarbonisierung des Verkehrs nunmehr zentral. Entsprechend überprüfen unter anderem die Europäische Union⁷¹ und China⁷², wie eine Life-Cycle-Assessment-Bilanzierung in der Bewertung der Fahrzeugtreibhausgase berücksichtigt werden sollte.

Die Circular Economy hat hierzu große Potenziale beizutragen, indem sie durch die Steigerung der Ressourcenproduktivität, die Minimierung systemischer Verluste und die sichere Wiedernutzung von Materialien am Ende der nützlichen Lebenszeit von Produkten ökosoziale und ökonomische Effekte vereinen soll.

Dabei ist Circular Economy kein Selbstzweck, sondern soll das Erreichen von Verbesserungen anderer Nachhaltigkeitsziele unterstützen. Durch die Integration der Bedürfnisse verschiedener Interessensgruppen und die Wertgenerierung durch Ressourcenschonung kann eine Circular Economy verschiedene Nachhaltigkeitsdimensionen gleichzeitig verbessern.⁷³

Letztlich muss zur Erreichung der oben genannten Ziele Mobilität integrativ neu gedacht und die Rolle verschiedener Verkehrsträger kritisch beurteilt werden. Circular Economy bietet eine Gelegenheit hierzu: etwa durch das Augenmerk auf systemische

Produktivitätsbesserungen, die Beschleunigung von Innovationszyklen durch höhere Produktauslastung und den Ausbau wissens- und arbeitskraftintensiver Arbeitsschritte.

Nicht zuletzt deshalb wurde der enge Schulterschluss mit anderen deutschen Initiativen gesucht, insbesondere der Arbeitsgruppe 4 „Sicherung des Mobilitäts- und Produktionsstandortes, Batteriezellproduktion, Rohstoffe und Recycling, Bildung und Qualifizierung“ der Nationalen Plattform Zukunft der Mobilität (NPM).⁷⁴ Diese bewertet die Wettbewerbslage der deutschen Industrie unter anderem in den Bereichen Produktion von Lithium-Ionen-Batterien für mobile Anwendungen und Batterierecycling und analysiert, welche Wertschöpfungspotenziale, Investitions- und Personalbedarfe neue Mobilitätstechnologien mit sich bringen.

Auch die Rücksprache mit relevanten europäischen und globalen Akteuren – wie der europäischen Kommission, der European Battery Alliance und der Global Battery Alliance – floss in die Analyse ein.

2.2 Potenziale von Circular Economy für Traktionsbatterien

In der Literatur finden sich zahlreiche Verweise auf die Potenziale einer Circular Economy. Sie wurden auch von der europäischen Kommission in der Veröffentlichung des European Green Deal (EGD)⁷⁵ dargestellt: So finden sich Elemente der Circular Economy in mindestens 5 der 10 Säulen des European Green Deal. Circular Economy soll 50 Prozent der CO₂-Einsparungen bis 2050 bewirken.⁷⁶ Die explizite Berücksichtigung von Circular Economy in der Revision der Batterierichtlinie⁷⁷ zeigt die große Bedeutung der Circular-Economy-Perspektive für die europäische Wirtschaft im Allgemeinen und den Automobil- und Batteriesektor im Speziellen. Auch das Erreichen verschiedener Nachhaltigkeitsziele der Vereinten Nationen (Sustainable Development Goals, SDGs) kann durch Circular Economy unterstützt werden.⁷⁸

Spezifisch für Traktionsbatterien umfasst die Circular Economy eine Vielzahl möglicher Maßnahmen über den Lebenszyklus

70 | Vgl. International Resource Panel 2019.

71 | Vgl. Europäische Union 2019.

72 | Vgl. Marklines 2017.

73 | Vgl. Weber/Stuchtey 2019.

74 | Vgl. Nationale Plattform Zukunft der Mobilität 2020.

75 | Vgl. Europäische Kommission 2019b.

76 | Vgl. Simon 2019.

77 | Vgl. Europäische Kommission 2019a.

78 | Vgl. Weber/Stuchtey 2019.

hinweg. Von zentraler Bedeutung sind insbesondere die Lebensverlängerung durch **Reparatur und Instandsetzung beziehungsweise Ertüchtigung**,⁷⁹ die **Weiternutzung**⁸⁰ – gegebenenfalls nach Wiederaufbereitung – in stationären Anwendungen (**Second Life, SL**), und **Recycling**. Auch produktivitätssteigernde Maßnahmen während der Nutzungsphase gehören zur Circular Economy für Batterien, namentlich geteilte beziehungsweise Mehrfachnutzung (**Ride- und Carsharing**) und **smarte Netzintegration (V1G/V2G/V2X)**.⁸¹ Nach Schätzungen des World Economic Forum könnten bei konsequenter Umsetzung dieser Hebel im Jahr 2030 durch Produktivitätsgewinne, Kosteneinsparungen und verbesserte Rückgewinnung wertvoller Materialien in Summe Reduktionspotenziale von etwa 40 Prozent des CO₂-Fußabdrucks und 20 Prozent der Kosten von Traktionsbatterien ermöglicht werden.⁸²

- **Reparatur und Instandsetzung beziehungsweise Ertüchtigung von Batterien** können die Lebenszeit von Batterien verlängern – sowohl im Fall eines Fehlers vor dem Ende der geplanten Lebenszeit (Reparatur) als auch in Form der Ertüchtigung hiernach und der Weiternutzung im selben oder einem anderen Fahrzeug als Gebrauchtbatterie. Beispielsweise kann durch den Austausch einzelner Module oder Steuerungselemente

gegebenenfalls die verbleibende Batterieleistung wieder gesteigert werden. Allerdings ist der systemweite Effekt einer Reparatur voraussichtlich mittelfristig relativ begrenzt, da nur ein kleiner Teil der Batterien ungeplant reparaturbedürftig werden dürfte. Auch der ökonomische Mehrwert für den Austausch einzelner Module oder Zellen im Rahmen einer Instandsetzung könnte aufgrund zunehmend homogener Alterung der Batteriezellen in einem Batteriepack langfristig sinken.⁸³

- **Second Life (SL)**: Die Wiedernutzung von Traktionsbatterien nach Ende ihres ersten nützlichen „Lebens“ in anderen, weniger anspruchsvollen Anwendungen, gegebenenfalls nach ihrer Wiederaufbereitung, könnte unter Umständen signifikante Potenziale aufweisen. So könnten ausgemusterte Fahrzeugbatterien theoretisch künftig große Teile der Nachfrage stationärer Stromspeicher oder Puffer für Netzdienste bereitstellen, wenn Gewährleistungs- und Sicherheitsfragen geklärt werden können. Dazu würden Traktionsbatterien als Ganzes oder in einzelnen Modulen für eine Nutzung im Elektrizitätsnetz umfunktioniert. Auch die Weiternutzung in anderen mobilen Anwendungen, zum Beispiel in Elektrorollern, wird erwogen.

Vertiefung II: Second-Life-Batterien

Der ökologische Mehrwert der Nutzung von Traktionsbatterien in einem Second Life (SL) scheint zumindest in der Theorie klar: Die überwiegende Mehrheit der Studien hierzu kommt zu dem Ergebnis, dass Second Life das Potenzial hat, die Umwelteinflüsse der Batterien signifikant zu reduzieren – die Spanne ist dabei allerdings groß: Je nach Rahmenbedingungen der im Second Life eingesetzten Traktionsbatterien kann die Reduzierung zwischen 15 Prozent⁸⁴ und 70 Prozent liegen.⁸⁵

Für ein Second Life müssten aber einerseits zunächst die sichere Handhabung und Erfassung am Ende des ersten Lebens sowie die Rezertifizierung, Wiederaufbereitung und Inverkehrbringung klar geregelt und sichergestellt werden.

Andererseits bedarf es noch weiterer Forschung und empirischer Erfahrung, um das tatsächliche technische und betriebswirtschaftliche Potenzial und die dafür erforderlichen Voraussetzungen von Second Life verlässlich abschätzen zu können. Denn diese Batterien würden nicht nur nach im Schnitt 8 bis 12 Jahren im Fahrzeug mit neuen Generationen von spezialisierten Batterien für mobile und stationäre Anwendungen konkurrieren, sondern ihre verbleibende Lebenszeit könnte aufgrund der nichtlinearen Alterung unter Umständen nur noch gering sein beziehungsweise die Wahrscheinlichkeit eines plötzlichen/unvorhergesehenen Versagensfalls nähme zu.

Die Meinungen bezüglich der tatsächlich für Second-Life-Anwendungen (wirtschaftlich und technisch) bereitstehenden Altbatterien liegen dementsprechend weit auseinander,

79 | Siehe Glossar.

80 | Siehe Glossar.

81 | Siehe Glossar.

82 | Vgl. World Economic Forum 2019.

83 | Vgl. ebd.

84 | Vgl. Ahmadi et al. 2014.

85 | Vgl. Richa et al. 2017a.

von 3⁸⁶ bis 12⁸⁷ Gigawattstunden pro Jahr in 2030 in der Europäischen Union (siehe Abbildung 12). Gleichzeitig wird in Europa der Bedarf an Batteriespeichern – damit mehr erneuerbare Energien eingespeist werden können – schon ab 2025 auf vier Gigawattstunden pro Jahr geschätzt.⁸⁸ Somit könnte Second Life mittelfristig (vorbehaltlich der oben beschriebenen Bedingungen) möglicherweise einen beträchtlichen Beitrag zur Deckung dieses Bedarfs leisten.⁸⁹ Aufgrund des möglichen signifikanten Kostenvorteils von Second-Life-Batterien im Vergleich zu dediziert für stationäre Anwendungen konzipierte Neubatterien,^{90,91} besteht ein bedeutsames Potenzial von Second-Life-Batterien für den Markt stationärer Batteriespeicher, wenn geeignete regulatorische und marktunterstützende Voraussetzungen geschaffen werden.⁹² Dieses Potenzial kann aber nur in größerem Umfang ausgeschöpft werden, wenn Strukturen aufgebaut werden, mit denen professionell auf Altbatterien nach ihrem ersten

Leben zugegriffen werden kann, und wenn die Batteriedaten, die für eine Transformation der Altbatterien in ein Second Life erforderlich sind, zur Verfügung stehen. Eigentumsverhältnisse an den Batterien und maßgeschneiderte Geschäftsmodelle werden dabei eine Schlüsselrolle spielen. Insgesamt machen die potenziellen Second-Life-Anwendungen aber nur einen kleinen Teil der verfügbaren gealterten Traktionsbatterien aus: Zum Vergleich zur genannten Nachfrage liegt die Produktionskapazität von Lithium-Ionen-Batterien schon im Jahr 2020 bei etwa 500 Gigawattstunden pro Jahr.⁹³ Daher werden vermutlich weniger Alt-Traktionsbatterien zur Nutzung als stationäre Speicher nachgefragt werden als zur Verfügung stehen könnten, was ihr Gesamtpotenzial schmälern würde. Damit in Zukunft mehr Second-Life-Anwendungen möglich sind, sind geeignete Regularien zwingend notwendig,⁹⁴ unter anderem:

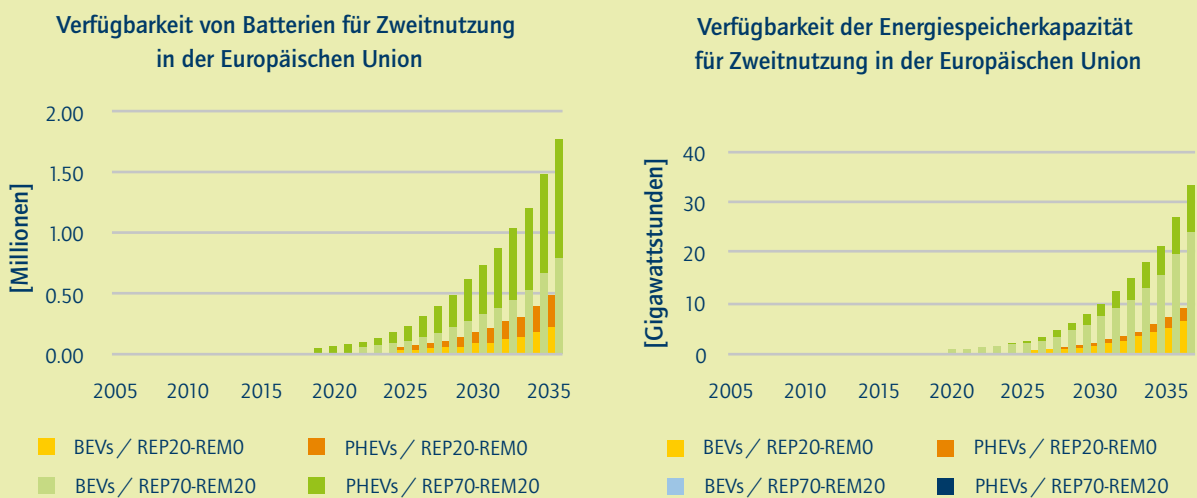


Abbildung 12: Geschätzte Verfügbarkeit von Second-Life-Batterien in stationären Anwendungen in der EU bis 2030, gemäß mehreren Szenarioberechnungen (Quelle: Bobba et al., 2019)

86 | Vgl. Bobba et al. 2019.
 87 | Anmerkung: Schon für die unteren Werte von 3 Gigawattstunden wird in der referenzierten Studie von einer Second-Life-Anwendung von 20 Prozent der Altbatterien ausgegangen – was von Industrieakteuren teils skeptisch betrachtet wird. [Vgl. Bobba et al. 2019].
 88 | Vgl. Büscher et al. 2017.
 89 | Anmerkung: Die hierdurch auftretende Verzögerung der Verfügbarkeit der so genutzten Batterien für Recycling wäre selbst in höheren Szenarien gering. Aufgrund des stetig wachsenden Marktes entgingen dem Recycling dabei lediglich 1,5 Prozent des weltweiten Bedarfes an Kobalt. Langfristig sollten selbstverständlich alle Batterien recycelt werden.
 90 | Vgl. Gsell/Marscheider-Weidemann 2020.
 91 | Anmerkung: Die Kosten für SL-Speicher liegen zurzeit zwischen 50 und 150 Euro pro Kilowattstunde, Preise für neue Speicher im stationären Bereich zwischen 200 und 400 Euro pro Kilowattstunde. Beide Preispunkte entwickeln sich dynamisch. Die Lebenszeit von SL-Speichern kann auf etwa die Hälfte bis zehn Prozent der Lebenszeit stationärer Neubatterien geschätzt werden. Vgl. Gsell/Marscheider-Weidemann 2020.
 92 | Vgl. Gsell/Marscheider-Weidemann 2020.
 93 | Vgl. Thielmann et al. 2018.
 94 | Vgl. Gsell/Marscheider-Weidemann 2020.

- Die möglichst vollständige Erfassung von Altbatterien und die Überführung in für die Nutzung in SL geeignete professionelle Strukturen müssen sichergestellt sein. Prozesse für Rücknahme, Prüfung und Bereitstellung von Second-Life-Anwendungen könnten beispielsweise durch EPR-Systeme verbindlich durchgeführt werden.
- Relevante Informationen für die End-of-Life(EoL)-Bewertung von Traktionsbatterien (State of Health – SoH, sicherheitsrelevante und/oder andere für die Tauglichkeit für Second Life relevante Informationen) müssen zwischen Batterie- beziehungsweise Fahrzeugherstellern und möglichen Second-Life-Anwenderinnen und -Anwendern geteilt werden. Das „Wie“ muss klar geregelt, incentiviert und auch mandatiert werden.
- Die Bestimmung des End-of-Waste-Status von End-of-Life-Batterien, die in ein Second Life überführt werden sollen, ist zu klären. So könnten beispielsweise diese Batterien bei nachweislicher (zertifizierter) Eignung für Second-Life-Anwendungen von abfallrechtlichen Bestimmungen ausgenommen werden.
- Der Haftungsübergang (EPR, Schadens- und Produkthaftung) zwischen Erstproduzenten und Second-Life-Verkäufern ist einheitlich zu klären, um eine angemessene Anreizsetzung sicherzustellen. Insbesondere für Fahrzeughersteller, die die Traktionsbatterien im ersten Leben in Verkehr bringen, müssen Anreize generiert werden, mit möglichen Zweitnutzern wie etwa Netzbetreibern diesbezüglich zu kooperieren.
- Die ökologischen Einsparungen durch eine nachgewiesene Second-Life-Nutzung sollten auf Klimainventare der Automobilhersteller anrechenbar sein, um derartige Anreize zu setzen.

- **Recycling** ist eine der zentralen Maßnahmen der Circular Economy: Letztlich sollten alle Batterien am Ende ihrer Lebenszeit – und selbstverständlich auch Produktionsausschüsse – hochwertig recycelt werden. Bei entsprechender Skalierung und Prozessoptimierung könnte Recycling in 2030 circa zehn Prozent der Nachfrage nach wichtigen Batteriematerialien und -stoffe bereitstellen⁹⁶ (durch Markthochlauf wird ein Vielfaches an Gigawattstunden neuer Batteriezellen produziert als gealterte Batteriezellen dem Recycling zur Verfügung stehen). Bis 2050 könnte dieser Wert auf etwa vierzig Prozent ansteigen, je nach Markthochlauf sowie Entwicklung von Marktanteilen der Elektromobilität und Zellchemien.^{97, 98} Die Nutzung recycelter Materialien kann signifikant zur Reduktion des Umweltfußabdrucks von Batterien im Vergleich zur Nutzung von Primärmaterialien beitragen, je nach betrachtetem Material, Batterietyp und der gewählten Recyclingmethode.⁹⁹

Batterierecycling findet zwar schon länger statt, die Rückführungsquoten sind (mit Ausnahme von Bleiakkumulatoren wie zum Beispiel Starterbatterien) allerdings noch zu niedrig. Zudem werden mit dem

Markthochlauf der Traktionsbatterien signifikant höhere Mengen von Batterien anfallen, die aufgrund ihrer Größe und ihrer enthaltenen Energiemengen eines anderen Managements bedürfen als heute möglich. Auch ist, wie in Vertiefung IV erläutert, ein vollständiges Recycling aller wichtigen Batteriematerialien, wie zum Beispiel Lithium und Grafit, gegenwärtig nicht wirtschaftlich rentabel. Zudem müssen toxische Komponenten im Zuge eines Materialrecyclings neutralisiert und sicher gehandhabt werden. Um eine tatsächliche Kreislaufführung im physischen Sinne zu ermöglichen, sind neben Anstrengungen zur Erreichung hoher Rücklauf beziehungsweise Einsammelquoten und Rückgewinnungsraten¹⁰⁰ insbesondere hohe Materialqualitäten der erzeugten Rezyklate¹⁰¹ von entscheidender Bedeutung. Dementsprechend sind konsistente Definitionen zentraler Begriffe zu bestimmen und Erfolgsquoten für jede wichtige Materialgruppe und unter Berücksichtigung hoher Materialqualität zu verlangen (siehe Kapitel 5.1 Vertiefung Batterierecycling). Letztlich sollte der thermodynamische Energieerhalt (Enthalpie und Entropie (Exergie)) des Gesamtsystems ein zentrales Ziel der Circular Economy sein, weshalb dieser langfristig als die

95 | Siehe Glossar.

96 | Vgl. Buchert et al. 2019.

97 | Vgl. World Economic Forum 2019.

98 | Vgl. Öko-Institut 2017.

99 | Vgl. ebd.

100 | Siehe Glossar.

101 | Siehe Glossar.



Bewertungsgrundlage von Circular-Economy-Maßnahmen anzustreben ist.

Auch wenn die nachfolgenden Circular-Economy-Hebel nicht im operativen Fokus der Arbeitsgruppe Traktionsbatterien stehen, **befürworten die Mitglieder der Arbeitsgruppe diese doch ausdrücklich. Denn sie haben möglicherweise signifikante Potenziale, um eine Circular Economy und damit eine Ressourcenentkopplung zu erreichen:**¹⁰²

- **Ride- und Carsharing** von (Elektro-)Fahrzeugen kann die Produktivität der eingesetzten Traktionsbatterien steigern, indem eine höhere Fahrzeugauslastung erreicht wird (mehr Personenkilometer pro Kilowattstunde Kapazität).^{103, 104} Zudem könnten durch zurückgehendes Verkehrsaufkommen die Luftqualität und das Platzangebot in Städten verbessert werden.¹⁰⁵ Carsharing erhöht zwar nicht per se die Auslastung der eingesetzten Fahrzeuge und Batterien, teilt jedoch andere potenzielle Vorteile von Ridesharing wie höhere Kilometerleistung von Fahrzeugen und verbesserte Anreizsetzung für das Lebenszyklusmanagement (insbesondere begünstigt die Flottennutzung den Zugriff auf Altbatterien am Ende der Erstinutzungsphase). Es besteht das Potenzial, dass professionell in Flotten gemanagte Fahrzeuge stärker nach Gesamtkostenrechnung bewertet werden, was den Markthochlauf von batterieelektrischen Fahrzeugen befördern könnte. Die schnellere Abnutzung einzelner Fahrzeuge könnte die Innovationsgeschwindigkeit begünstigen. Nicht zuletzt könnte dies eine Intensivierung von Design for Circularity inklusive mehr Weiternutzung und Recycling bewirken. Das weltweit geschätzte Potenzial von Ride- und Carsharing divergiert stark zwischen den Märkten und abhängig von Annahmen zur Regulatorik und technischen Entwicklung (insbesondere von autonomem Fahren): So schätzt das World Economic Forum, dass im Jahr 2030 16 Prozent aller Fahrzeuge weltweit in geteilten Mobilitätsdiensten gemanagt sind.¹⁰⁶ Andere erwarten, dass bis dahin in manchen Märkten

95 Prozent aller gefahrenen Kilometer „geteilt“ stattfinden.¹⁰⁷ In jedem Fall ist das Potenzial der höheren Auslastung von PKW für eine bessere Leistung des Verkehrssektors allgemein anerkannt.^{108, 109}

- **Smart Charging, Vehicle-to-Grid und Vehicle-to-X (V1G/V2G/V2X)** sind die potenziell größten Hebel zur Produktivitätssteigerung durch zusätzliche Umsatzgenerierung über verschiedene Netzdienste (zum Beispiel Regelleistung, Frequenzregulierung etc.), höhere Produktauslastung (Mehrfachnutzung) und Kosteneinsparungen im Ausbau der Netzinfrastruktur. Allein durch die Nutzung nur eines kleinen Anteils der sich im Markt befindlichen Batterien von Elektroautos für derartige Anwendungen könnten nach Schätzungen der Global Battery Alliance (GBA) in 2030 bis zu sechzig Prozent der globalen Nachfrage für stationäre Batteriespeicher abgedeckt werden.¹¹⁰ Die International Renewable Energy Agency (IRENA) schätzt mögliche Kosteneinsparungen im Ausbau nötiger Netzinfrastruktur auf bis zu neunzig Prozent.¹¹¹ Zu ihrer flächendeckenden Realisierung werden zum einen sektorübergreifende Maßnahmen von Wirtschaft und Politik zwischen Energie- und Mobilitätssektoren notwendig sein – etwa um Energiemärkte zu harmonisieren und relevante Industriestandards zwischen Automobilherstellern und Energiemarktakteuren zu erzeugen. Zum anderen sollten Nutzerverhalten und -interessen berücksichtigt und adressiert werden, beispielsweise mögliche Komfort- beziehungsweise Flexibilitätseinschränkungen.

Die Effektivität einer Circular Economy kann basierend auf der systemischen Betrachtung der thermodynamischen Effizienz (Enthalpie und Entropie (Exergie)) analysiert und beschrieben werden. Dies kann für technische Produkte wie Traktionsbatterien (siehe Abbildung 13) dargestellt werden.

Weitere systemische Veränderungen könnten künftig die Relevanz von Circular-Economy-Hebeln verändern. Beispielsweise könnte das schnelle (robotisierte) Austauschen von

102 | Es ist anzumerken, dass „Sharingkonzepte“, auch Product-Service-Systems (PSS) genannt, nicht automatisch zu ökologisch optimalen Ergebnissen führen. Vielmehr muss dies als Ziel im Design des Geschäftsmodells von Anfang an mitgedacht werden – siehe beispielsweise Hüer et al. 2018.

103 | Austauschbeziehungen (Trade-offs) zwischen Ride- und Carsharing und Vehicle-to-X (V2X) umfassen gegebenenfalls die häufigere Anwendung von Schnellladern in permanentem Flottenbetrieb (was die Batterielebensdauer verkürzen kann) sowie die geringere Standzeit und dadurch Verfügbarkeit für Netzdienstleistungen.

104 | Vgl. Hüer et al. 2018.

105 | Vgl. Arbib/Seba 2017.

106 | Vgl. World Economic Forum 2019.

107 | Vgl. Arbib/Seba 2017.

108 | Vgl. ebd.

109 | Vgl. International Resource Panel 2020.

110 | Vgl. World Economic Forum 2019.

111 | Vgl. IRENA 2019.

112 | Vgl. Abadías Llamas et al. 2020.

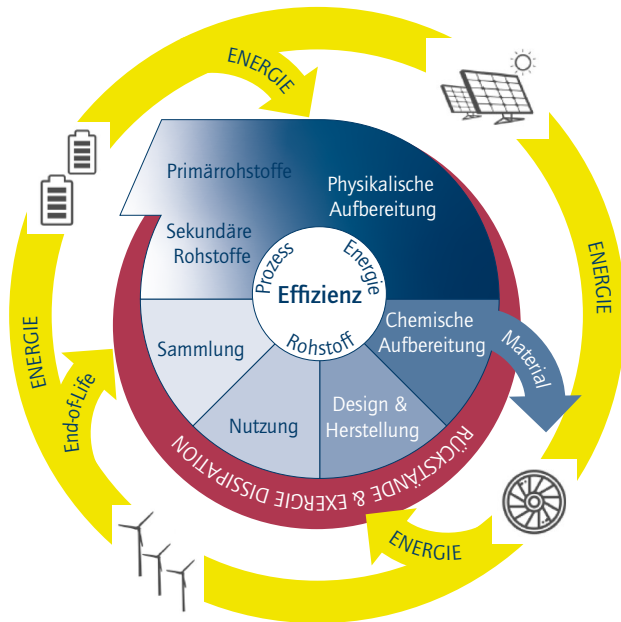


Abbildung 13: Konzeptionelle Darstellung einer Circular Economy für komplexe technische Produkte, basierend auf thermodynamischer Bewertung entlang des Lebenszyklus¹¹² (Quelle: Abadías Llamas et al. 2020)

Traktionsbatterien (Batteriewechselsystem, Battery Swapping), wie von Akteuren wie Betterplace und Tesla bereits getestet¹¹³ und durch chinesische Automobilunternehmen weiterentwickelt¹¹⁴ und zuletzt durch die chinesische Regierung incentiviert,¹¹⁵ die Lebenszeit der Batterien verlängern und ihre Wartung beziehungsweise den Austausch erleichtern. Sollte es verbreitete Anwendung finden, könnten sich dadurch Geschäftsmodelle und Wertschöpfungsketten anders gestalten als derzeit üblich (Batterien getrennt vom Fahrzeug gehandhabt) und die Bedeutung etwa von Wartung und auch bidirektionalem Laden (erleichtert durch das stationäre Management der Batterien in der Austauschstation) erhöhen. Ein wesentlicher Vorteil für die Circular Economy bei einem Batteriewechselsystem ist, dass damit die Batterie im Eigentum des Providers bleibt beziehungsweise bleiben muss (B2B-Umfeld) und jederzeit lokalisiert und integriert gemanagt werden kann. Fragen der Datenverfügbarkeit, der optimalen Wartung, des Zugriffs auf Batterien, um diese für Second-Life-Anwendungen oder hochwertiges

Recycling zu nutzen etc., könnten damit sehr gut adressiert werden. Da solche Systeme allerdings (noch) keine verbreitete Anwendung finden und es nicht Gegenstand der Arbeitsgruppe Traktionsbatterien war, zu beurteilen, inwieweit dieses Konzept technisch ausgereift und umsetzbar ist, wird im Folgenden nicht näher darauf eingegangen.

In Summe würde die konsequente Umsetzung der Circular Economy für Traktionsbatterien eine Vielzahl von Vorteilen mit sich bringen, unter anderem:

- die Reduktion des (Primär-)Ressourcenverbrauchs und der damit einhergehenden negativen Umwelteinflüsse (insbesondere Wasserverbrauch für Lithium, CO₂-Fußabdruck von Aluminium und Ökotoxizität bei Nickel und Kobalt) und Risiken von Menschenrechtsverletzungen (insbesondere bei einigen Formen der Förderung von Kobalt). Wie in Studien vielfach belegt, können diese Vorteile je nach Recyclingprozess signifikant sein.^{116, 117, 118}
- einen Beitrag zur Versorgungssicherheit für die europäische Batterieindustrie – sowohl vor möglicher mittelfristiger Förderknappheiten im Vergleich zum Materialbedarf als auch in Bezug auf geopolitische Dynamiken wie temporäre, politisch mandatierte Ausfuhrbeschränkungen
- eine Reduktion von Batteriekosten über den Lebenszyklus hinweg von bis zu etwa zwanzig Prozent und hierdurch eine Beschleunigung des Markthochlaufs der Elektromobilität und der erneuerbaren Energien (unter anderem aufgrund der Möglichkeit des Ausgleichs von Netzschwankungen durch Smart Charging wie V1G/V2G/V2X).¹¹⁹ Hieraus folgt unter anderem der Bedarf der systemischen Integration von Circular Economy in (inter)nationale Energiemarktpolitik und Dekarbonisierungsstrategien.
- das Potenzial für erhöhte Innovationsgeschwindigkeit, unter anderem durch höhere Nutzungsintensität im Flottenbetrieb von Fahrzeugen und Ridesharing, inhärente Anreize für Design for Circularity sowie die schnellere Erreichung kritischer Mengen für hochwertige Circular-Economy-Geschäftsmodelle. Dies betont die synergistischen Effekte zwischen „neuer Mobilität“ wie Mobility as a Service (MaaS) und dem

113 | Vgl. Lambert 2017.

114 | Vgl. Lambert 2020.

115 | Vgl. Bloomberg 2020.

116 | Vgl. Buchert et al. 2011.

117 | Vgl. Mohr et al. 2020.

118 | Vgl. Ciez/Whitacre 2019.

119 | Vgl. World Economic Forum 2019.



Circular-Economy-Ökosystem und verlangt folgerichtig eine systemische Integration von Circular Economy in (inter-)nationale Mobilitätsstrategien.

- die Bereitstellung zusätzlicher Batteriekapazitäten, auch für stationäre Anwendungen, und hierdurch einerseits eine Expansion des Markthochlaufs und andererseits signifikante Potenziale für die Treibhausgas-Minderung – nicht nur im Mobilitäts-, sondern auch im Energiemarkt (circa zwei Gigatonnen CO₂-Äquivalente pro Jahr weltweit durch einen erhöhten Anteil erneuerbarer Energien im Netz).¹²⁰ Hierdurch unterstützt die Circular Economy eine vollständige Dekarbonisierung der Mobilitäts- und Energiesektoren nicht nur unmittelbar durch die Reduktion des Treibhausgas-Fußabdrucks im Material, sondern auch mittelbar durch systemische Effekte in anderen Sektoren.
- das Potenzial von Circular Economy zur Erzeugung von Arbeitsplätzen beziehungsweise deren Relokalisierung nach Deutschland ist auch nicht zu vernachlässigen, denn viele Tätigkeiten in der Lebenszeitverlängerung, Wiederaufbereitung, Weiternutzung und dem Recycling sind oft lokal gebunden und verhältnismäßig schwer automatisierbar.¹²¹ Der direkte Effekt könnte zwar begrenzt sein – für die Europäische Union schätzt beispielsweise das Centre for European Policy Studies (CEPS) die nötigen Arbeitskräfte für Sammlung, Zerlegung und Recycling auf bis zu circa 3.000 bis 2030 und 15.000 bis 2040¹²² –, doch werden zusätzliche Effekte voraussichtlich weitere Arbeitsplätze schaffen: Beispielsweise wird die Rohstoffverfügbarkeit in Deutschland und dem europäischen

Binnenmarkt auch hierzulande die Produktion von Aktivmaterialien begünstigen, die derzeit vor allem in Asien und den USA verortet ist. Zusätzlich ist die Expansion weiterer Geschäftsfelder, beispielsweise rund um das Testen, das (Re-)Zertifizieren, die Aufbereitung und die Netzintegration sowie systemisch im Bereich der Mobilitäts- und Energiedienste, zu erwarten.

Für den Standort Deutschland bedeutet dies eine Vielzahl an Vorteilen:

- größere Wertschöpfungstiefe entlang der Batteriewertschöpfungskette im Binnenmarkt, gefolgt von höherem Bruttoinlandsprodukt und höherer Resilienz der deutschen Industrie
- verbesserte Menschenrechts- und verbesserte Umweltbilanz von batterieelektrischen Fahrzeugen, gefolgt von verbesserter Markt- und Nutzerakzeptanz (kurzfristig) und höherer Zukunftssicherheit (langfristig)¹²³
- geringere Abhängigkeit von globalen Materialimporten und -preisen gefolgt von wirtschaftlicher Resilienz
- Unterstützung des Strukturwandels in der Automobil- und Zuliefererindustrie durch zukunftsgerichtete Arbeitsplätze und Beschäftigungsmodelle sowie Generierung neuer Marktsegmente und Geschäftskonzepte; vergleiche hierzu auch die Arbeit der NPM, mit der dieser Bericht abgestimmt wurde¹²⁴
- Rückgewinnung einer internationalen Führungsrolle in der (Klima- und Umwelt-)Politik sowie technische Innovationen in zukunftsrelevanten Wirtschaftszweigen.

120 | Vgl. World Economic Forum 2019.

121 | Vgl. acatech 2020.

122 | Vgl. Drabik/Rizos 2018.

123 | Vgl. World Economic Forum 2019.

124 | Vgl. Nationale Plattform Zukunft der Mobilität 2020.

Vertiefung III: Quantifizierte Materialflussanalyse einer Circular Economy für Traktionsbatterien

Der Stiftungsfonds für Umweltökonomie und Nachhaltigkeit beauftragte das Wuppertal Institut¹²⁵ mit einer Materialflussanalyse zur Circular Economy (CE) für Traktionsbatterien. Das Institut quantifiziert darin zusätzlich das CE-Zielbild hinsichtlich möglicher Auswirkungen auf Materialströme, Energieaufwand, CO₂-Effekte sowie wirtschaftliche Parameter in einer ersten Abschätzung.¹²⁶ Die Berechnungen basieren auf Datenbank- und Literaturauswertungen (unter anderem der renommierten Lebenszyklusdatenbank ecoinvent 3.6), die speziell mit Blick auf zukünftige Trends und Technologieentwicklungen immer gewissen Unsicherheiten unterliegen und dabei immer nur den Durchschnitt eines breiten Technologiespektrums darstellen.

1. **Recycling:** Würde es gelingen, die **Rückgewinnungsraten** für die Schlüsselrohstoffe aus Batterien auf 90 Prozent für Nickel und Kobalt und 85 Prozent für Lithium (jeweils in Batteriequalität) zu optimieren und gleichzeitig die Erfassungsquote auf 90 Prozent zu erhöhen,
 - a. könnten unter der Annahme, dass keine Second-Life-Anwendungen möglich werden, bis zum Jahr 2030 8.100 Tonnen Lithium, 27.800 Tonnen Kobalt und 25.700 Tonnen Nickel zurückgewonnen werden, bis zum Jahr 2050 insgesamt 109.000 Tonnen Lithium, 180.000 Tonnen Kobalt und 576.000 Tonnen Nickel.
 - b. könnte durch Recycling¹²⁷ Lithium für 1,3 Millionen (2030) beziehungsweise 17,7 Millionen (2050) zusätzliche Elektrofahrzeuge bereitgestellt werden. Die Menge an Lithium, Kobalt und Nickel entspricht einem wirtschaftlichen Wert von 1,2 Milliarden Euro bis 2030 beziehungsweise 13,8 Milliarden Euro¹²⁸ bis 2050 und würde den Bedarf an Lithium für **batterieelektrische Fahrzeuge** (Battery Electric Vehicles, BEV) bis zum Jahr 2030 zu circa 13 Prozent abdecken, bis zum Jahr 2050 – angesichts der dann erst verstärkt ausfallenden Altfahrzeuge im Vergleich zum Marktwachstum der Neufahrzeuge – zu circa 39 Prozent.
 - c. wären durch **Recycling** bis zum Jahr 2050 (unter Berücksichtigung der notwendigen Energie- und Ressourcenaufwendungen für den Rückgewinnungsprozess) Einsparungen von 329 Petajoule möglich. Unter vereinfachter Annahme der Anwendung des aktuellen Strommixes in Deutschland entspräche dies CO₂-Emissionen von circa 36 Millionen Tonnen¹²⁹, was circa 10 Prozent der bei der Herstellung der recycelten Fahrzeugbatterien entstandenen CO₂-Emissionen entspräche.
2. Instandsetzung: Würde es gelingen, ab 2030 25 Prozent der anfallenden Fahrzeugaltbatterien instand zu setzen und diese in die ursprünglichen Fahrzeuge wiedereinzusetzen, ergäben sich Einsparungen von circa 5,3 Milliarden Euro und 282 Petajoule Energiebedarf (31,4 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente).
3. Die Potenziale von der Anwendung gebrauchter Traktionsbatterien in stationären Anwendungen – **Second Life (SL)** – werden kontrovers debattiert, weshalb verschiedene Sensitivitäten gerechnet wurden (0 Prozent, 20 Prozent und 50 Prozent Second-Life-Quote). Betrachtet man ein Szenario mit einer optimistischen Second-Life-Quote von fünfzig Prozent, könnten sich im Zeitraum 2020 bis 2050 – unter der vereinfachenden Annahme einer vollständigen Substitution von Nickel-Mangan-Kobalt(NMC)-Batterien – Einsparungen des Kumulativen Energieaufwands (KEA) von 655 Petajoule (73 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente) ergeben, was circa 1.300 Milliarden Kilometer Fahrleistung mit einem leichten batterieelektrischen Fahrzeug (Battery Electric Vehicle, BEV) entsprechen würde,¹³⁰ das Doppelte der Fahrleistung aller PKW in Deutschland in 2018.¹³¹ Allerdings muss diese hohe Rate als obere Grenze betrachtet werden, denn wahrscheinlich sind deutlich geringere Mengen. Diese werden stark von dem regulatorischen Marktdesign, den angewandten

125 | Vgl. Wuppertal Institut [im Erscheinen].

126 | Für die Erläuterung der zugrunde liegenden Annahmen und ihrer Grundlagen siehe Anhang H.

127 | Second Life 0 Prozent, Exportquote 0 Prozent; Bedarf für eine Nickel-Mangan-Kobalt(NMC)-111-Batterie.

128 | Gerechnet mit aktuellen Marktwerten (April 2020).

129 | Vgl. Umweltbundesamt 2020a.

130 | Vgl. Fritz et al. 2016.

131 | Vgl. Kraftfahrt-Bundesamt 2019b.



Geschäftsmodellen (insbesondere den Eigentumsverhältnissen und Gewährleistungsverpflichtungen an der Batterie) und der Effizienz des erneuten Inverkehrbringens als stationäre Batterien abhängen (siehe Vertiefung Second-Life-Batterien).

- a. Mit Blick auf den Hochlauf der Elektromobilität in Deutschland kann ab etwa 2030 mit jährlich mehr als einer halben Million End-of-Life (**EoL**)-**Traktionsbatterien** gerechnet werden. Sollten 50 Prozent der Batterien einem **Second Life** zugeführt werden, würden sich dieses Datum und die einhergehenden Potenziale für Materialrückgewinnung sowie die Notwendigkeit von entsprechend erhöhten Recyclingkapazitäten um circa 4 Jahre verschieben. Gleichzeitig würden die in Second Life angewendeten

Batterien während dieser Zeit weiter Mehrwert generieren, beispielsweise im Energiesektor durch Bereitstellung von Netzdiensten.

- b. Sollten 50 Prozent der anfallenden End-of-Life (EoL)-Traktionsbatterien in Second Life Anwendung finden, könnte dies bis 2030 zu rund 58 Gigawattstunden **Kapazität stationärer Stromspeicher** führen. Das entspräche einer Einsparung des Kumulativen Energieaufwands (KEA) für die umgangene Produktion zusätzlicher Batterien von 69,6 Petajoule. Hierdurch könnten 7,8 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente Treibhausgase vermieden werden.

Die umfangreichere Beschreibung der Modellierung wird im Anhang H aufgeführt. Die vollständige Studie befindet sich in Arbeit und wird veröffentlicht.¹³²

Um die beschriebenen Potenziale einer Circular Economy zu realisieren, bedarf es einer umfassenden und konzertierten Aktion einer Vielzahl relevanter Stakeholder. Handelt es sich doch letztlich um die Erschaffung einer neuen und in Teilen radikal anderen

Wirtschaftsweise. Hierzu muss auf ein breit unterstütztes Zielbild hingearbeitet werden, dessen Fortschritt gemessen werden kann. Dies war daher eines der Ziele der Arbeitsgruppe Traktionsbatterien und wird im folgenden Kapitel ausgeführt.

132 | Vgl. Wuppertal Institut [im Erscheinen].

3 Zielbild für eine Circular Economy für Traktionsbatterien

Die Mitglieder der Arbeitsgruppe Traktionsbatterien entwickelten ein gemeinsames Zielbild für Traktionsbatterien für das Jahr 2030. Um dieses Zielbild zu erreichen, wurden die in Kapitel 5 abgeleiteten Handlungsempfehlungen und die in Kapitel 6 beschriebene Roadmap erarbeitet.

Aufbauend auf zentralen, durch die Arbeitsgruppe Traktionsbatterien formulierten Grundannahmen (siehe Kapitel 3.1) und der Beschreibung von Rahmenbedingung für eine langfristig (auf das Jahr 2050 ausgerichtete) treibhausgasneutrale und ressourcenproduktive Wirtschaft (siehe Kapitel 3.2) wird das Zielbild selbst in Kapitel 3.3 beschrieben. Mögliche Austauschbeziehungen (Trade-offs) werden in Abschnitt 3.4 erklärt.

3.1 Grundannahmen dieses Berichts

Folgende Überlegungen liegen diesem Bericht zugrunde:

1. Die Elektrifizierung des Individualverkehrs wird voraussichtlich mit großer Mehrheit durch batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) abgedeckt werden (siehe Kapitel 1, Einleitung). Daher fokussiert sich die Arbeitsgruppe auf dieses Segment der Traktionsbatterien.
2. Gleichzeitig ist der Ausbau von grünem Wasserstoff als Grundbedingung der Dekarbonisierung der (Grundstoff-) Industrie, der Luftfahrt sowie in Teilen des Schwerlast- und Langstreckenverkehrs zu befürworten.
3. Ein rascher Markthochlauf (batterie-)elektrischer Mobilität erfordert die Umsetzung der Circular Economy durch ein robustes Ökosystem. Dieses muss Folgendes bereitstellen: etwa eine ausreichende und kostengünstige Ladeinfrastruktur, eine Ausweitung geteilter Mobilitätsangebote für bessere Nutzung der Lebenszeitkostenvorteile von batterieelektrischen Fahrzeugen, die Ermöglichung der Weiternutzung geeigneter Batterien an ihrem Lebensende sowie ausreichende Kapazitäten für effiziente und hochwertige Stoff- und Materialwiedergewinnung.
4. Die Arbeitsgruppe unterstützt einen ambitionierten Ausbau der erneuerbaren Energien, denn die Dekarbonisierung der zur Produktion, zum Transport und zur Verwertung der Batterien eingesetzten Energie trägt wesentlich zu ihrem CO₂-Fußabdruck bei. Eine Batterieproduktion mit hundert Prozent erneuerbaren Energien ist in vielen Produktionsschritten schon heute möglich und wird ausdrücklich von der Arbeitsgruppe unterstützt.
5. Im Gegensatz zur öffentlichen Wahrnehmung ist der CO₂-Fußabdruck von batterieelektrischen Fahrzeugen schon heute meist besser als der eines äquivalenten Fahrzeugs mit konventionellem Antrieb, wie in Kapitel 1 Einleitung dargelegt. Dieser Vorteil wird sich mit steigendem Anteil erneuerbarer Energien in Produktion und Nutzung der Fahrzeuge, optimierten Fertigungsverfahren und verbesserten Circular-Economy-Maßnahmen noch signifikant verbessern.
6. Die Optimierung ökologischer Parameter muss im Design von Circular-Economy-Maßnahmen a priori bedacht werden, insbesondere solcher, die für die Einhaltung planetarer Grenzen relevant sind. Diese umfassen neben Treibhauseffekten (CO₂e) auch auf Faktoren wie Biodiversität, Frischwasserressourcen, (Human-)Toxizität, Ozonbelastung oder Aerosolbelastung. Denn all diese können durch Ressourcennutzung negativ beeinflusst werden. Selbsterklärend ist, dass die Einhaltung der Arbeitssicherheit und die Wahrung der Menschenrechte entlang der gesamten Lieferkette unter allen Umständen zu gewährleisten ist.¹³³
7. Letztlich sollte der thermodynamische Energieerhalt (Enthalpie und Entropie (Exergie)) des Gesamtsystems das Ziel der Circular Economy sein, weshalb dieser langfristig als die Bewertungsgrundlage der Circular Economy anzustreben ist. Zur genauen Bestimmung dieser Messgrößen ist die Nutzung ingenieurwissenschaftlicher Prozesssimulationen auf Basis empirischer Validierung angeraten.¹³⁴ Basierend auf prozessspezifischen Daten (sicher und über die Wertschöpfungskette hinweg vollständig erhoben und verwahrt, zum Beispiel durch „Materialpässe“^{135, 136}) können Simulationen Prozesse und Umwelteffekte vollständiger Produktionsnetzwerke detailliert digital darstellen und von der Förderung der Rohmaterialien über die Produktion von

133 | Vgl. Cerdas et al. 2018.

134 | Vgl. Reuter et al. 2015.

135 | Siehe Glossar.

136 | Vgl. Europäische Kommission 2020.



Performancematerialien und Produktdesign bis hin zum Recycling und erneuten Inverkehrbringen der Rezyklate gewährleisten.¹³⁷ Dies kann die physikalisch basierte Verknüpfung von Prozessen und Interessengruppen erzeugen und damit ein Schlüsselaspekt bei der Bewertung von Batterie(re)designs und der Kompatibilität mit der flexiblen und verfügbaren Verarbeitungsinfrastruktur einer erfolgreichen Circular Economy sein.^{138, 139}

8. Die Circular Economy für Traktionsbatterien ist inhärent in den internationalen Kontext eingebettet, insbesondere den der Europäischen Union. Die Bedingungen für das Management von Traktionsbatterien sollten für alle auf den deutschen beziehungsweise europäischen Markt gebrachten Produkte gelten. Gleichzeitig werden deutsche Fabrikate insbesondere im europäischen und internationalen Ausland eingesetzt werden. Wo immer das End-of-Life (EoL) stattfindet, müssen die Rückführung in den Kreislauf und am Ende ein hochwertiges Recycling gewährleistet sein. Auch End-of-Life-Batterien oder Fraktionen daraus werden grenzüberschreitend transportiert, um in bestgeeigneten Anlagen verarbeitet zu werden.
9. Internationale Wertstoffmärkte und -flüsse sind heute zum Teil nicht hinreichend transparent und finden nicht immer unter Berücksichtigung von rechtlichen Rahmenbedingungen, Menschenrechten und/oder Umweltauflagen statt. Die Circular Economy für Traktionsbatterien soll daher nicht zuletzt zu einer Verbesserung dieser Aspekte beitragen, zum Beispiel, indem Batterien über ihren gesamten Lebenszyklus hinweg durch professionelle Akteure gemäß Best Practice gemanagt werden.
10. Für die Erreichung einer Circular Economy sind nicht zuletzt eine entsprechende (Aus-) Bildung und kultureller Wandel unabdingbar, um ambitionierte Politiken zu unterstützen und konkrete Umsetzung von Maßnahmen zu ermöglichen.
11. Die Arbeitsgruppe unterstützt die Prinzipien für nachhaltige Batterien der Global Battery Alliance. Diese beinhalten die Circular Economy für Batterien und umfassen dabei die produktive und sichere Nutzung von Batterien

zur Erreichung der Pariser Klimaziele, die Sicherstellung von Transparenz, Energieeffizienz, Sektorkopplung und Nutzung erneuerbarer Energien, den Fokus auf die Erzeugung guter Arbeitsplätze weltweit und die unbedingte Einhaltung der Menschenrechte und Orientierung an den UN-Nachhaltigkeitszielen.¹⁴⁰

3.2 Rahmenbedingung eines treibhausgasneutralen Deutschlands als Teil einer europäischen Circular Economy bis 2050

Die langfristige Vision der Arbeitsgruppe Traktionsbatterien ist eine weitgehend zirkuläre und dadurch ressourcenproduktive, dekarbonisierte Wirtschaft mit minimierten Systemverlusten und maximierter Rohstoffproduktivität, wie etwa im Ressourceneffizienzprogramm des Bundesumweltministeriums (BMU) avisiert (ProgRess III).^{141, 142} Auf diese Weise soll eine weitgehende absolute Entkopplung des Wohlstands von der Ressourcennutzung möglich sein, soll also bei steigendem Wohlstand der Ressourcenbedarf absolut reduziert werden, wie es vom UN International Resource Panel (IRP) gefordert wird.¹⁴³

Dabei stützt sich die Arbeitsgruppe Traktionsbatterien auf Entwicklungspfade, die mit einem Zwei-Grad-Celsius-Klimaszenario kompatibel sind. Dies bedeutet unter anderem, dass im Jahr 2050 ausschließlich elektrifizierte PKW verkauft werden, hiervon etwa zwei Drittel batterieelektrische Fahrzeuge (Battery Electric Vehicle, BEV).¹⁴⁴

Dies bedeutet langfristig einen Batteriesektor, in dem

- hundert Prozent erneuerbare Energie in Produktion, Nutzung und Recycling eingesetzt werden,
- alle Batterien auch nach Zirkularitätsprinzipien gestaltet und ausgelegt werden (Design for Circularity,

137 | Vgl. Bartie et al. 2020.

138 | Vgl. Reuter et al. 2015.

139 | Vgl. Bartie et al. 2020.

140 | Vgl. World Economic Forum 2020.

141 | Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit 2019.

142 | Ziel des deutschen Ressourceneffizienzprogramms (ProGress) ist eine nachhaltigere Entnahme und Nutzung von Ressourcen. Um dies zu erreichen, strebt die Bundesregierung unter anderem die Entkopplung des Wirtschaftswachstums vom Ressourceneinsatz sowie die Senkung der damit verbundenen Umweltbelastungen an. Aktuell liegt das Programm im Entwurf in der dritten Auflage vor (ProgRess III), darin enthaltene Neuerungen beziehen sich unter anderem auf die Betrachtung von „Mobilität“ unter Ressourceneffizienzaspekten und die nachhaltige Nutzung von ausgedienten Traktionsbatterien.

143 | Vgl. Weber/Stuchtey 2019.

144 | Vgl. Buchert et al. 2019.

einschließlich der Erleichterung von Reparatur- und Zerlegbarkeit),

- soweit möglich die Nutzung von Rohstoffen mit hoher Human- und Ökotoxizität und Menschenrechts- und Umweltfußabdrücken reduziert wird,

Um erfolgreich zu sein, erfordert die Circular Economy einen Transformationsprozess der Wirtschaft, sodass Produkte und Ressourcen höchst produktiv eingesetzt werden. Dies würde die Grundlage dafür bilden, dass der Wirtschaftsstandort Deutschland auch 2050 zu einem der kompetitivsten weltweit gehört (siehe Abbildung 14):

	Bereich	von ...	zu ...
	Wettbewerb	Konkurrenz	➔ „Coopetition“: Kollaborative Geschäftsmodelle
	Wertverständnis	Wert definiert durch kurzfristigen monetären Erfolg	➔ langfristiges, gesamtheitliches (ökonomisches, ökologisches, gesellschaftliches) Werteschaffen
	Anreizsetzung	Abfallentsorgung durch Extended Producer Responsibility	➔ Lebenszyklusmanagement durch Producer Ownership
	Informationsfluss	Fragmentierte Rohstoffmärkte und -flüsse	➔ Transparente, ökosoziale Prinzipien berücksichtigende Plattformen
	Ressourcennutzung	Optimierung auf schnellen linearen Produkt- und damit Materialdurchsatz	➔ Gesamtheitliche Wertmaximierung durch Fokus auf Produktivität und Werterhalt
	Basis der Wertschöpfung	Massenproduktion	➔ Smarte Verwertung von Informationen

Abbildung 14: Circular Economy bedeutet einen Transformationsprozess der Wirtschaft in vielen Bereichen (Quelle: eigene Darstellung)

- (systemische) Material- und Energieeffizienz in Fertigung, Nutzung und Verwertung von Traktionsbatterien maximiert werden,
- Batterien in der Nutzungsphase für maximale Produktivität gemanagt werden – unter anderem durch smartes und gegebenenfalls bidirektionales Lademanagement und hohe Anteile an Flottenbetrieb, insbesondere für Ridesharing,
- Traktionsbatterien bis zu ihrer sicheren Weiterverwendung nachverfolgt werden können, sodass eine Einsammelquote von nahezu hundert Prozent erreicht werden kann und dadurch Systemverluste minimiert werden (Minimal Leakage),
- alle eingesammelten Batterien am End-of-Life (EoL) den ökologisch und ökonomisch optimierten Weg über gegebenenfalls (wo sinnvoll) Weiternutzung (Second Life) zum Recycling finden und
- umweltfreundliche, effiziente Recyclingverfahren über den gesamten Recyclingprozess hinweg optimale, hochqualitative Materialrückgewinnung gewährleisten (siehe Vertiefung Batterierecycling).

3.3 Zielbild 2030 einer Circular Economy für Traktionsbatterien

Zur Operationalisierung der Transformation hin zu einer dekarbonisierten, zirkulären Wirtschaft entwickelten die Teilnehmenden der Arbeitsgruppe Traktionsbatterien ein gemeinsames Zielbild entlang der fünf Dimensionen Regulatorik, Stoffströme, technische Entwicklung, Wertschöpfungsnetzwerke und innerbetriebliche Umsetzung. Diese sollen mit den in ProgRess III definierten Ressourcenproduktivitätszielen 2030 harmonisieren.¹⁴⁵ Das Zielbild erhebt dabei keinesfalls den Anspruch der Vollständigkeit. Stattdessen soll es Schlaglichter auf für die Mitglieder wichtige, selektive Aspekte einer Circular Economy werfen, um ein gemeinsames Verständnis einer möglichen und erstrebenswerten Zukunft zu schaffen und eine koordinierte Aktion zu erleichtern.



Regulatorik

- Wissen zum **Verbleib, Zustand und zur Ökoperformance** von Batterien unter Wahrung von Datenschutz und Sicherheit
- **Einheitliche internationale Standards** zur EoL-Behandlung und -Logistik
- EU-weit harmonisierte Regulatorik inklusive **Anreizen**, unter anderem zum Responsible Sourcing, zur hochwertigen Weiterverwendung und zum Responsible Recycling
- **Level Playing Field** für beteiligte Akteure durch Neuauflage der EU-Batteries Directive
- **Standardisiertes Verfahren** zur Ermittlung und Anrechnung von Rezyklatanteilen



Stoffströme

- Entwicklung von **Tools** für Tracking sowie ökosoziale Entscheidungsfindung (zum Beispiel **Battery Passports**, Data Spaces, LCA-Simulationen)
- **Sichere Datenbanken** mit standardisierten Schnittstellen und transparenten Protokollen
- Klarheit, inwieweit **V2X und Second-Life-Anwendungen** von Traktionsbatterien ökonomisch und ökologisch sinnvoll sind
- **Einsammlung und hochwertiges Recycling (ggf. nach Second Life) aller Traktionsbatterien** am Ende ihres Lebens
- **Post-Consumer-Rezyklate** stellen einen kleinen (~10 %), aber steigenden Teil des Bedarfs wichtiger Batteriematerialien dar



Technische Entwicklung

- **Design for Circularity/Design for Recycling** und Modularität sind Industriestandard
- **Digitale Industriestandardisierung** und smarte Fertigung (Industrie 4.0, KI, IoT, Blockchain) unterstützen Fertigung und EoL-Management flexibel
- **Verlässliche Informationsbereitstellung durch digitale Technologien**, zum Beispiel Battery Passports, Digitale Zwillinge
- **Zunehmende Automatisierung von Wartung und Demontage**, hierdurch Kosteneinsparung und Sicherheit
- **Weiterentwickelte Recyclingtechnologien** mit hoher Performance



Wertschöpfungsnetzwerke

- **Dekarbonisierung von genutzten Materialien** ist **strategischer Bestandteil** des Geschäfts von Produktherstellern
- **Wertschöpfung vermehrt kollaborativ** und über (mehrere) Lebenszyklen der Batterie hinweg
- **Management der Batterien** über Akteure und den gesamten Lebenszyklus (Cradle-to-Cradle) hinweg
- **Neue Rollen** existierender Akteure und neue Marktteilnehmer
- Proliferation von **digitalen Plattformen**
- **Strategische und operative Integration** von Energie- und Transportsektor im Sinne der **Sektorkopplung**



Innerbetriebliche Umsetzung

- **Effiziente, sichere Handhabung** der rasch ansteigenden Mengen EoL-Batterien durch effektive Demontagenetzwerke (Demontage, Bewertung, Transport)
- **Anwendung neuer B2B/B2C-Geschäftsmodelle** für zirkuläres Produktmanagement
- Verbreitete Anwendung **neuer betriebswirtschaftlicher Kennzahlensysteme** (insbesondere Bilanzierung)
- **Ressourcenproduktivität** der noch immer teuren Traktionsbatterien wird von vielen Akteuren **optimiert** (Ridesharing und Pooling, V2X)

Abbildung 15: Zielbild der Arbeitsgruppe für eine Circular Economy für Traktionsbatterien (Quelle: eigene Darstellung)

Ziele für die Regulatorik

- Maßnahmen zur Erreichung einer hohen **Transparenz über Verbleib, Zustand und Öko-performance von Batterien**

sind implementiert, zum Beispiel Batterielabel, Treibhausgasfußabdruck, Batterieproduktion, Cradle-to-Gate und/oder verpflichtende digitale Bereitstellung relevanter Informationen zur Batterie über den Lebenszyklus hinweg

(von der Produktion bis zum End-of-Life-Management und zur Wiedernutzung der Rohstoffe und Materialien).

- **Datenschutz und -sicherheit** sind dabei gewährleistet. Daten werden nur erhoben, wo sie sinnvoll sind (zum Beispiel kein Live Tracking, sondern lediglich beim Übergang des Besitzverhältnisses).
- **Einheitliche internationale Standards hinsichtlich der End-of-Life-Behandlung und -logistik** von Traktionsbatterien – einschließlich der klaren Formulierung von zentralen Definitionen (Recycling, Refurbishment, Second Life, End-of-Waste etc.) – haben dazu beigetragen, unlauteren Wettbewerb weitestgehend zu unterbinden. Hierdurch haben sich gesetzeskonforme und wirtschaftliche Geschäftsmodelle am Markt durchgesetzt.
- **Responsible Sourcing**,¹⁴⁶ **hochwertige Weiterverwendung und Responsible Recycling**¹⁴⁷ werden über den EU-Binnenmarkt harmonisiert und **regulatorisch incentiviert**, was dem rapide wachsenden Markt für Traktionsbatterien entsprechend zu einem raschen Anstieg des Markts für Rezyklate und möglicherweise auch für wiederverwendete Second-Life-Batterien geführt hat.
- Die Neuauflage der **europäischen Batteries Directive hat ein Level Playing Field** und Anreize für ein umweltfreundliches Design (einschließlich Berücksichtigung von Ökotoxizität der verwendeten Stoffe und deren sicheren Handhabung über den Lebenszyklus hinweg) für beteiligte Akteure geschaffen. Dies geschieht unter anderem durch klare Definitionen von zentralen Termini, dem Setzen von sinnvollen Recyclingzielen und der Benennung von Produktinformationen, die für die Rückgewinnung der wichtigsten Funktionsmaterialien und -metalle und für eine transnational standardisierte Abfrage relevant sind (Beispiele relevanter Produktinformationen sind Batterietyp, Umwelt- beziehungsweise Treibhausgasfußabdruck, State-of-Health etc.).
- Ein standardisiertes Verfahren, um Rezyklatanteile in den am Markt verfügbaren Rohmaterialien zu ermitteln und anzurechnen, ermöglicht exakte, realitätsgetreue und für Konsumierende transparente **Umweltbewertungen** von Batterien. Diese Bewertungen werden immer mehr basierend auf der Simulation von Exergie/Entropie des Gesamtsystems der Traktionsbatterie vorgenommen¹⁴⁸

(siehe Vertiefung Batterierecycling), dadurch können auch Effekte von Maßnahmen auf Energie- und Stoffströme gleichermaßen integriert werden.

Ziele für Stoffströme

- Der Verbleib von Batterien, ihrer Komponenten und Materialien zum Ende ihres Lebens ist durch **Tracking- und Tracing-Tools wie Produkt- beziehungsweise Batteriepässe** nachvollziehbar, entlang des gesamten Lebenszyklus und über Ländergrenzen hinweg. Hierdurch werden die Fahrzeuge zu wertvollen „virtuellen Minen“ und Materialverluste – insbesondere von zentralen Batteriemetallen und -stoffen – aus dem System werden größtenteils vermieden.
- **Sichere Datenbanken mit standardisierten Schnittstellen und transparenten Protokollen** stellen Akteuren entlang der Wertschöpfungskette maßgeschneiderte Informationen zur Verfügung und gewährleisten gleichzeitig den Schutz intellektuellen Eigentums und Wettbewerbsvorteile (vergleiche International Data Spaces). Hierbei ergänzen sich privatwirtschaftliche Lösungen mit solchen der öffentlichen Hand.
- Relevante **Forschung und Entwicklung** bezüglich Batteriealterung, Testing und sicherer Handhabung hat zu Klarheit geführt, **inwieweit Vehicle-to-X(V2X)- und Second-Life-Anwendungen von Traktionsbatterien ökonomisch und ökologisch sinnvoll sind**. Entsprechend verbessern diese Anwendungen die Wirtschaftlichkeit von Batteriespeichern und nehmen einen Anteil des Markts ansonsten neuer Batteriekapazitäten ein.
- **Alle Traktionsbatterien werden am Ende ihres ersten Lebens eingesammelt** und nach eventueller Ertüchtigung oder, sofern sinnvoll, einer Second-Life-Anwendung, letztlich effizientem und hochwertigem Recycling zugeführt. Dadurch stellen **Post-Consumer-Rezyklate** im Jahr 2030 einen kleinen (etwa zehn Prozent),^{149, 150} aber steigenden Anteil des Bedarfs wichtiger Materialien für Lithium-Ionen-Batterien dar (signifikant höhere Werte werden erst nach Abflachen des Markthochlaufs für Elektrofahrzeuge erreichbar sein). Der CO₂- und Umweltfußabdruck der Batterien wird dadurch signifikant verbessert.

146 | Siehe Glossar.

147 | Siehe Glossar.

148 | Vgl. Kapitel 3.1 Grundannahmen Punkt 7.

149 | Vgl. Buchert et al. 2019.

150 | Vgl. Agora Verkehrswende 2017.



Ziele für die technische Entwicklung

- **Design for Circularity** ist vielfach zum Industriestandard geworden und ermöglicht über den Lebenszyklus der Batterie hinweg eine sichere und effiziente Handhabung von Batterien für zirkuläre Geschäftsmodelle. Dabei sind größere Modularität und sowohl konstruktive (Design for Repair) als auch destruktive (Design for Recycling) Designprinzipien berücksichtigt und unterstützen stärker automatisierte Maßnahmen.
- **Digitale Industriestandardisierung und smarte Fertigung** (Industrie 4.0, Künstliche Intelligenz, Internet of Things, Blockchain) helfen, die Reparatur, Weiterverwendung und das Recycling von Batterie(-komponenten) effizient zu gestalten. Hierbei wird die Innovations- und Differenzierungsfähigkeit der Hersteller durch gewährte Flexibilität im Fertigungsprozess und Produktgestaltung gewährleistet.
- Die weite Verbreitung von fortgeschrittenen digitalen Technologien wie etwa Tracking- und Tracingtechnologien (**Material- und Produktpässe und Circular-Economy-Data-Spaces**) und Simulationen (digitale Zwillinge, Systemsimulationen inklusive Exergie/Entropie des Gesamtsystems der Traktionsbatterien) und deren vielseitige Integration in Geschäfts(IT-)systeme ermöglichen eine verlässliche Informationsbereitstellung über den Verbleib der Batterien und ökologisch und ökonomisch optimierte Entscheidungen unter Gewährleistung von Datenschutz und -sicherheit.
- Dies ermöglicht auch die **zunehmende Automatisierung von Wartung und Demontage**, was die Skalierung und Kostensenkung von Wiederverwendungs- und End-of-Life-Maßnahmen zur Folge hat. Dennoch bleibt die Circular Economy für Traktionsbatterien ein Jobmotor, da auch in nahezu vollautomatischen Prozessen viel Fachwissen und menschliche Intervention notwendig bleiben. Die Automatisierung gefährlicher Prozesse erhöht zudem die Sicherheit für das Personal und senkt gleichzeitig Kosten.
- Recyclingtechnologien sind im Vergleich zu 2020 durch technische Weiterentwicklung deutlich (energie) effizienter, ökonomischer, sicherer und effektiver (insbesondere bezüglich Ausbeute und Reinheit) bei der Erzeugung **hochwertiger Rezyklate**. Somit kann der

Großteil der wichtigen Materialien hochwertig und rentabel wiedergewonnen werden.

Ziele für Wertschöpfungsnetzwerke

- Durch den **hohen und weiter steigenden Anteil erneuerbarer Energien** hat sich der Fokus zunehmend auf die **Dekarbonisierung der Batteriematerialien** verschoben – Circular Economy liefert hierfür Antworten. Während die Dekarbonisierung des Materials zuvor Up- oder Downstream-Marktteilnehmern oblag, zählt sie nun zu dem Geschäft der Produkthersteller wie Fahrzeug(teile) hersteller. Dieser Aufgabenbereich wird teils durch Akquisitionen, teils durch die Erweiterung existierender Geschäftsmodelle, teils durch Kooperation abgedeckt. Auf diese Weise wird die im Rahmen der Circular Economy oft beschworene „Kooperation“ mit Leben gefüllt – Round Stream¹⁵¹ beginnt zu existieren.
- **Wertschöpfung geschieht vermehrt kollaborativ** und über (mehrere) Lebenszyklen der Batterien hinweg. Es kommt zu einer horizontalen Vernetzung der Wertschöpfungskette. Durch die zunehmende Integration erhöht sich der Wert offener Kooperation und des Teilens von Daten zur gegenseitigen Ermöglichung von Umsatz und Wertgenerierung. Ein neues Konzept von „Wert“ beginnt sich zu etablieren.
- Batterien werden über Akteure hinweg **während des gesamten Lebenszyklus (Cradle-to-Cradle) gemanagt** und führen dadurch zu völlig neuen Geschäftsmodellen und Konstellationen von Akteuren.
- Es entwickeln sich **neue Rollen** für existierende Akteure (kein klassisches Denken in Upstream/Downstream) und völlig neue Betätigungsfelder mit neuen Marktspielern.
- Die **Proliferation von digitalen Plattformen** für Batterien und ihre Materialien hat zu einer hohen Transparenz und Markteffizienz geführt, die eine Vielzahl neuer Geschäftsmodelle für neue und alte Marktteilnehmer ermöglicht.
- Damit einher geht eine **strategische und operative Integration des Energie- und Transportsektors** im Sinne der Sektorkopplung, wodurch nachhaltige technologisch-gesellschaftliche Trends unterstützt werden (insbesondere Elektromobilität, Energiewende und Industrie 4.0).

Ziele für die innerbetriebliche Umsetzung

- **Neue Akteure** entstehen, die den Massenmarkt von End-of-Life-Batterien bedienen, zum Beispiel Spezialisten für Logistik, Reuse, Recycling etc.
 - Der Aufbau effektiver **Demontagenetzwerke** (Demontage, Bewertung, Transport) hat zu einer effizienten, sicheren Handhabung der rasch ansteigenden Mengen von End-of-Life-Batterien geführt. Dabei hat die **frühzeitige Steuerung des Markthochlaufs** der Demontageanlagen eine effiziente Kombination aus dezentralen und zentralen Standorten und Systemen nach sich gezogen.
 - **Neue B2B/B2C-Geschäftsmodelle für zirkuläres End-of-Life-Management** finden zunehmend Anwendung und verbessern die Rückführung, Weiternutzung und Verwertung von Batterien, zum Beispiel mit Pfandmodellen (B2C) (siehe Vertiefung Pfandsysteme), Leasingmodellen (B2B) etc.
- Neue **betriebswirtschaftliche Kennzahlssysteme (insbesondere Bilanzierung)**, die neue zirkuläre Geschäftsmodelle und deren Wertströme auf Organisations- und Produktebene ökosozial und wirtschaftlich gesamtheitlich abbilden, haben weite Anwendung gefunden und werden gemäß ihrem Beitrag, (inter-)nationale Ziele für Ressourcenproduktivität und -effizienz zu erreichen, veröffentlicht und nachverfolgt.
 - Eine Vielzahl von Akteuren optimiert die Ressourcenproduktivität der noch immer teuren Traktionsbatterien, zum Beispiel durch **Ridesharing und -pooling** und die damit einhergehende hohe Passagier-Kilometer-Zahl pro Fahrzeug (Fahrzeuge bleiben in Unternehmenshand), während Product-as-Service-Geschäftsmodelle die Materialeffizienz entlang des gesamten Produktionszyklus (B2B) steigern.

3.4 Ökologische, soziale und wirtschaftliche Austauschbeziehungen (Trade-offs)

Die Transformation hin zur Circular Economy zielt darauf ab, konkurrierende und teils im Widerspruch zueinanderstehende Interessen und Kriterien zu harmonisieren. Dies gilt vor allem:

- für die Transformation von einer linearen hin zu einer zirkulären Wertschöpfung,
- zwischen verschiedenen möglichen zirkulären Ansätzen
- und innerhalb einzelner Ansätze, bei denen konkurrierende Kriterien zu optimieren sind, beispielsweise Materialausbeute und Energieaufwand.

Herausforderungen bestehen insbesondere während des Markthochlaufs bis 2030, da hohen Investitionsbedarfen unstenen und subkritischen Rückläufen von Fahrzeugbatterien gegenüberstehen

werden. Gleichzeitig sind staatliche Interventionen (regulatorisch und/oder finanziell) noch nicht auf die neuen Wertschöpfungsketten beziehungsweise -netzwerke optimiert und Industriestandards fehlen. Auch die faire Verteilung von Effizienzgewinnen durch eine systemische Circular-Economy-Optimierung zwischen den Akteuren ist noch zu gestalten – ein Henne-Ei-Problem.

Eine der Aufgaben der Arbeitsgruppe Traktionsbatterien lautete daher, Zielkonflikte sichtbar zu machen, diese zu diskutieren und auf ihre Auflösung oder Beilegung hinzuarbeiten (siehe Abbildung 16).

Im Rahmen von Unterarbeitsgruppen wurden zahlreiche Punkte detaillierter adressiert und sowohl innerhalb der entwickelten Pilotsteckbriefe als auch zwischen den Unterarbeitsgruppen Vorschläge zu deren Auflösung unterbreitet (siehe Kapitel 4, Pilotthemen und Anhang I, Pilotsteckbriefe I, II, II). Ohne Anspruch auf Vollständigkeit stellt die folgende Liste eine Sammlung wesentlicher Zielkonflikte und deren Bearbeitung durch die Arbeitsgruppe Traktionsbatterien dar:

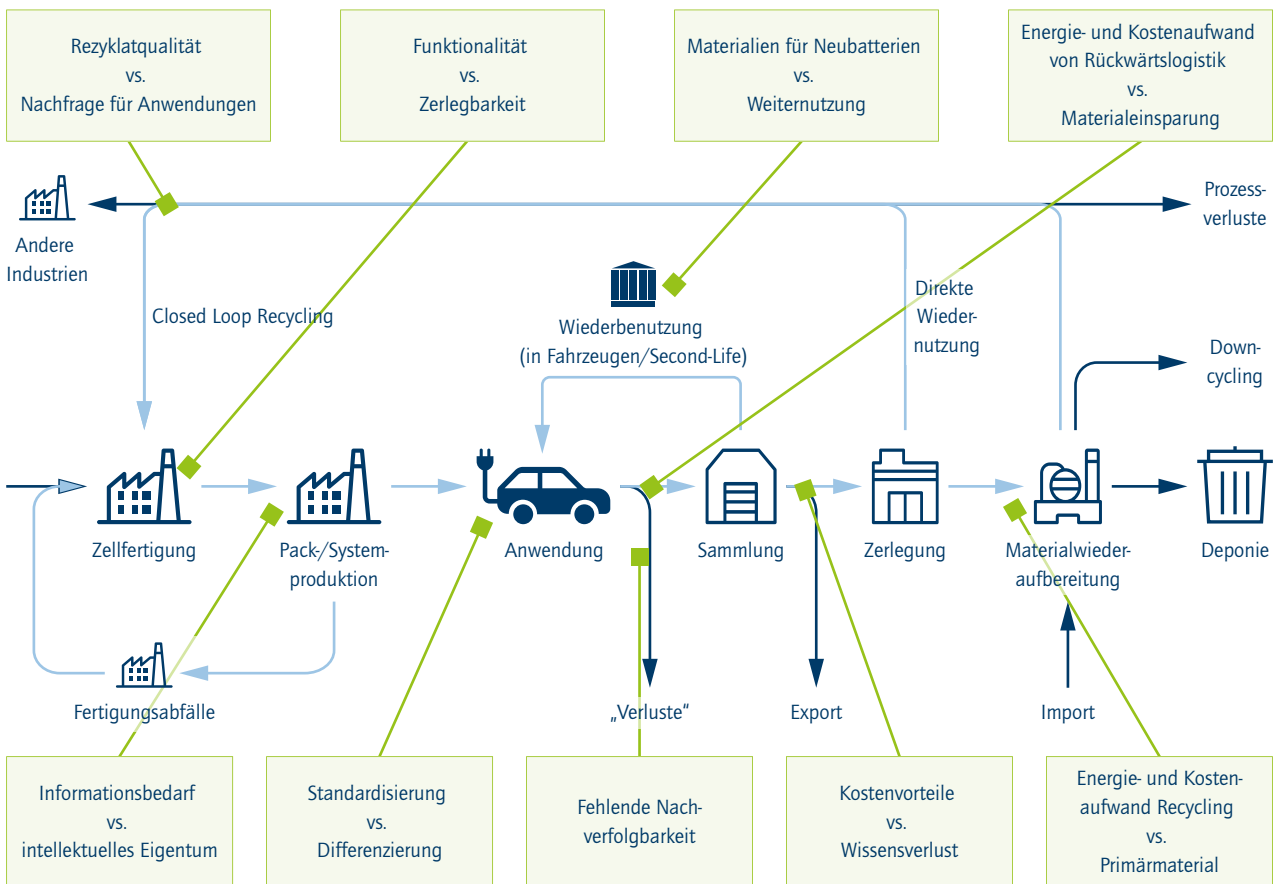


Abbildung 16: Zielkonflikte in der Wertschöpfungskette von Batterien machen einen systemischen Ansatz unabdingbar (Quelle: eigene Darstellung).

Zielkonflikt	Insbesondere adressiert durch die Arbeit von
Informationsbedarf einzelner Akteure bei Wertschöpfungskette versus Fragestellungen zum intellektuellen Eigentum und zur Datensicherheit (zum Beispiel Bedarf an dynamischen Daten über die Leistung der End-of-Life-Batterien für Second-Life-Anwendungen)	Unterarbeitsgruppe 1 „Kenntnis des Batterielebens“
Konflikt zwischen betriebswirtschaftlicher beziehungsweise technischer Optimierung der Leistungsfähigkeit der Batterie, Modularisierung sowie Zerlegbarkeit für Refurbishment und Recycling (Design for Circularity), einschließlich geteilter Anreize zwischen Fahrzeugherstellern und End-of-Life-Managern (Demontagebetrieb, Recycler)	Unterarbeitsgruppe 1 „Kenntnis des Batterielebens“, Unterarbeitsgruppe 2 „Modellbasierte Entscheidungsplattform“
Materialeinsparung, Versorgungssicherheit und ökologische Vorteile durch Kreislaufführung versus Energie und Kostenaufwand für Rückwärtslogistik, Recycling etc.	Unterarbeitsgruppe 1 „Kenntnis des Batterielebens“, Unterarbeitsgruppe 2 „Modellbasierte Entscheidungsplattform“, Unterarbeitsgruppe 3 „Demontagenetzwerk für Traktionsbatterien“
Ökologisch und ökonomisch optimale Handhabung insbesondere zwischen Second Life und Recycling meist fallspezifisch und grundsätzlich unklar (zum Beispiel kritische Metalle in Zweitanwendungen über längere Zeit noch nutzen oder zur Produktion neuer, deutlich leistungsfähigerer Batterien verwenden)	Unterarbeitsgruppe 2 „Modellbasierte Entscheidungsplattform“, Unterarbeitsgruppe 3 „Demontagenetzwerk für Traktionsbatterien“
Optimierungsbedarf zwischen Energieaufwand und Rückgewinnung sowie zwischen optimaler Rückgewinnung von Masse und Qualität verschiedener Zielmaterialien/-stoffe	Unterarbeitsgruppe 2 „Modellbasierte Entscheidungsplattform“
Lange Lebenszeiten der Batterien bedeuten Herausforderungen für die Profitabilität nötiger Investitionen (durch Diskontierung, Marktdynamiken, Innovationen). Recycling und direkter Nutzen von wertvollen Rohstoffen in neuen Batterien versus technisch nicht anspruchsvolles Second Life	Unterarbeitsgruppe 2 „Modellbasierte Entscheidungsplattform“, Unterarbeitsgruppe 3 „Demontagenetzwerk für Traktionsbatterien“
Weitere Zielkonflikte, zum Beispiel bezüglich bestmöglicher Gestaltung der Prozesskette einschließlich Handhabung bezogen auf Energiebedarf; interdisziplinäre Forschung und Entwicklung zu ökologisch und ökonomisch optimaler Handhabung insbesondere zwischen Second Life und Recycling etc.	Nicht oder nur indirekt adressiert

Auch die Handlungsempfehlungen reflektieren viele der Erkenntnisse, welche Anpassungen für die Schaffung eines ressourcenproduktiven und klimafreundlichen Sektors für Traktionsbatterien notwendig sind. Viele Zielkonflikte werden jedoch

nur im spezifischen Fall und unter derzeit noch unbekanntem Bedingungen adressiert werden können. Die Arbeitsgruppe Traktionsbatterien schafft einige Grundlagen, um die notwendigen Entwicklungen zu unterstützen.



4 Pilotthemen der Arbeitsgruppe

Wie in den vorangegangenen Kapiteln deutlich wurde, sind (Anreize zur) Informationsbereitstellung und diesbezügliche Kooperationen kritisch, um je Wertschöpfungs- beziehungsweise Lebenszyklusschritt den maximalen Wert aus Traktionsbatterien zu generieren. Traktionsbatterien sind im Kern sowohl physische als auch digitale Produkte – sie bedürfen fortgeschrittener Fertigungstechnik, enthalten vom Tag ihrer Produktion bis zu ihrem Lebensende elektrische Ladung und sind vollständig digital gesteuert. Ihr Zustand und damit (Rest-)Wert über den reinen Materialwert hinaus lässt sich nur digital erfassen, was – beispielsweise für Gebrauchtmärkte – entsprechende (digitale, elektrotechnische und elektrochemische) Kenntnisse, Werkzeuge und Methoden unabdingbar macht. Nicht zuletzt auch aufgrund ihres Gefahrenpotenzials und der hohen Kosten manueller Demontearbeiten ist zudem der ökonomische Einsatz von Robotik und anderer Automatisierungstechnologien auch zum Ende ihrer Lebenszeit angezeigt.

Noch stehen viele der dazu notwendigen Technologien und Standards jedoch am Anfang, es fehlen Sicherheitsempfehlungen, Industriestandards, Schnittstellen, und Werkzeuge.¹⁵² Zudem besteht Unsicherheit bezüglich relevanter Regulatorik, möglicher Mehrwerte und Anreize und letztlich mangelt es an praktischer Erfahrung und empirischer Evidenz für die konkrete Umsetzung von Circular-Economy-Maßnahmen für Traktionsbatterien.

Die Pilotthemen, die zu Beginn des Arbeitsprozesses von der Arbeitsgruppe Traktionsbatterien entwickelt wurden, sollen als Entscheidungsgrundlage für eine anschließende praktische Umsetzung dienen und zentrale offene Fragenfelder einer Circular Economy für Traktionsbatterien beleuchten. Die Auswahl der Pilotthemen erfolgte mittels übergeordneter Entscheidungskriterien. So wurde bei der finalen Festlegung der Pilotthemen darauf geachtet, dass 1) die Pilotthemen einen signifikanten Beitrag zur Erreichung des Zielbilds leisten, 2) das Kompetenzspektrum der Arbeitsgruppenmitglieder möglichst umfassend miteinbezogen wird, 3) neue Wertschöpfungsnetzwerke und Konstellationen der Akteure initiiert werden, 4) die Implementierung der Projekte möglichst zeitnah erfolgen kann und 5) die Projekte eine skalierbare Wirkung in Bezug auf den Ausbau einer Circular Economy aufweisen.

Auf Basis der dargelegten Entscheidungskriterien legte sich die Arbeitsgruppe auf folgende drei Pilotthemen zur weiteren Ausarbeitung fest. Diese wurden in den jeweiligen Unterarbeitsgruppen zu detaillierten Pilotsteckbriefen weiterentwickelt.

1. Kenntnis des Batterielebens
2. Modellbasierte Entscheidungsplattform
3. Demontagenetzwerk für Traktionsbatterien

Der praktische Mehrwert der drei Pilotsteckbriefe ergibt sich aus deren konsequenter Umsetzungsorientierung im Hinblick auf eine erfolgreiche Implementierung. So weisen alle drei Pilotsteckbriefe – trotz ihrer thematisch spezifischen Schwerpunktsetzung und Ausgestaltung – eine übergeordnete Struktur auf, die unter anderem die momentanen Herausforderungen im System benennt, umsetzungsrelevante Stakeholdergruppen identifiziert, betriebliche und regulatorische Anforderungen erläutert und mit der Ausformulierung einer konkreten Roadmap mit Handlungsempfehlungen sowie noch offener Fragen schließt.

Insofern können die Pilotsteckbriefe die Grundlage für das weitere Handeln der adressierten Akteure bilden – beispielsweise für die Durchführung von Industrieprojekten, die Ausschreibung öffentlicher Entwicklungs- oder Forschungsprojekte oder auch die politische Gestaltung von regulatorischen Rahmenbedingungen.

Im Folgenden werden die drei Pilotsteckbriefe jeweils in ihren Kernaussagen kurz zusammengefasst. Dabei werden die grundsätzliche Bedeutung des jeweiligen Pilotprojekts für den Ausbau einer Circular Economy für Traktionsbatterien verdeutlicht, Kernaufgaben und Herausforderungen spezifiziert und inhaltliche Faktoren für eine erfolgreiche Implementierung skizziert. Im Anschluss an diese Kurzvorstellung der einzelnen Pilotthemen wird nochmals eine integrierte Betrachtung der Pilotthemen vorgenommen, wobei insbesondere näher auf deren synergetische Potenziale und Wechselwirkungen eingegangen wird.

4.1 Kenntnis des Batterielebens

Zielsetzung des Pilotsteckbriefs „Kenntnis des Batterielebens“ ist es, einen systematischen Überblick hinsichtlich der Bereitstellung von Batteriedaten (Datenverfügbarkeit) über den gesamten

152 | Vgl. Bustamante et al. 2020. Neben der Anpassung bestehender sind die Festlegung neuer Batteriestandards zum Beispiel in Bezug auf Performancetesting, Anforderungen an Datenformate, -verfügbarkeit, Design und Sicherheitsanforderungen essenziell. Die Pilotsteckbriefe zeigen hier unter anderem erste wichtige Ansatzpunkte auf. Konkrete Handlungsempfehlungen für zukünftige Normungs- und Standardisierungsaktivitäten werden zudem im Rahmen der Nationalen Plattform Zukunft der Mobilität (NPM)/Arbeitsgruppe 6: Normung, Standardisierung, Zertifizierung und Typengenehmigung entwickelt und als „Schwerpunkt-Roadmap Nachhaltige Mobilität“ voraussichtlich Ende 2020 veröffentlicht.

Lebenszyklus der Traktionsbatterie zu schaffen. Folgende zusammenfassende Kernaussagen des Pilotsteckbriefs wurden in diesem Zusammenhang abgeleitet:

- Die Nutzung von Daten und Informationen aus den Batterielebenszyklen spielt eine zentrale Rolle bei der Initiierung und Umsetzung von unternehmens- und lieferkettenübergreifender Zusammenarbeit. Durch eine gesteigerte Datentransparenz können ökologische (Dekarbonisierung) und soziale (Responsible Sourcing¹⁵³) Zielparameter verdeutlicht und das ökonomische Nutzungspotenzial der Batterien (Effizienz, Rohstoffverfügbarkeit) über ihren gesamten Lebensweg gesteigert werden. Eine transparente Datenverfügbarkeit trägt somit erheblich dazu bei, die momentan noch relativ geringe Akzeptanz der Konsumierenden bezüglich der Elektrifizierung des Individualverkehrs zu überwinden.
- Daher gilt es, die Datenbedarfe und -anforderungen je Prozessschritt und Akteur in der Wertschöpfungskette transparent zu machen und die Definition notwendiger Standards von Informationen im Sinne eines IDIS for Batteries festzulegen – IDIS ist das internationale Demontage-Informationssystem (International Dismantling Information System). Hierbei wird eine grundsätzliche Unterscheidung in „notwendige“ und „ergänzende“ Daten vorgeschlagen.
- Datenbedarfe und -anforderungen hängen jedoch stark vom gewählten Geschäftsmodell ab. So sind zum Beispiel im Fall eines Leasingmodells, bei dem der Fahrzeughersteller oder Flottenbetreiber Eigentümer der Traktionsbatterie über den gesamten Lebensweg bleibt, die Datenverfügbarkeit und -verfolgbarkeit, die Regelung von Zugriffsrechten und der Schutz von vertraulichen Daten deutlich einfacher zu gestalten als im Fall des „business as usual“, bei dem das Eigentum an der Traktionsbatterie mit jedem Fahrzeugverkauf weitergereicht wird.
- Da grundsätzlich bereits viele Daten über den Zustand einer Batterie vorhanden, aber nicht zwingend verfügbar sind, liegt eine große Herausforderung darin, für alle beteiligten Akteure Anreize zum Teilen von Daten

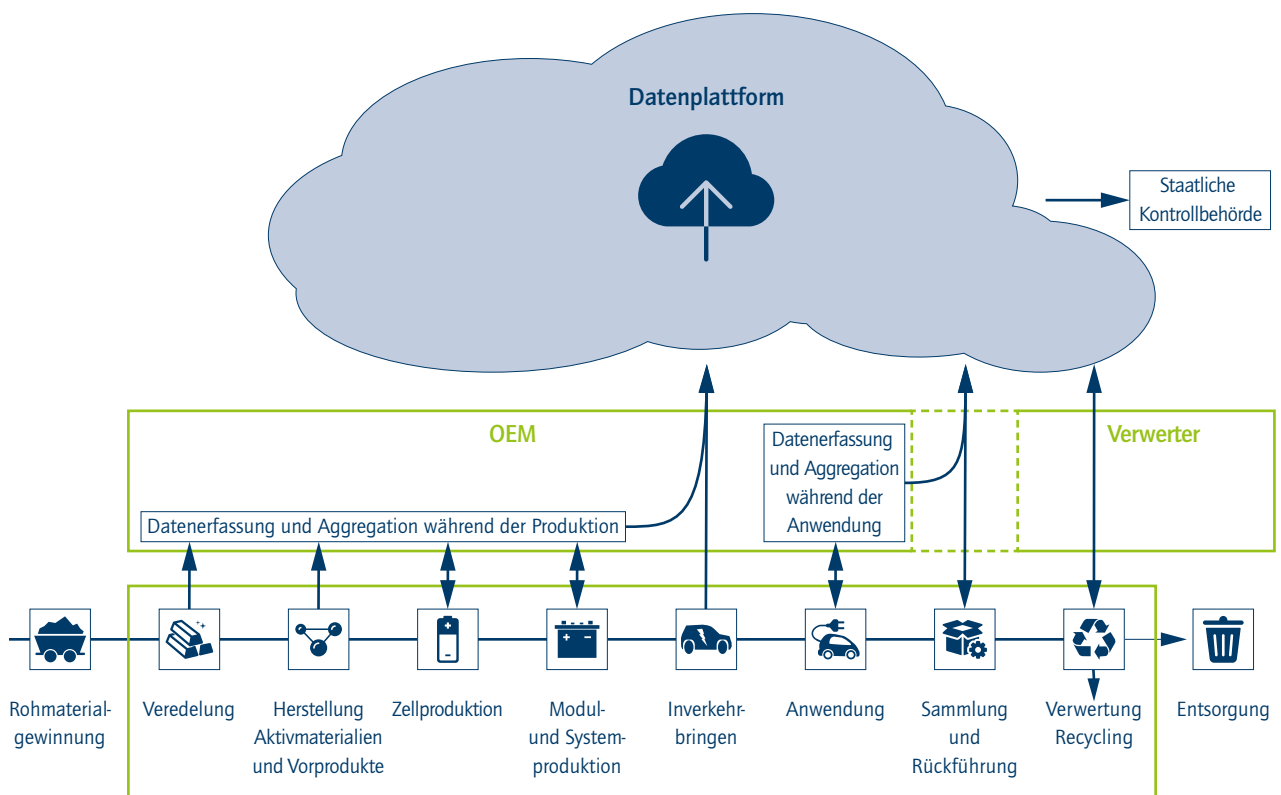


Abbildung 17: Kernprodukt der Unterarbeitsgruppe 1 sind Empfehlungen hinsichtlich der Informationsflüsse zur Förderung der Kreislaufführung von Traktionsbatterien (Quelle: eigene Darstellung, angelehnt an die Darstellung des World Economic Forum 2019)

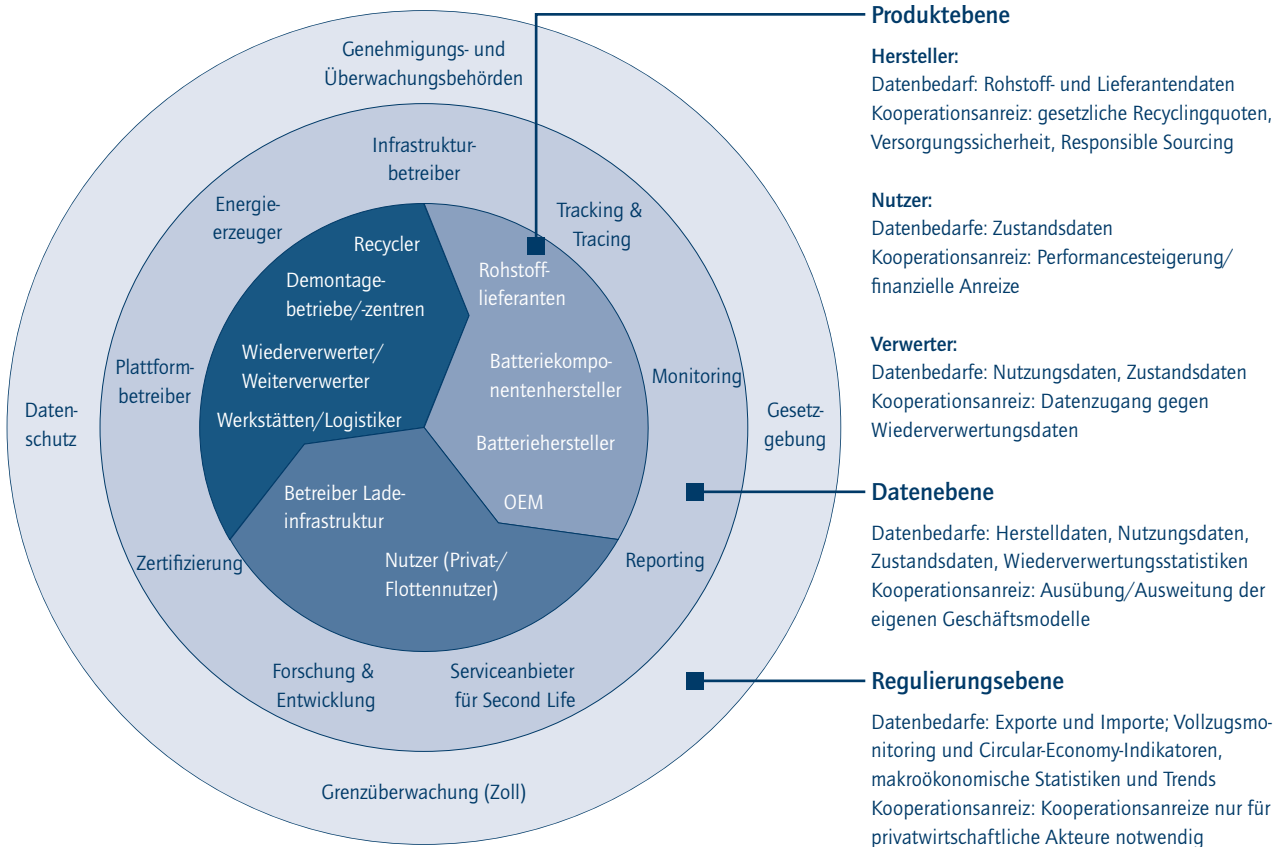


Abbildung 18: Akteure, Datenbedarfe und Kooperationsanreize für eine Pilotumsetzung (Quelle: eigene Darstellung)

Zeithorizont / Arbeitspaket	Horizont 1												Horizont 2	Horizont 3
	2021				2022				2023				bis 2027	bis 2030
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4		
Grundlagen für die Nachverfolgbarkeit des Verbleibs über den Lebenszyklus													Dateneinbindung und -schutz (Daten- und IP-Schutz, Einbindung in Datenplattformen); Definition von Reporting Anforderungen; Entwicklung eines Reporting und Monitoring Systems (inkl. Big-Data-Analysen) in Abstimmung mit Wirtschaft und Politik (sowie Integration zu EU-Vorhaben)	Europäische und globale Harmonisierung von Dateneinbindung, Reporting und Monitoring
Definition von Datenbedarfen und deren Verfügbarkeit														
Grundlagen zentrale Datenplattform (+Zugang und Schutz)														
Entwicklung einer interoperablen Datenplattform und notwendiger Standards														

Abbildung 19: Wichtigste Umsetzungsschritte für die Implementierung des Projektsteckbriefs „Kenntnis des Batteriealters“ (Quelle: eigene Darstellung)

zu schaffen. Insbesondere die Verfügbarkeit der Daten der Fahrzeughersteller über die Erstanwendung und das entsprechende Batterieverhalten ist als zentraler Punkt identifiziert worden. Diesbezüglich müssen verstärkt Anreize für Fahrzeughersteller zur Bereitstellung von Betriebsdaten geschaffen werden.

Hinsichtlich der konkreten Ausgestaltung der zu implementierenden Datenplattform ergibt sich eine Reihe grundsätzlicher Fragestellungen: zur Datenhaltung (welche Vor- und Nachteile ergeben sich aus einer lokalen versus zentralen Datenhaltung?), zum rollenbasierten Datenzugriff (welcher Akteur hat welche Lese- und Schreibrechte?) und zur Datentransparenz (wer hat wann welche Daten erzeugt oder verändert?). Dabei sollte aufgrund der Vielzahl von Datenbereitstellern und -nutzern die Interoperabilität der Daten durch einheitliche Standards gewährleistet sein.

4.2 Modellbasierte Entscheidungsplattform

Zielsetzung des Pilotsteckbriefs „Modellbasierte Entscheidungsplattform“ ist es, eine Entscheidungsgrundlage für eine offene Plattform zur Modellierung der optimalen Anwendung von Batterien am Ende der Lebensdauer bereitzustellen. Folgende zusammenfassende Kernaussagen des Pilotsteckbriefs wurden in diesem Zusammenhang abgeleitet:

- Eine modellbasierte Entscheidungsunterstützung trägt zur optimierten Entscheidungsfindung (Second Life oder verschiedene Recyclingrouten) für die Behandlung von gebrauchten Traktionsbatterien bei.
- Das Ziel ist die übergeordnete, optimierte Gestaltung des Batterielebenszyklus beziehungsweise des Netzwerks

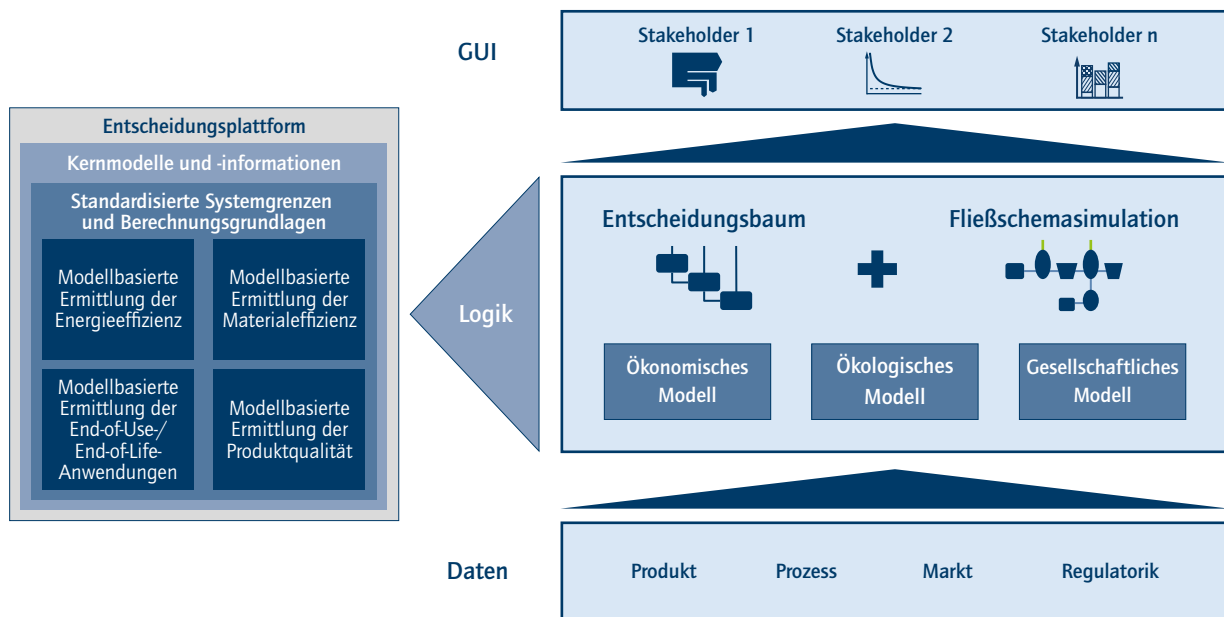


Abbildung 20: Modellstruktur der Entscheidungsplattform (Quelle: eigene Darstellung)

aller Akteure und die faire Verteilung von Aufwendungen und Erlösen.

- Standardisierte sowie valide Systemgrenzen und Berechnungen führen zu Transparenz und Vergleichbarkeit, wobei ökonomische, ökologische und soziale Aspekte berücksichtigt werden.
- Die modellbasierte Entscheidungsunterstützung muss auf reelle und validierte Daten zurückgreifen und insbesondere auftretende Exergieverluste und erzielbare Outputqualitäten in den verschiedenen End-of-User- und End-of-Life-Optionen transparent berücksichtigen.
- Viele Stakeholder, die über den Lebenszyklus von Traktionsbatterien hinweg involviert sind, besitzen

wichtige Informationen zur optimierten Lebenszyklusplanung. Diese Informationen sollten auf der Plattform gesammelt und für wertsteigernde Aktivitäten bereitgestellt werden können. Hierbei gilt es stets, sensible Daten sicher zu verwahren.

Eine genaue Ausgestaltung der Plattform ist betreiberspezifisch und unter anderem abhängig vom gewählten Geschäftsmodell und den berücksichtigten Akteuren und bedarf auch im Hinblick auf die Weiterentwicklung der integrierten Modelle weiterer Forschung.

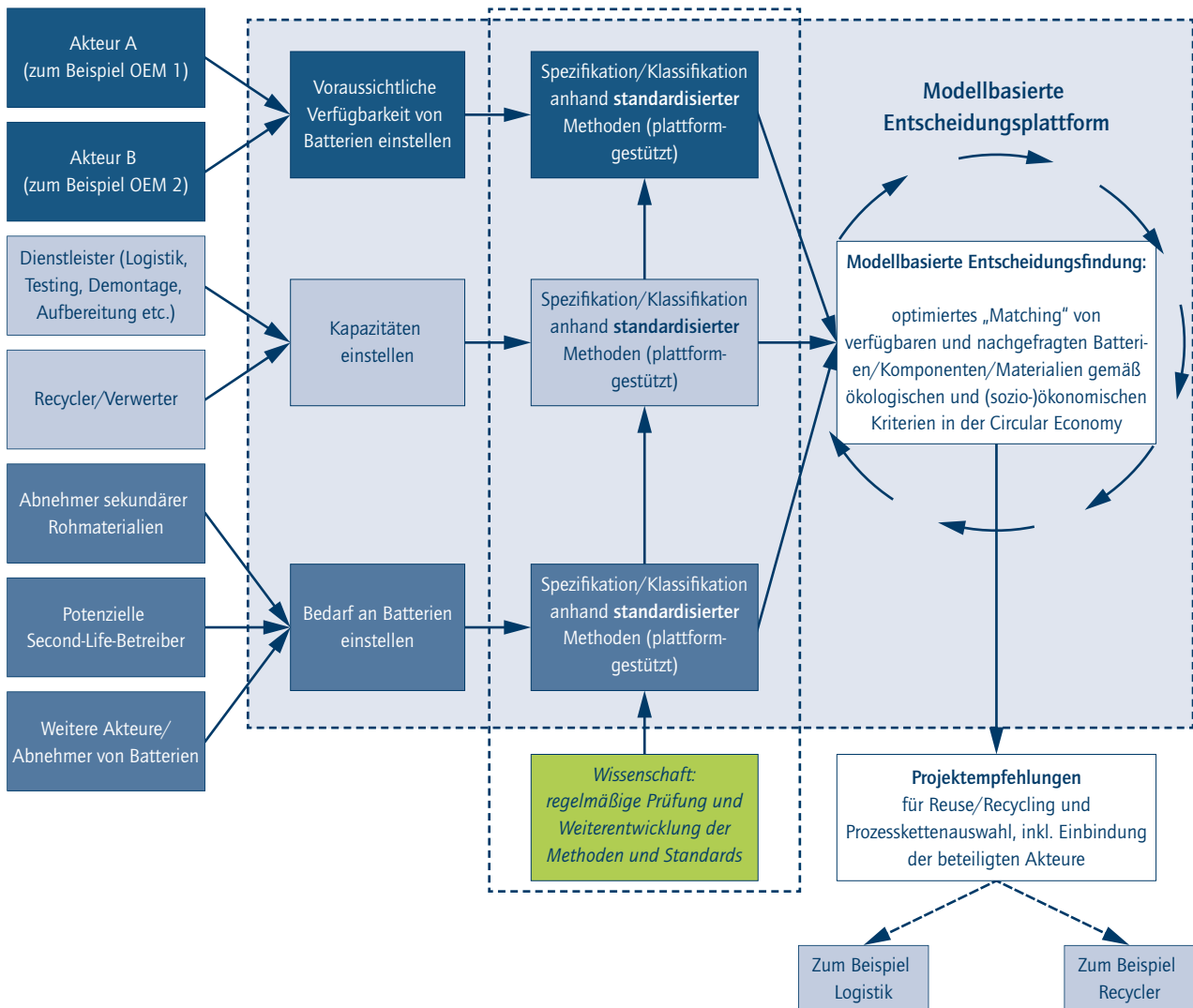


Abbildung 21: Schematische Darstellung der Einbindung einer Plattform in die Geschäftsprozesse der Circular Economy (Quelle: eigene Darstellung)

Zeithorizont Arbeitspaket	Horizont 1												Horizont 2	Horizont 3
	2021				2022				2023				bis 2027	bis 2030
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4		
AP1: Entwicklung von Nachfrage- und Preisprognosen für First- und Second-Life-Anwendungen sowie Batteriematerialien in Europa bis 2035													Identifizierung möglicher Geschäftsmodelle und Ausarbeitung eines Plattformbetreibers; gezielte Unterstützung einer Entscheidungsplattform, unter anderem finanziell durch Unterstützung von Prototyping; Entwicklung eines Anreizsystems für zirkuläre Wertschöpfung in Netzwerken	Modelle vervollständigen/weiterentwickeln; Umsetzung der Entscheidungsplattform; Einbindung weiterer Akteure
AP2: Festlegung von internationalen/europäischen Berechnungsstandards, Systemgrenzen und Kennzahlen zur Bewertung von End-of-Use-/End-of-Life-Szenarien														
AP3: Konzeptionelle Entwicklung einer Plattform für verschiedene Betreiber														
AP4: Modellbasierte Ermittlung der Energieeffizienz (inkl. Exergieverlusten) verschiedener Prozessrouten														
AP5: Modellbasierte Ermittlung der Materialeffizienz verschiedener Prozessrouten														
AP6: Modellbasierte Ermittlung notwendiger Aufwendungen und erreichbarer Produktqualitäten verschiedener End-of-Use-/End-of-Life-Behandlungen														
AP7: Entwicklung von anwenderfreundlichen, komprimierten Berechnungs- und Visualisierungsmethoden														
AP8: Ausarbeitung der Roadmap für eine Entscheidungsplattform für Traktionsbatterien in Europa bis 2035														

Abbildung 22: Mögliche Roadmap der modellbasierten Entscheidungsplattform (Quelle: eigene Darstellung)

4.3 Demontagenetzwerk für Traktionsbatterien

Zielsetzung des Pilotsteckbriefs „Demontagenetzwerk für Traktionsbatterien“ ist die Skizzierung eines „Projektplans“, um ein europäisches Demontagenetzwerk zu implementieren. Folgende zusammenfassende Kernaussagen des Pilotsteckbriefs wurden in diesem Zusammenhang abgeleitet:

- Der Aufbau eines europaweiten Netzwerks von leistungsfähigen Demontageanlagen für Traktionsbatterien ist essenziell für den Erfolg der gesamten Recycling- beziehungsweise Wiederverwendungskette. Das gemeinsame Netzwerk stellt ein wichtiges Zwischenglied zwischen Erfassung/Sammlung (zum Beispiel durch Vertragswerkstätten etc.) und Weiterbehandlung/Recycling (oder Second Life) der Batteriemodule dar.
- Kernaufgabe eines Demontagenetzwerks ist es somit zum einen, größere Stückzahlen an Batterien zunächst auf ihre Eignung für eine Zweitnutzung hin zu untersuchen, und zum anderen Batterien, die für eine Zweitnutzung nicht geeignet sind, mit der hierfür notwendigen Infrastruktur bis auf die Modulebene zu zerlegen.
- Bei der Implementierung eines solchen Demontagenetzwerks gilt es jedoch in der Übergangszeit folgendes Paradoxon („Henne-Ei-Problem“) zu lösen: Einerseits ist – solange noch recht wenige End-of-Life-Batterien von Elektrofahrzeugen anfallen – der Anreiz für potenzielle Betreiber gering. Andererseits bedeutet eine geringe Zahl an Demontageanlagen in Europa, dass allein aufgrund großer Transportentfernungen die spezifischen Logistikkosten und CO₂-Emissionen des Transports sehr hoch sind.
- Erfolgskritisch für die Implementierung ist es somit, Investitionsentscheidungen für neue Demontageanlagen auf einer validen Datengrundlage zu treffen, um die

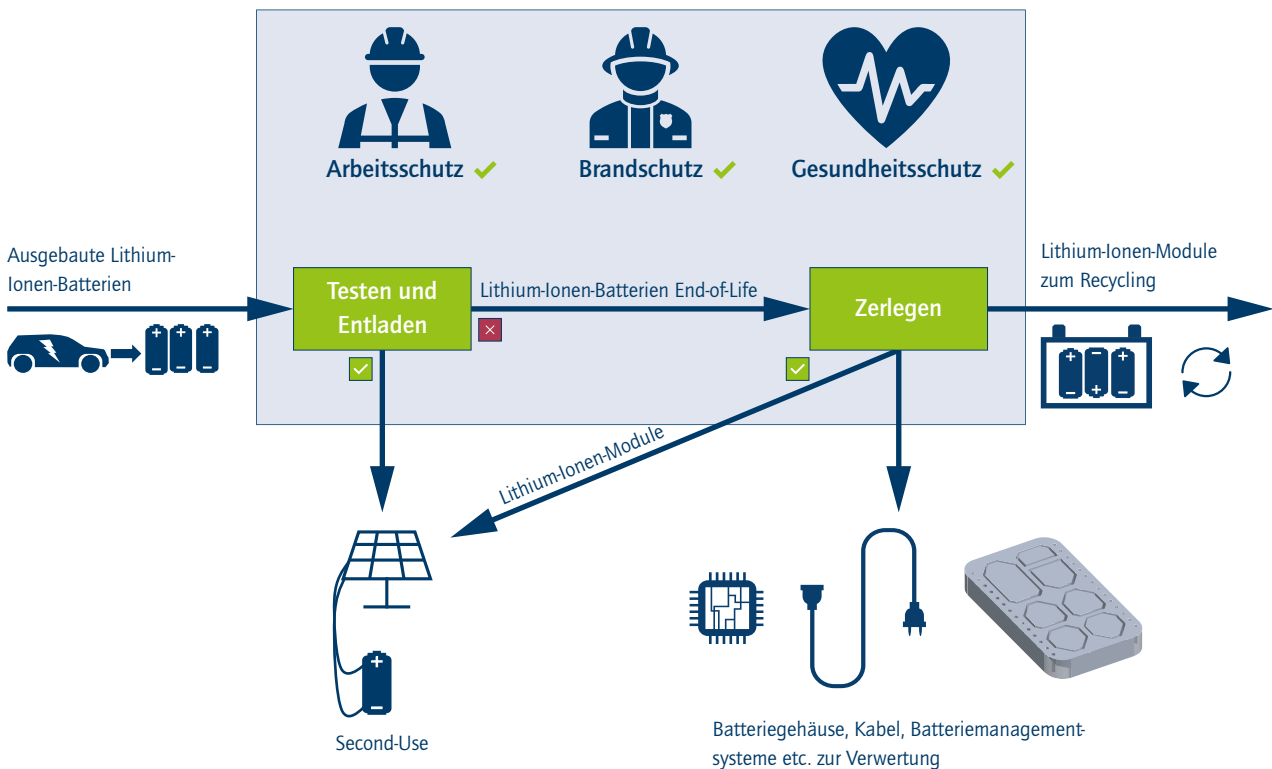


Abbildung 23: Konzept einer Demontageanlage für Traktionsbatterien (Quelle: eigene Darstellung)

Recyclinginfrastruktur passgenau zu verbessern und im europäischen Maßstab skalierbar zu machen. Hierbei müssen bestimmte Parameter betrachtet werden, wie in etwa Zeitpunkt, Wahl des Anlagenstandorts, Dimensionierung der Anlagengröße gemäß den künftig wachsenden Rücklaufmengen sowie die Konkretisierung der Anlagenausstattung (Grad und Anpassungsfähigkeit der Automatisierung hinsichtlich wechselnder Batterieformate- und -zusammensetzungen).

Die moderne, möglichst automatisierte Zerlegung (auf Basis eines forcierten Designs for Disassembly) der Hochvoltbatterien in Anlagen, welche hohen Brand-, Arbeits- und Gesundheitsschutzanforderungen Rechnung tragen und von hoch qualifiziertem Personal betrieben werden, muss ein wichtiger Markenkern der Recyclingwirtschaft in Europa werden.

Zeithorizont Arbeitspaket	Horizont 1												Horizont 2	Horizont 3
	2021				2022				2023				bis 2027	bis 2030
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4		
AP1: Szenariengestütztes Hochlaufmodell für Demontageanlagen in Europa													Aufbauend auf den Standards und Roadmaps: Mitgliedstaaten und EU-Kommission (sowie gegebenenfalls Europäische Investitionsbank) unterstützen gezielt Demontagenetzwerke, unter anderem finanziell, durch Unterstützung von Prototyping, regionaler Differenzierung etc.	Demontagenetz vervollständigen bis zu hohem Reifegrad, um auf Rücklaufmengen 2030/2035 vorbereitet zu sein. Hierbei insbesondere strukturelle Unterstützung der südlichen und östlichen EU-Mitgliedsstaaten basierend auf Bedarfen aus Modellierungen
AP2: Arbeits- und Gesundheitsschutzstandards für Demontageanlagen														
AP3: Brandvermeidungsstandards und Brandbekämpfungsstandards für Demontageanlagen														
AP4: Ausarbeitung passgenauer Zusatzqualifikationen von Beschäftigten in Demontageanlagen														
AP5: Design for Disassembly für eine automatisierte Zerlegung														
AP6: Abstimmung aller Arbeiten mit einem europäisch besetzten Begleitkreis														
AP7: Ausarbeitung der Roadmap für ein Demontagenetzwerk für mobile Stromspeicher in Europa bis 2035														

Abbildung 24: Mögliche Implementierungsschritte für die Etablierung eines europaweiten Demontagenetzwerkes (Quelle: eigene Darstellung)

4.4 Integrierte Betrachtung der Pilotsteckbriefe

Aus der zusammenfassenden Darstellung zentraler Kernaussagen der drei Pilotsteckbriefe wird deutlich, dass sich die verschiedenen Pilotprojekte teils gegenseitig bedingen und daher erst in einer integrierten Betrachtung ihre synergetischen Potenziale voll entfalten können.

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass die Bereitstellung von Daten als Grundvoraussetzung für die erfolgreiche Implementierung aller drei Pilotprojekte betrachtet werden muss. Nur wenn ausreichend Daten (statische und dynamische) über den gesamten Lebenszyklus der Traktionsbatterie zur Verfügung stehen (siehe Pilotthema „Kenntnis des Batterielebens“) und vor dem Hintergrund marktbezogener Informationen und regulatorischer Rahmenbedingungen weiter interpretiert werden, liegen die notwendigen Inputs für eine modellbasierte Entscheidung hinsichtlich der optimalen Anwendung von Batterien am Ende ihrer Lebensdauer vor (siehe Pilotthema „Modellbasierte Entscheidungsplattform“).

Die generierten Outputs aus einem solchen entscheidungsunterstützenden Prozess können den Betreibern von Demontageanlagen beziehungsweise -netzwerken wiederum dabei helfen, beispielsweise die Dimensionierung geplanter Recyclinganlagen besser zu bestimmen und konkrete Investitionsentscheidungen durch eine solide Datenlage zu untermauern (siehe Pilotthema „Demontagenetzwerk für Traktionsbatterien“).

Gleichzeitig sind jedoch auch Abhängigkeiten zwischen den Pilotthemen in umgekehrter Wirkrichtung erkennbar. So kann die konkrete Ausgestaltung von Demontagenetzwerken beispielsweise dabei helfen, dynamische Batteriedaten an kritischen Knotenpunkten zu sammeln und weiterzugeben. Ebenso kann durch die konkrete Ausgestaltung der Entscheidungsplattform darauf Einfluss genommen werden, ob es für einzelne Akteure spezifische Anreize zum Teilen relevanter Daten gibt. Abbildung 25 verdeutlicht diese rekursiven Wechselwirkungen und Synergien zwischen den Pilotthemen anhand einiger ausgewählter Inhalte. Zum besseren Verständnis werden die drei Pilotthemen dabei in ihrer jeweiligen Schwerpunktsetzung heuristisch hinsichtlich „Daten“, „Software“ und „Hardware“ unterschieden.



Abbildung 25: Wechselwirkungen und Synergien zwischen den Pilotthemen (Quelle: eigene Darstellung)

5 Handlungsempfehlungen für eine Circular Economy für Traktionsbatterien

Um das Zielbild zu erreichen und die Transformation hin zur Circular Economy im Allgemeinen zu unterstützen, entwickelten die Mitglieder der Arbeitsgruppe Traktionsbatterien Handlungsempfehlungen für Politik, Wirtschaft und Wissenschaft. Die Handlungsempfehlungen an die Politik betreffen schwerpunktmäßig die Dimension der „Regulatorik“. Gleichzeitig verstärken sie außerdem die Möglichkeit zu kollaborativem Handeln zwischen Akteuren (Wertschöpfungsnetzwerke), indem sie einheitliche Wettbewerbsbedingungen (Level Playing Fields) schaffen sowie Planungssicherheit bei der Initiierung und Umsetzung neuer Geschäftsmodelle bieten. Die Handlungsempfehlungen an die Wirtschaft sind darauf ausgerichtet, Circular-Economy-Technologien und -Geschäftsmodelle zur Marktreife zu bringen und innerhalb kollaborativer Wertschöpfungsnetzwerke zu skalieren. Die Handlungsempfehlungen an die Wissenschaft zielen insbesondere darauf ab, deren fundierte Expertise auf die Anwendung in Politik und Wirtschaft zu übertragen und Entscheider dort zu befähigen, sachlich und durch den Stand der technischen Entwicklung begründete Entscheidungen zu treffen.

Die Empfehlungen sind Resultate der Diskussionen der Arbeitsgruppe und ihrer Unterarbeitsgruppe sowie individuellen Konsultationen und stellen, soweit nicht anders vermerkt, gemeinsame Positionen der Mitglieder der Arbeitsgruppe Traktionsbatterien dar. Priorisierte Kernelemente werden zudem in Kapitel 6 entlang einer Roadmap zeitlich verortet.

5.1 Handlungsempfehlungen für die Politik

Der deutsche Gesetzgeber ist als zentraler Akteur aufgerufen, im europäischen Prozess ambitionierte Impulse zu setzen. Sowohl im europäischen als auch nationalen Kontext sollte die Bandbreite ressourcenpolitischer Instrumente (d.h. ökonomische, ordnungsrechtliche, informatorische, sowie Bildung und Forschung) genutzt werden, um den Transformationsprozess hin zur Circular Economy zu beschleunigen.

Die Mitglieder der Arbeitsgruppe Traktionsbatterien und die Geschäftsstelle der *Circular Economy Initiative Deutschland* bieten an, diesen Prozess durch ihre Expertise zu unterstützen.

- **Klare und verbindliche Definitionen und Standards** zur Erzeugung eines Level Playing Fields sind notwendig, um beispielsweise eine konsequente Berichterstattung zu ermöglichen oder die Ökoeffizienz von End-of-Life (EoL)-Prozessen zu bewerten. Der Gesetzgeber sollte Aktivitäten/Initiativen starten – unter anderem zu der:
 - Festlegung zentraler **Definitionen**: beispielsweise klare rechtliche Definitionen von Fahrzeugbatterien, eindeutige Beschreibung von für gesetzlich verpflichtende Zielwerte relevanten Systemgrenzen (siehe Vertiefung Batterierecycling) und Standardisierung der Berechnung von CO₂-Fußabdrücken für relevante Elemente, beispielsweise Rezyklate, Primärmaterialien und Batteriesysteme.
 - Einführung von **Mindeststandards**: Diese sollten sowohl befähigende als auch schützende Parameter umfassen (insbesondere Wahrung des Datenschutzes, Arbeitsschutz, verbindliche Rückgewinnungsraten). Hierzu gilt es juristische wie auch technische Einschätzungen einzuholen.
 - Unterstützung von **Industriestandards** unter Abstimmung mit der Wirtschaft, beispielsweise durch Nutzung und gegebenenfalls Mandatierung der etablierten Normen- und Standardisierungsorganisationen.
 - Berücksichtigung von **Daten- und IP-Sicherheit** sowie Innovationseffekten. Hierzu sollte auf State-of-the-Art-Technologien wie zum Beispiel Blockchain und End-to-End-verschlüsselte Datentransfers und Datenbanken zurückgegriffen werden.

Diese Punkte sind auf EU-Ebene in Kooperation mit den anderen Mitgliedsstaaten zu gestalten und durch den nationalen Gesetzgeber zu unterstützen und national umzusetzen.

- Der Gesetzgeber sollte die **Rechte und Pflichten** relevanter Akteure innerhalb einer zirkulären Batteriewertschöpfung unter Berücksichtigung von Kosten-Nutzen-Effekten und fairer Verteilung derselben klar definieren – unter anderem:
 - Definition von **Berichtspflichten**: Unter Abwägung von Kosten/Nutzen ist zu definieren, was berichtet werden soll. Im Mindestfall sollte dies jedoch Herkunft, Umwelt- sowie



Menschenrechtseffekte verwendeter Batteriematerialien und -stoffe, sicherheitsrelevante Daten und den Verbleib der Batterien am Lebensende umfassen.

- Festlegung von **Mindeststandards im zirkulären Batteriedesign** der Hersteller, unter anderem im Rahmen der Ökodesign-Richtlinie¹⁵⁴
- Klarstellung von **Haftungs- und Gewährleistungsregeln sowie Rückgabe- und Rücknahmepflichten** zwischen Herstellern und möglichen Second-Life-Anwenderinnen und -Anwendern respektive Nutzerinnen und Nutzern. Hierbei sollte insbesondere die Möglichkeit gegeben sein, **EPR-Pflichten** des Fahrzeugherstellers an Weiternutzerinnen und -nutzer (insbesondere für Second Life) weiterzugeben nach Zertifizierung der Eignung der Batterien hierzu zum Ende ihres ersten Lebens
- Einführung **einer Second-Life-Beweispflicht** für die Verwendung einer Batterie in Weiter- oder Umnutzung (Refurbishment/Second Life) zur Sicherstellung der Übergabe der EPR-Pflichten und der anschließenden **Haftung** von Second-Life-Anwenderinnen und -Anwendern zwecks Vermeidung von Leckage
- Implementierung **angemessener und effektiver Anreize** (für die Beschleunigung der Elektromobilität, von Circular-Economy-Geschäftsmodellen und für die Erreichung von zentralen Messgrößen) **und Sanktionen** (bei Nichteinhaltung) sind im Rahmen europäischer Regulatorik zu definieren und zu implementieren. Zu prüfen ist hierbei insbesondere die Einführung von **Pfandsystemen** (siehe Vertiefung Pfandsysteme).
- Sukzessive **Entwicklung von Sanktionsmechanismen**, um die effiziente Implementierung der Maßnahmen zu gewährleisten („Smart“ Policy) – siehe den nachfolgenden Aufzählungspunkt „Sanktionen“

Diese Punkte sind auf EU-Ebene in Kooperation mit den anderen Mitgliedsstaaten zu gestalten und durch den nationalen Gesetzgeber zu unterstützen und national umzusetzen.

- Zur Sicherstellung der Nachverfolgung, Adjustierung und Weiterentwicklung der Transformation hin zur Circular Economy ist die **Schaffung eines zentralen institutionellen Trägers** wichtig, der auf Basis von systemischer Fachexpertise beispielsweise ein kontinuierliches Datenmonitoring durchführt, (Erfolgs-)Statistiken und Forecasts erstellt und plausibilisiert und Indikatoren zum Grad der Zirkularität ermittelt und weiterentwickelt.

- Diese Funktion kann auch in bestehende Institutionen wie das Umweltbundesamt integriert werden, um Redundanzen und Konflikte zu vermeiden. Wichtig sind eine entsprechende Fachexpertise sowie die Autorität, belastbare Daten einfordern zu können und relevante Auswertungen (bis hin zu Sanktionen) durchzuführen. Eine Analogie könnte beispielsweise im Bergamt gesucht werden.

Dies ist durch den nationalen Gesetzgeber umzusetzen. Auch die Schaffung eines entsprechenden Akteurs auf Europäischer Ebene ist zu prüfen.

- Aufbau von Angeboten zur Aus- und Fortbildung sowie rasche Anwendung von **Grundlagen- und Anwendungswissen**, die die Skalierung von Circular Economy in Kooperation von Politik, Wirtschaft und Wissenschaft ermöglichen. Hierzu gehören:
 - Integration von Circular Economy in **Lehrpläne** der allgemeinbildenden und insbesondere berufsbezogenen Schulen
 - Berücksichtigung von Circular Economy bei relevanten **Ausbildungsberufen** (zum Beispiel für die sichere Handhabung von Hochvoltsystemen)
 - Einrichtung von Circular-Economy-bezogenen **Studiengängen und Studiengangvertiefungen** (im dualen Ausbildungssystem und Universitäten)
 - Schaffung von **Lernfabriken** für die Circular Economy, die als realistische Umgebungen für die berufliche Weiterbildung, Lehre und Forschung eingebunden werden können

Dies ist sowohl auf Ebene der Europäischen Union als auch durch nationalen Gesetzgeber zu gestalten; in Deutschland auf Bund- und Länderebene.

- Stärkung und deutlicher Ausbau von Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Circular Economy, im Besonderen von Traktionsbatterien, die eine schnelle Umsetzung und erfolgreiche Kreislaufführung sicherstellen. Dies umfasst insbesondere:
 - Verankerung in Forschungsrahmenplänen und Entwicklung Circular-Economy-bezogener **Förderbekanntmachungen** sowie Bereitstellung der notwendigen Mittel zur Förderung von Verbundprojekten

154 | Vgl. Europäische Union 2009.

- Einrichtung von Circular Economy bezogener **Professuren/Lehrstühle**
- Ausbau der **Forschungsinfrastruktur** an Universitäten und außeruniversitären Forschungseinrichtungen
- Bereitstellung von Mitteln zum **Transfer von Forschungsergebnissen** in innovative Umsetzungen
- Einrichtung eines **fachlichen Beirats** mit Mitgliedern aller betroffenen Stakeholder zur Entwicklung und Beratung von Förderkonzepten und -maßnahmen

Dies ist sowohl auf Ebene der Europäischen Union als auch durch den nationalen Gesetzgeber zu gestalten; in Deutschland auf Bund- und Länderebene.

- Der Gesetzgeber sollte allen Akteuren in der Wertschöpfungskette eine bewertende Orientierung bieten. Dazu muss er Maßnahmen entwickeln, um die Transparenz in der Industrie und für Konsumierende zu erhöhen:
 - Erhöhung von **Transparenz für Konsumierende**: Auf der Ebene der Batterie könnte dies beispielsweise die Einführung von Kennzeichnungen zur ökosozialen Leistung der Batterie sein (zum Beispiel CO₂-Fußabdruck je Leistung, Rezyklatanteil, Menschenrechts-Due-Diligence).
 - Erhöhung von **Datenverfügbarkeit für wirtschaftliche Akteure**: Die digitale Bereitstellung geschäftsrelevanter Informationen (zum Beispiel Hinweise zur sicheren

Handhabung, zu enthaltenen Materialien inklusive des Rezyklatanteils, zum CO₂-Fußabdruck je Leistung (Kilogramm CO₂-Äquivalent pro Kilowattstunde), Menschenrechts-Due-Diligence) sollte durch die rechtlich verbindliche Beschreibung von **Material- beziehungsweise Produktpässen (Battery Passport)**^{155, 156, 157} sichergestellt werden.

- Bestimmung der **verpflichtend zu berichtenden Daten**: Diese sind zu unterteilen nach **statischen Daten** (Materialfußabdruck, Seriennummern, Fertigungsinformationen etc.) und **dynamischen Daten** (den jeweiligen Besitzern, Wartungsmaßnahmen, dem Zustand (State of Health – SoH) etc.). Ausgewählte Daten von hoher Relevanz für den gesamten Markt und öffentliche Akteure sollten – unter Wahrung von Datenschutz und -sicherheit und gegebenenfalls nach Aggregation – in zentral verwalteten Datenbanken (**Data Spaces**)¹⁵⁸ abgelegt werden müssen.
- Schaffung von **Zertifizierungsmöglichkeiten für hochqualitative Produkte und Prozesse**: Auf Prozessebene beispielsweise könnte dies eine Zertifizierung einzelner Akteure für qualitativ hochwertige Geschäftstätigkeit (etwa bezüglich Demontage, Transport, Second Life oder Recycling) bedeuten.

Diese Punkte sind auf EU-Ebene in Kooperation mit den anderen Mitgliedsstaaten zu gestalten und durch den nationalen Gesetzgeber zu unterstützen und national umzusetzen.

Vertiefung IV: Batterierecycling: Definitionen, differenzierte Ziele und Ambitionslevel

Allgemein akzeptierte und präzise **Definitionen** von zentralen Begriffen wie Batterierecycling und Rezyklat sind wichtige Grundlagen für die Berechnung und Bewertung der Recyclingeffizienz und die Festsetzung von Rückgewinnungsraten. Aufgrund des gemeinsamen umfassenden Fachwissens der Arbeitsgruppenmitglieder und der verhältnismäßig etablierten, ingenieurtechnisch/physikalisch bedingten Prozesse des Batterierecyclings können hier konkretere Empfehlungen gemacht werden als zu anderen in diesem Bericht genannten Themen. **Die folgenden Definitionen, durch**

die Mitglieder der Arbeitsgruppe auf Basis ihrer Expertise über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg erarbeitet und durch externe Fachexpertinnen und -experten validiert, werden empfohlen:

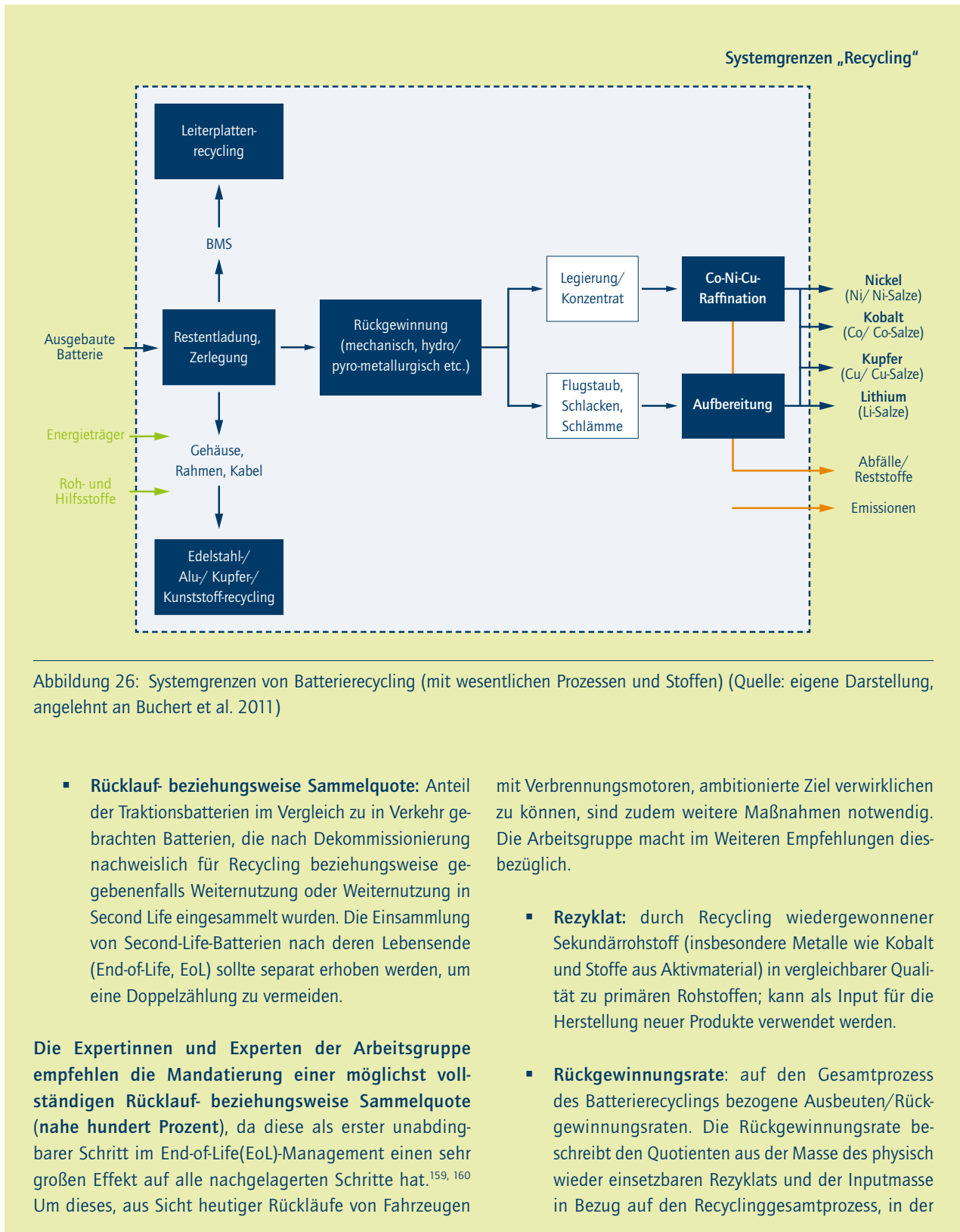
- **Batterierecycling**: der gesamte Prozess von der Deaktivierung der Batterie(-komponenten) bis zur abgeschlossenen Gewinnung von verkaufsfertigen Rohstoffen (Rezyklaten) für die Herstellung neuer Batteriematerialien in vergleichbarer Qualität zum Primärmaterial (siehe Abbildung 26 zu den hier gewählten Systemgrenzen von Batterierecycling):

155 | Siehe Glossar.

156 | Vgl. Europäische Kommission 2020.

157 | Vgl. Presse- und Informationsamt der Bundesregierung 2019.

158 | Vgl. Europäische Kommission 2020.



159 | Vgl. Aufforderung zur Festlegung von Rücklaufquoten in ProgRes III.

160 | Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit 2019.

Regel stoffbezogen; Dementsprechend ist die Rücklauf beziehungsweise Sammelquote nicht einzuberechnen. Zu erheben als das Mittel über ein Geschäftsjahr einer operativen Einheit (Recyclingstandort, Geschäftseinheit oder Recyclingprozess) und durch angemessene Audits oder Zertifizierung nach Menge, Qualität und Energie beziehungsweise CO₂-Fußabdruck zu verifizieren.

Damit umfasst die Berechnung der Rückgewinnungsrate den **Gesamtprozess des Recyclings** – wobei **frühere Schritte im Prozess die verbleibende maximale Erfolgsrate reduzieren und dementsprechend von hoher Bedeutung für den Gesamterfolg sind**:

$$(1 - \text{Demontage- und Aufbereitungsverluste}) \times (1 - \text{metallurgische}^{161} \text{ Verluste}) = \text{Recyclingrate}$$

Wird die Nutzungs- und Sammelphase einbezogen, ergibt sich folgende End-of-Life (EoL)-Ausbeute:

$$(\text{in Umlauf gebrachte Batterien}) \times (\text{Rücklaufquote EoL-Batterien}) \times \text{Recyclingrate} = \text{Ausbeute}$$

Die Berechnungen sollten dabei in der Regel stoffbezogen ausgeführt werden.

Folgende Punkte sind weiterhin zu beachten:

- Neben der Festlegung von **verbindlichen minimalen Rückgewinnungsraten beziehungsweise Recyclingquoten** sind **differenzierte materialspezifische Quoten** für die relevantesten Materialien und Stoffe wichtig – das heißt nach EU-Definition „kritische“ und für die Batterieherstellung besonders wichtige sowie besonders CO₂-intensive funktionale Metalle und Stoffe.
- Die Ziele sollten **ambitioniert** gestaltet werden und den Entwicklungspfaden der Industrie entsprechend mit der Zeit **ansteigen** – beispielsweise angelehnt an den Best-Available-Technology(BAT)-Ansatz.¹⁶² Sie

sollten weiterhin in angemessenen Intervallen neu bewertet werden.

- Die Hochwertigkeit der Rezyklate ist dabei zu betonen: So sind a) Rezyklate bei fehlender Qualität ohne großen Wert (Downcycling) – fehlende Anforderungen an Rezyklatqualitäten erlauben (und belohnen damit gegebenenfalls ökonomisch) niederwertiges Recycling, was aus Sicht einer Circular Economy nicht erstrebenswert ist, b) nur durch hochqualitative Recyclingprozesse kann eine weitgehende Ressourcenentkopplung erreicht werden (nicht auf kurzfristige Wirtschaftlichkeit und Energiebalance im bestehenden Energiemix optimieren), c) unter mittelfristig erwartbarer Bepreisung von CO₂ rückt höherwertiges Recycling näher an ein makroökonomisches Optimum, sodass eine frühzeitige Regulierung hiermit weitsichtiger Politik entspricht.
- Perspektivisch sollten Rückgewinnungsraten um eine Bewertung der Rückgewinnung gemäß **systemischer thermodynamischer Evaluation** (das heißt ihr Effekt auf Exergie beziehungsweise Entropie des Gesamtsystems) ergänzt werden.^{163, 164}
- Um die (in der Regel positiven) Umwelteffekte resultierender Rezyklate im Vergleich miteinander sowie mit vergleichbaren Primärmaterialien konsistent bestimmen zu können, sind die Recyclingprozesse über die erzielten Recyclingraten hinaus vorrangig gemäß ihrer Energie- und/oder ihrer CO₂-Intensität sowie gegebenenfalls nach anderen Umweltfaktoren zu bewerten und die Effekte dem Rezyklat zuzuordnen (Allokation).
- Sofern Rezyklate aus Batterien in anderen hochwertigen Produkten genutzt werden (Open Loop), ist nachzuweisen, dass sich dies insgesamt positiv oder mindestens neutral auf die Systemeffizienz auswirkt und die wiedergewonnenen Stoffe, wie in diesem Bericht definiert, eine entsprechende Qualität aufweisen.

161 | Siehe Glossar.

162 | Vgl. OECD 2017.

163 | Vgl. Reuter et al. 2019.

164 | Anmerkung: Dies entspricht aus berechtigten Gründen nicht der Stoßrichtung der aktuellen Revision relevanter Regulatorik – insbesondere der Batteriedirektive –, sollte aber in Zukunft berücksichtigt werden.

165 | Vgl. Europäische Union 2012.



Material	Empfohlene Rückgewinnungsraten*	
	2025 – verbindlich	2030 – anzustreben***, ****
Gesamtbatterie**	60 %	70 %
Lithium	50 %	85 %
Kobalt	85 %	90 %
Nickel	85 %	90 %
Kupfer	85 %	90 %
Stahl	90 %	95 %
Aluminium (ohne Al-Folien)	90 %	95 %

* über den Gesamt-Recyclingprozess exklusive Einsammlung beziehungsweise Rückführung ermittelt (siehe Abbildung 26), in Batteriequalität oder vergleichbar. Die Rückgewinnung der organischen Komponenten ist unter Optimierung der Exergie des Gesamtprozesses und nur sekundär nach Masseausbeute und nicht zulasten der Rückgewinnung hochwertiger Rezyklate der wichtigen Batteriematerialien auszulegen. Rückführungsverluste sind zusätzlich zu fakturieren und entsprechend zu minimieren.

** Die vorgeschlagenen Rückgewinnungsraten für die Gesamtbatterie sind flexibel anzusetzen, da organische und volatile Stoffe (Elektrolyt, Kunststoffe, Grafit) einen wesentlichen Anteil ausmachen (circa 30 bis 40 Prozent). Diese sind oft nicht oder nur unter hohem Aufwand in angemessener Qualität wiederzugewinnen, was zulasten der Energiebilanz und Ausbeute wichtiger Batteriematerialien gehen könnte. Da letzteren das Primat zukommt, sind strikte Mindestwerte für die Gesamtbatterie oder auch einzeln für Elektrolyt, Kunststoffe und Grafit voraussichtlich nicht als zielführend anzusehen. Ihre Rückgewinnung sollte nur unter Sicherstellung der Gesamtenergiebilanz und Rückgewinnung wichtiger Batteriematerialien in hoher Qualität angepeilt werden.

*** Aus Sicht der Agora Verkehrswende und des Öko-Instituts ist es unter regulatorischen Prämissen und aus Gründen der Investitionssicherheit vorzuziehen, auch die Werte für 2030 verbindlich zu machen und gegebenenfalls einer Revision zu unterziehen.

**** Aus Sicht des Öko-Instituts sind, basierend auf Arbeiten für die Europäische Kommission in Vorbereitung der Revision der EU Battery Directive, in Bezug auf Kobalt, Nickel und Kupfer für 2025 und 2030 ambitioniertere, jeweils fünf Prozent höhere Werte anzusetzen und im Sinne industrieller Best Practice erreichbar. Diese Werte sollten regelmäßig überprüft und in Abhängigkeit vom technischen Fortschritt auch in den gesetzlichen Vorgaben angepasst werden.

Tabelle 2: Empfehlungen der Arbeitsgruppe Traktionsbatterien für verbindlich geltend zu machende beziehungsweise anzustrebende Rückgewinnungsraten (unter Berücksichtigung der dazugehörigen Definitionen)

- Eine Einbettung der genannten Punkte in die EU-Direktive (EU) No 493/2012 („Batterierichtlinie“)¹⁶⁵, eine explizite Ausweitung der Richtlinie auf Lithium-Ionen-Traktionsbatterien und eine diesbezügliche Spezifizierung sind anzustreben. Eine Harmonisierung der Umsetzung seitens verschiedener EU-Mitgliedstaaten ist dringend zu unterstützen.
- Wie andere Regularien zur Unterstützung der Circular Economy sind die genannten Maßnahmen auf alle im EU-Binnenmarkt in Verkehr gebrachten Traktionsbatterien anzuwenden, unabhängig von ihrer Herkunft oder der ihrer Produzenten.

Unter unbedingter Berücksichtigung der hier spezifizierten Definitionen, Systemgrenzen und weiteren Erläuterungen empfehlen die Mitglieder der Arbeitsgruppe Traktionsbatterien folgende Rückgewinnungsraten (siehe Tabelle 2). Diese wurden auf Basis sowohl aktueller wissenschaftlicher Forschung^{166, 167} als auch entsprechender Erfahrungswerte aus der aktuellen industriellen und wissenschaftlichen Praxis durch ausführliche Diskussion der teilnehmenden, führenden Fachexpertinnen und -experten abgeleitet und durch weitere externe Fachkräfte validiert. **Die Rückgewinnungsraten stellen ambitionierte, jedoch in der Praxis realistisch kommerziell umsetzbare Werte dar – unter Berücksichtigung des gesamten Recyclingprozesses (vergleiche Abbildung 26) und der hochqualitativen Rückgewinnung der Kombination der genannten Stoffe.**

Daher liegen sie *niedriger* als viele in der Literatur vorzufindende Werte, die oftmals nur Teile des Recyclingprozesses oder Laborwerte widerspiegeln.¹⁶⁸ Die vorgeschlagenen Werte beziehen sich entsprechend dem Zeithorizont der Arbeitsgruppe Traktionsbatterien auf die Jahre 2025 und 2030. Während die kurzfristigen Werte verbindlich zu sehen sind, um die Effektivität der ambitionierten politischen Maßnahme sicherzustellen, ist die Empfehlung der Mitglieder der Arbeitsgruppe für die langfristigen Werte lediglich anzustreben. Ob eine weitere verbindliche Erhöhung der Werte sinnvoll ist, sollte künftig erneut bewertet werden – abhängig etwa von einer künftigen technischen Entwicklung sowie von prozessualen und politischen Optimierungszielen.

166 | Vgl. Peters et al. 2017.

167 | Vgl. Miedema/Moll 2013.

168 | Vgl. beispielsweise Melin 2019b.

- Die **Harmonisierung nationaler und transnationaler Regulatorik** durch den Gesetzgeber ist zu mehreren Themen dringlich angeraten, beispielsweise zu:
 - **Prozessen und Anforderungen bei grenzüberschreitenden Transporten** von End-of-Life(EoL)-Traktionsbatterien und -komponenten
 - **Definitionen zentraler Begriffe** (wie Recycling – siehe Vertiefung Batterierecycling –, Abfalldefinition, „End of Waste“, Besitzzustände etc.)
 - **Offenlegungspflichten und Akkreditierungsmöglichkeiten von zentralen Messgrößen** (beispielsweise des CO₂-Fußabdrucks oder des Rezyklatanteils der Batterie)
 - **Harmonisierung batterierelevanter Regulatorik mit angelegelter Gesetzgebung**, etwa der Energiemarkt-, Infrastruktur-, Produkt- und Mobilitätsregulierung unter Berücksichtigung von Lebenszykluseffekten (zum Beispiel Erleichterung der Nutzung von batterieelektrischen Fahrzeugen (Battery Electric Vehicles, BEV) und stationären Batteriespeichern als „virtuelle Kraftwerke“ in Elektrizitätsnetzen, in Deutschland und in harmonisierten EU-Energiemärkten)
- **Zielgerichtete Wirtschafts- und Wissenschaftsförderung** der Circular Economy wird empfohlen. Dies umfasst besonders die Unterstützung konkreter Projekte zur (Weiter-)Entwicklung von Circular-Economy-relevanten Technologien und Geschäftsmodellen sowie zur Sicherstellung des notwendigen Wissensaufbaus, vor allem in kleinen und mittelständischen, Unternehmen (vergleiche Kapitel 5.3 Handlungsempfehlungen Wissenschaft).

Dies ist durch den nationalen Gesetzgeber unter Berücksichtigung europarechtlicher Einschränkungen und optimalerweise in Kooperation mit der EU und Mitgliedsstaaten zu gestalten.
- Auch die Formulierung von angemessenen **Anreizsystemen und Sanktionen** ist durch den Gesetzgeber zu berücksichtigen:
 - Hierbei ist die **Balance zu wahren zwischen Effektivität** (Erhöhung der Umweltfreundlichkeit und Stärkung der Wirtschafts- und Innovationskraft, zum Beispiel durch Automatisierung von Circular-Economy-Maßnahmen) **und Effizienz**; außerdem sind die Differenzierungsmöglichkeiten und der Wettbewerb zwischen den beteiligten wirtschaftlichen Akteuren zu berücksichtigen.

Diese Punkte sind auf EU-Ebene in Kooperation mit den anderen Mitgliedsstaaten zu gestalten und durch den nationalen Gesetzgeber zu unterstützen und national umzusetzen.

Vertiefung V: Maßnahmen zur Erhöhung von Rücklaufquoten: Finanzielle Anreizsysteme – Fokus Pfandsysteme

Durch Größe, Materialwert und Gefährdungspotenzial der Traktionsbatterien ist die Wahrscheinlichkeit im Vergleich zu anderen Produkten gering, dass sie nach ihrem Lebensende, dem End-of-Life, längere Zeit ungenutzt bleiben. Allerdings besteht das Risiko, dass – wie heute auch bei Altfahrzeugen (End of Life Vehicle, ELV) der Fall – Altbatteriefahrzeuge oder Batterien über dubiose Kanäle aus Europa exportiert und damit dem Kreislauf entzogen werden (Leakage). Zusätzliche Maßnahmen sind voraussichtlich notwendig, um zuverlässig eine hochwertige Weiternutzung und Materialwiedergewinnung sicherzustellen.

Während „weiche“ Maßnahmen wie Bildungskampagnen meist begrenzte Erfolge zur Erhöhung von Produktrücklaufquoten verzeichnen, haben Pfandsysteme (als Beispiel finanzieller Anreizsysteme) in vielen Fällen eine effektive Steuerungswirkung gezeigt. Wenngleich ein direkter Übertrag aus Erfahrungen in anderen Produktsegmenten (zum Beispiel geringwertigen und vergleichsweise kurzlebigen Produkten wie Kleinbatterien, Elektroschrott oder Getränkeverpackungen) auf hochwertige, langlebige Produkte wie Traktionsbatterien nicht ohne Weiteres möglich ist, deutet vieles darauf hin, dass ein Pfandsystem für Lithium-Ionen-Traktionsbatterien ein effektives politisches Instrument zur Reduktion dieser Leakage und damit der Erhöhung der Rücklauf- und Sammelquoten sein kann.¹⁶⁹ Auch veränderte Besitzmodelle wie Auto- oder Batterieleasingmodelle könnten Rücklauf- beziehungsweise Sammelquoten anheben,



da die Verantwortung und die Handlungsoptionen direkt bei den Produzenten bleiben. Bis diese jedoch eine weit verbreitete Praxis geworden sind, könnten Pfandsysteme eine zentrale verbleibende Möglichkeit sein, End-of-Life(EoL)-Traktionsbatterien zu erfassen und sicher in den Kreislauf zurückzuführen.

Die Ausgestaltung eines solchen Modells für Traktionsbatterien gilt es detailliert zu überprüfen:

- Wie die Erfahrung mit der Vielzahl existierender Pfandsysteme für verschiedene Produkte zeigt, kann ein Pfand, abhängig von Pfandhöhe und Nutzerfreundlichkeit, ein wirksames und gleichwohl effizientes politisches Instrument sein, um Anreize für Konsumierende zu erzeugen, End-of-Life(EoL)-Produkte an den Hersteller zurückzugeben und somit die Möglichkeit zu schaffen, dass diese in geeignete Verwertungskanäle eingespeist werden.
- Um einen ausreichenden Anreiz zur Rückgabe zu bieten, müsste aufgrund des hohen Werts der Traktionsbatterie möglicherweise ein dementsprechend hohes Pfand erhoben werden – voraussichtlich leicht oberhalb der Höhe des Schrott- beziehungsweise Recyclingwerts der Batterie. Die Effekte auf Rückstellungen und entsprechende Kapitalkosten und -risiken für produzierende Unternehmen und ausführende Product Responsibility Organisations (PRO) sind zu bewerten.
- Zu prüfen ist, wie eine hohe Kundenakzeptanz für ein Pfandsystem aufgebaut und wie die Abwicklung des Systems möglichst kundenfreundlich gestaltet werden kann. Zu berücksichtigen sind dabei unter anderem die Höhe des Pfands, der nötige Aufwand beziehungsweise die Nutzerfreundlichkeit für die Konsumierenden und die Informationsverfügbarkeit.
- Die Implementierung und Verwaltung eines Pfandsystems ist vergleichsweise kostengünstig und erprobt. Zusätzlich entstehende Kapital- und Gewährleistungsrisiken für diejenigen, die die Batterien in Verkehr bringen, könnten allerdings gegebenenfalls signifikant sein. Gleichzeitig könnte das Pfand

benötigtes Kapital für den Aufbau der nötigen Demontage- und Recyclinginfrastruktur bereitstellen. Die Gewährleistung von Kapitalrisiken durch die öffentliche Hand könnte geprüft werden.

- Lösungen zur angemessenen Berechnung des Pfands und Regelungen zur Weitergabe des Pfands bei einem Verkauf des Elektroautos beziehungsweise der End-of-Life(EoL)-Batterie müssen fundiert und sorgsam gestaltet werden, da ansonsten Hürden für den Kauf von batterieelektrischen Fahrzeugen (Battery Electric Vehicles, BEV) und für Transaktionen in Gebrauchtmärkten nicht auszuschließen sind.
- Vorteile könnten darin bestehen, dass eine langfristige Kundenbindung unterstützt wird und durch die Erhöhung der Rücklaufquoten und damit der Rückgewinnung der wertvollen Materialien die Lebenszeitkosten (Total Cost of Ownership, TCO) der Fahrzeugbatterien sinken könnten.

Der Gesetzgeber sollte von Anwendungsfällen mit hoher Akzeptanz, insbesondere solcher mit hohem Pfand, Erkenntnisse übertragen (strukturelle Ausgestaltung, Preisfindung etc.), zum Beispiel von Mietkautionen, die von Mieterinnen und Mietern eingezahlt werden und während der Miete nicht zur Verfügung stehen. Ein Beispiel aus dem Automobilsektor ist das CoremanNet für das Management von Fahrzeugaltteilen.¹⁷⁰ Auch wenn eine europäische Lösung anzustreben ist, kann im Fall einer Verzögerung als Übergangslösung eine nationalstaatliche Lösung sinnvoll sein. Dies ist nach Einschätzung von Expertinnen und Experten rechtlich möglich¹⁷¹ und müsste geprüft werden.

Wie andere politische Interventionen sollte ein solches Pfandsystem selbstverständlich regelmäßig auf seinen Erfolg und seine Folgen geprüft werden und anhand neuer Erfahrungen (beispielsweise in puncto Rückführungserfolg der Batterien, Kosten und Nutzen) überarbeitet werden.

In Summe empfiehlt die Arbeitsgruppe Traktionsbatterien daher die Prüfung eines Pfands und anderer finanzieller Anreizsysteme für Traktionsbatterien sowie möglicher Alternativen zur Sicherstellung maximaler Rücklaufquoten.

170 | Vgl. CoreManNET.

171 | Vgl. Hoyer 2015.

- Die Anwendung weitergehender ökonomischer Anreizsysteme und angemessener Sanktionierungsverfahren für die (Über-)Erreichung beziehungsweise bei Verfehlung von Recyclingzielen (Bonus/Malus) ist zu erwägen. Diese umfassen beispielsweise weitergehende steuerrechtliche Entlastungstatbestände, Lastenausgleichsverfahren und Verhängung von Strafgeldern bei Nichterfüllung.

Diese Punkte sind auf EU-Ebene zu gestalten und durch den nationalen Gesetzgeber zu unterstützen und national umzusetzen.

- Die systemischen Potenziale von Traktionsbatterien im Zuge der Energiewende sind unter Berücksichtigung der Möglichkeiten von digitalen Technologien weiter zu untersuchen und ihre Verwirklichung ist anzustreben. Zentrale Punkte umfassen:
 - **Nutzung von Simulationen und Big-Data-Analysen zur Verbesserung der Entscheidungsfindung**, beispielsweise zu Vorhersagen von Batteriemengen für Second-Life-Anwendungen für stationäre Stromspeicher, Bestimmung bestehender und möglicher Rezyklatanteile in Traktionsbatterien und Ermittlung der Zirkularität des Gesamtsystems
 - **Integration von Circular-Economy-Maßnahmen in relevante politische Strategien** – insbesondere in nationale und europäische Mobilitäts-, Energie- und Wasserstoffstrategien
 - **Abschätzung, Weiterentwicklung und Beauftragung** von möglichen umsetzungsnahen Lösungen von Second-Life-Anwendungen und Vehicle-to-X

Diese Punkte sind sowohl auf Ebene der EU als auch durch den nationalen Gesetzgeber zu gestalten.

- Langfristig ist der **Transfer der genannten Maßnahmen in den globalen Kontext** zu erwirken, insbesondere durch:
 - Harmonisierung mit der Regulatorik und Vernetzung mit Regierungen und relevanten anderen Akteuren aus **Drittstaaten** jenseits der Europäischen Union und des europäischen Wirtschaftsraums (European Economic Area, EEA), um global das Ambitionslevel zu heben und ein globales Gleichgewicht, ein Level Playing Field, anzustreben

- Wissenstransfer und Kooperation im Rahmen von **internationaler Kooperation und Entwicklungszusammenarbeit**, um Circular Economy auch in weniger weit entwickelten Ökonomien zu fördern und die dortige Arbeitssicherheit und umweltsichere Handhabung von Batterien im Fall von Leakage und sukzessive entstehender Märkte für batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) sicherzustellen

Diese Punkte sind sowohl auf Ebene der EU als auch durch den nationalen Gesetzgeber zu gestalten.

5.2 Handlungsempfehlungen für die Wirtschaft

- Durch die kollaborative Initiierung **gemeinsamer (Mindest-) Standards** und eines systemischen **Designs for Circularity** kann die Industrie synergetische Potenziale auf verschiedenen Wirkungsebenen ausschöpfen. Sowohl einzelne Akteure (Fahrzeughersteller, Maschinenbauer, Verwerter etc.) als auch Industrieverbände und Standardisierungsvereinigungen können hier tätig werden, insbesondere
 - auf Produktebene: Dies umfasst die Modularisierung der Traktionsbatterie, ein zirkuläres Design der Batteriegehäuse sowie eine batterieentnahmefreundliche Konstruktion der Fahrzeuge. Die Vielfalt von Batterietypen, -steuerungen und -anwendungen sollte dabei berücksichtigt und gegebenenfalls ebenfalls harmonisiert werden.
 - auf Unternehmensebene: verstärkte Verwendung der generierten Daten auch in Programmen zur Unternehmensführung und -verwaltung, zum Beispiel Batteriedaten und deren kostenmäßige Bewertung in der Bestandsführung des Unternehmens, Laufzeit- und Fehlerkontrolle (Defect Tracking) im Rahmen des Customer-Relationship-Managements, Probleme und Ausfalldaten zur Verbesserung des Serviceangebots und grundsätzlich als Grundlage der Produktverbesserungen im Rahmen von Big-Data-Analysen.
 - auf Prozessebene: Dies kann durch die Modularisierung einzelner Prozessschritte innerhalb von Prozessketten beziehungsweise Recyclingsystemen komplementiert werden, um technische Neuerungen in der Materialzusammensetzung der Batterie sowie Innovationen



in Anlagenbau und Wertschöpfungssystemen entsprechend flexibel integrieren zu können. Der Mehrwert von existierenden Industrie-4.0-Anstrengungen (siehe beispielsweise die „Verwaltungsschale“¹⁷²) hierzu sollte weiter erkundet werden.

- auf Systemebene: Einbettung der Produkte und Prozesse in produktive Prozessketten und über die Wertschöpfungskette hinweg, zum Beispiel durch Entwicklung neuer plattformbasierter Geschäftsmodelle.

Ziel sollte **erstens die Lebenszeitverlängerung** in der Erstanwendung sein, zweitens – wo sinnvoll – die effiziente Weiterentwicklung in mehrwertstiftender Zweitanwendung, drittens ein hochwertiges Recycling und viertens die Innovationsförderung in Richtung Automatisierung.

- Es bedarf **industrieweiter Vereinbarungen**, die spezifizieren, **durch welche betrieblichen und volkswirtschaftlichen Indikatoren Zirkularität gemessen** werden kann und wie diese Indikatoren sich zueinander verhalten. Insbesondere über Industriekooperationen und einschlägige Fachgremien sind Einigungen hierüber zu treffen:
 - **Unterscheidung zwischen ökonomischen** (zum Beispiel ROI auf Service-Geschäftsmodelle), **ökologischen** (zum Beispiel Rückgewinnungsraten) und **sozialen** (zum Beispiel geschaffene Arbeitsplätze) **Metriken**, und **Berücksichtigung möglicher Interaktionen**
 - Die **Bereitstellung der hierfür notwendigen Daten** kann dabei sowohl dem externen Reporting als auch dem internen Monitoring im Sinne einer innerbetrieblichen Entscheidungsfindung (zum Beispiel im Rahmen eines Forecastings von Rücklaufmengen) zugutekommen.
 - Auf diesem Gebiet kommt der **Entwicklung digitaler Material- und Produktpässe** eine zentrale Rolle zu, die statische (Materialfußabdruck, Seriennummern, Fertigungsinformationen etc.) und dynamische (jeweilige Besitzerinnen und Besitzer, Wartungsmaßnahmen, Zustand (State of Health, SoH) etc.) Daten effizient, sicher und anwenderbezogen über die Lebenszeit der Batterien und über die enthaltenen Materialien bereitstellen können. Die spezifischen Daten gilt es unter anderem in Abstimmung mit regulatorischen Anforderungen zu definieren.

- **Die Entwicklung und Umsetzung von Grundlagenwissen, (Aus-)Bildung und (technischen) Schulungen**, die die Skalierung von Circular Economy ermöglichen, ist in Kooperation mit Politik und Wissenschaft anzugehen. Hierzu gehören:

- technische Schulungen, insbesondere um Arbeitsschutz und -sicherheit bei der Handhabung von End-of-Life(EoL)-Batterien und die Verfügbarkeit von geschultem Personal sicherstellen
- Weiterentwicklung und Öffnung von Ausbildungsberufen (zum Beispiel Produktionstechnologe) für die Circular Economy
- die Bildung der Bevölkerung und des Fachpersonals zu Grundprinzipien der Circular Economy (etwa zu den Themen Ressourcenschonung und Klimaschutz sowie volks- und betriebswirtschaftliche Qualifikationen).

- Wirtschaftliche Akteure sollten entsprechend regulatorische Anforderungen und darüber hinaus **relevante Informationen und Daten bereitstellen und einen kollaborativen Austausch fördern**, der Ressourcenproduktivität steigernde Geschäftsmodelle unterstützt.

- Dies erfordert eine Positive-Sum-Game-Einstellung und die Identifikation von geteilten Interessen, um die Offenlegung nutzbarer Informationen und transparenten Informationsaustausch zu incentivieren.

- Der Wirtschaft obliegt die **Weiter- und Neuentwicklung und Skalierung von Technologien und Geschäftsmodellen**, die über das End-of-Life(EoL)-Management der Altbatterien hinausgehen und den Mehrwert (Kosten und Nutzen) nicht nur einer konsequenten Kreislaufführung, sondern auch der systemischen Produktivität grundlegend steigern.

- Neuartige Geschäftsmodelle wie das Leasing oder Sharing setzen dabei jedoch zum Teil neue Eigentumsverhältnisse an der Batterie voraus, die es im Dialog mit allen beteiligten Akteuren transparent auszuhandeln gilt und deren Effekte auf zum Beispiel Wertzuteilung und Haftung zu klären sind.
- Durch die Aushandlung konkreter Anforderungen und Richtlinien beziehungsweise Umgangsformen für langfristige Kooperationen zwischen den Akteuren sollte allen notwendigen Akteuren der Anreiz hierzu generiert werden.

172 | Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2017.

- Verstärkung von **Investitionen in Entwicklung, Kommerzialisierung und Skalierung** notwendiger Technologien und Infrastruktur für die Circular Economy entlang aller Hebel:

- **Produktivitätssteigerung und Ökosystem:** Ausbau von Ladeinfrastruktur und Mobilitätssystemen zur Ermöglichung von Vehicle-to-X (V2X) und Car- und Ridesharing für maximal produktive Nutzung der Traktionsbatterien während ihres ersten Lebens
- **Rücklauf und Demontage:** flächendeckende Anwendung digitaler Technologien zur Verortung von Traktionsbatterien zu Entscheidungspunkten (Eigentümerwechsel), insbesondere zum End-of-Life (EoL), und Expansion notwendiger Demontage- und Logistikkapazitäten
- **Second Life:** Etablierung von Technologien und Kapazitäten insbesondere für die Analyse des verbleibenden Restwerts, die Wiederaufbereitung und die Rezertifizierung vor einem erneuten Inverkehrbringen
- **Recycling:** Weiterentwicklung von Recyclingtechnologien mit dem Ziel optimaler Rückgewinnungsraten über die gesamte Prozesskette in hoher Qualität bei optimierten Umweltauswirkungen und Kosten; Skalierung der Kapazitäten in Deutschland und EU-weit
- Die **Beteiligung öffentlicher Finanzierungsmöglichkeiten, internationaler Kapitalmärkte und Querfinanzierung** durch Anreizsysteme (zum Beispiel Pfandsysteme) sollte in diesem Zusammenhang ausgenutzt und **unter Berücksichtigung anerkannter Standards** (insbesondere der EU-Taxonomie für nachhaltige Investitionen¹⁷³) und weiterer Circular-Economy-spezifischer Empfehlungen¹⁷⁴ ausgeführt werden.

- Wirtschaftliche Akteure – insbesondere Fahrzeughersteller – sollten überprüfen, ob und wie sie dazu übergehen können, unter **Berücksichtigung systemischer Ressourcen- und Energieeffizienz (Entropiezuwachs/verbleibende Exergie)** über den gesamten Wertschöpfungsprozess hinweg zu planen und Geschäftsentscheidungen zu treffen.

- Dies sollte **basierend auf wissenschaftlich fundierten Praktiken** realisiert werden und in Abstimmung mit der öffentlichen Hand auf die Erfüllung von Circular-Economy-Anforderungen abzielen (vergleiche Kapitel 5.3 Handlungsempfehlungen an die Wissenschaft).

5.3 Handlungsempfehlungen für die Wissenschaft

- Durch eine **ganzheitliche Betrachtung wirtschaftlicher und ökologischer Zielgrößen** sowie **Messmethoden** sollte die Wissenschaft eine ausgewogene Entscheidungsbasis zur Bewertung möglicher Austauschbeziehungen (Trade-offs) herstellen und Optionen für deren Lösung aufzeigen.

- Dies umfasst zum einen die **Mitentwicklung und Validierung betrieblicher/volkswirtschaftlicher Zirkularitätsindikatoren** in enger Abstimmung mit Politik und Wirtschaft.

- Die Grundlage hierfür bildet der **wissenschaftlich fundierte Beitrag zu allgemein akzeptierten Messgrößen** etwa zur Bestimmung der Zirkularität, des CO₂-Fußabdrucks sowie der Material- und Energieeffizienz und weiterer zentraler Betrachtungsgrößen wie der systemischen Energieeffizienz und der Entropie beziehungsweise Exergie sowie der Differenzierung zwischen Zirkularität einschließlich Produktionsabfällen beziehungsweise ausschließlich bezogen auf Produkte nach einer Nutzung (post-consumer waste).

- Durch **proaktive Kommunikation in Politik, Wirtschaft und Zivilgesellschaft hinein** und die **Bereitstellung von ohne technisches Fachwissen anwendbaren Methoden und Tools** für die Bewertung etwa der systemischen Enthalpie und Entropie (Exergie), des Energiebedarfs, von Emissionen, Stoffströmen und Ressourcennutzung sowie für die Bewertung des Erfolgs von Circular-Economy-Geschäftsmodellen hilft die wissenschaftliche Gemeinschaft, Wissenstransfer zu gewährleisten und fachliche Entscheidungsfindung zu unterstützen.

- Durch **verstärkte transdisziplinäre Grundlagenforschung** sollte die Wissenschaft die Weiterentwicklung von Circular-Economy-bezogener Technologie und Circular-Economy-bezogenem Wissen sowie deren Integration in innovative Wertschöpfungskettensysteme vorantreiben und dies unter Berücksichtigung von ökonomischen und ökologischen Effekten möglicher Maßnahmen.

- Durch **Einrichtung von Professuren/ Lehrstühlen** sollte die Circular Economy auch institutionell in den Hochschulen und Universitäten verankert werden

173 | Vgl. Technical Expert Group on Sustainable Finance 2020.

174 | Vgl. European Investment Bank 2020.



- Die **Forschungsinfrastruktur** sollte von der Wissenschaft im Dialog mit der Politik gezielt so weiterentwickelt werden, dass eine transdisziplinäre Forschung entlang des Kreislaufes möglich wird.
- Durch Integration der Circular Economy in technische, naturwissenschaftliche und wirtschaftliche Studiengänge sollte der Aufbau von fundiertem **Grundlagen- und Anwendungswissen der zukünftigen Akteure in Wirtschaft, Politik und Wissenschaft unterstützt werden**.
 - Einbau von **Vorlesungen zur Circular Economy** in den relevanten Studiengängen der Hochschulen und Universitäten
 - Einrichtung von Circular-Economy-bezogenen **Masterstudiengängen und Studiengangvertiefungen**
 - Entwicklung von **Fortbildungsangeboten** für die Wirtschaft
 - Schaffung von **Lernfabriken** für die Circular Economy, die als realistische Umgebungen für die berufliche Weiterbildung, Lehre und Forschung eingebunden werden können
- Die Wissenschaft kann durch **anwendungsnahe Forschung und Entwicklung** sowie die Bereitstellung entsprechender Aus- und Fortbildung die erfolgreiche Implementierung einer Circular Economy auf verschiedenen Ebenen unterstützen.
 - Insbesondere die **(Weiter-)Entwicklung technischer, interdisziplinärer Lösungen** für die Optimierung der gesamtsystemischen Effekte (Wertschöpfungskettendarstellung, Cradle-to-Cradle-Bewertung von Effekten der Circular Economy etc.) unter Berücksichtigung ökonomischer und ökologischer Effekte sollte durch die Wissenschaft vorangetrieben werden.
 - Für die Nutzungsphase sind Technologien und Methoden zu entwickeln, die ein **Management der Batterien für eine lange Lebensdauer und geringe Alterung** erlauben und eine sichere Entscheidung über eine zweite Nutzungsphase ermöglichen.
 - Auf Ebene der Traktionsbatterie umfasst dies zudem die **demontagerechte Auslegung von Batteriesystemen** und deren Integration ins Fahrzeug, die **Einführung neuer Batterie- und Fertigungstechnologien sowie die Optimierung der Materialzusammensetzungen**, insbesondere auch im Hinblick auf Materialreinheiten, die Beteiligung an der (Weiter-)Entwicklung von Designs for Circularity sowie die Entwicklung von Modellen und Testmethoden zur (genaueren) Vorhersage der Lebensdauer.
- Auf Prozessebene wird dies durch die **Entwicklung von Datenplattformen und -standards**, insbesondere auch für die Speicherung der Daten während der Nutzungsphase, die Entwicklung automatisierter **Demontage-systeme**, die Bereitstellung von **Tests hinsichtlich der Second-Life-Eignung von Batterien**, die Entwicklung sicherer **Entladetechnologien**, die Optimierung bestehender und die Entwicklung neuer **Recyclingverfahren** sowie die Entwicklung robuster Materialsyntheseprozesse für die Sekundärrohstoffe komplementiert. Wichtig ist in allen Fällen die **Berücksichtigung der Integration von Effekten auf System- und Prozessketten**. Zudem sind Methoden zu entwickeln, mit denen die Prozesse sicher in den **industriellen Maßstab hochskaliert** werden können.
- Auf Materialebene umfasst dies die **Weiterentwicklung von Aktiv- und Passivmaterialien** in einer Weise, dass diese **kostengünstig aus Sekundärrohstoffen hergestellt** werden können und dass die Materialien von sich aus zu geringen Umweltbelastungen bei deren Herstellung und Kreislaufführung führen.
- Durch ihre neutrale Mittlerfunktion kommt der Wissenschaft insbesondere bei der **Entwicklung von Circular-Economy-relevanten Modellierungen, Simulationen und Tools** eine zentrale Rolle zu.
 - Insbesondere beinhaltet dies die **Bereitstellung von praktisch anwendbaren Modellen und Prognosetools** zur Abschätzung der physischen Stoffflüsse (dynamisch und für definierte Systemgrenzen) und ihrer thermodynamischen Bewertung (Exergie/Entropie), der Lebenserwartung von Batterien sowie der Bedarfsentwicklung und Entscheidungsoptimierung im Bereich Second Life und Vehicle-to-X (V2X) – nicht zuletzt zur Integration der Wertschöpfungskette zur Bereitstellung elektrischer Energie und Mobilität (Sektorkollaboration).
 - **Digitale Zwillinge** sind auf Basis validierter Modelle aufzubauen und eine zugehörige, möglichst webbasierte **Simulationsplattform** zu entwickeln, gegebenenfalls gemeinsam mit der Industrie, die validierte und robuste Vorhersagen der Materialkreisläufe und damit verbundenen Umweltwirkungen und Kosten erlaubt.

- Für die **robuste und valide Messung beispielsweise der Recycling- und Energieeffizienz** sind neue Methoden zu entwickeln und zu validieren. Diese Methoden sind mit den Modellen und Simulationen so zu verknüpfen, dass diese verlässlich kalibriert werden können.
- Auf dieser Basis sind dann gesamtsystemische markt-orientierte Lösungsansätze zu entwerfen und deren stufenweise Umsetzung zu konzipieren und letztlich zu begleiten.
- Die Weiterentwicklung der Batterietechnologie zu **Festkörperbatterien** und anderen **neuen Batteriegenerationen** (zum Beispiel Lithium-Schwefel-Batterien) ist von der Wissenschaft frühzeitig in Richtung einer Circular Economy zu entwickeln und zu bewerten. Hierzu gehört einerseits die Fähigkeit, die Stoffe mit hohen Recyclingquoten und Materialreinheiten sowie ohne Qualitätsverlust im Kreislauf zu führen sowie andererseits die Entwicklung von ökonomisch und ökologisch zukunftsweisenden Prozessen.

6 Roadmap und Ausblick

Die im vorangehenden Kapitel ausführlich beschriebenen Handlungsempfehlungen an Politik, Wirtschaft und Wissenschaft wurden von den Mitgliedern der Arbeitsgruppe Traktionsbatterien priorisiert und zeitlich hin zur Erreichung des skizzierten Zielbildes einer Circular Economy für Traktionsbatterien auf der folgenden Roadmap verordnet.

Kurzfristig – bis 2024 – gilt es, die Grundlagen zu legen, um vor dem Hintergrund fundierten Wissens, entsprechender Modelle und Kennzahlensysteme relevante Entscheidungen zu treffen, durch klare Definitionen von zentralen Begriffen und die Bestimmung von Rechten und Pflichten ein Level Playing Field zu schaffen, Investitionen vorzubereiten und die Entwicklung der nächsten Generation von Traktionsbatterien und ihrer Ökosysteme Circular Economy-kompatibel auszurichten. Die Bildung und Ausbildung der nächsten Generation von Fachkräften und Entscheidern muss jetzt initiiert werden. Bereits jetzt, eine Batterie-lebenszeit vor den späteren EoL-Maßnahmen, müssen die Systeme und Geschäftsmodelle für die ressourcenproduktive Herstellung und Nutzung von Traktionsbatterien (zum Beispiel Ridesharing) geschaffen werden.

Mittelfristig müssen **weitere Strukturen** gebildet werden, die, dem rasch expandierenden Markt von EoL-Traktionsbatterien

entsprechend, robust für die kommerzielle, EU-weite Skalierung sind und steuerungsrelevante Transparenz schaffen. Die Skalierung technischer, insbesondere digitaler Möglichkeiten für die Circular Economy ist spätestens jetzt nötig (etwa im Hinblick auf digitale Produktpässe, digitale Zwillinge, Machine Learning etc.). Hierzu sind auch signifikante Investitionen zu tätigen. Auch die Anpassung gedanklicher und geschäftlicher Strukturen für die Circular Economy gilt es zu erwirken, fußend auf der Schaffung von Modellen, Tools und neuen Geschäftsmodellen, insbesondere auf Basis der Anfang 2020er entwickelten Circular-Economy-(Aus-)Bildung.

Bis 2030 kann hierauf aufbauend der **Durchbruch** zur Circular Economy geschehen: Da spätestens jetzt Traktionsbatterien in großer Stückzahl das EoL erreichen, bedarf es robuster, skalierter und effizienter Circular-Economy-Systeme von der Einnahme über die Demontage bis hin zu einem effizienten Recycling.¹⁷⁵ Auch Maßnahmen rund um die Mehrfachnutzung von Fahrzeugbatterien in ihrem ersten Leben im Fahrzeug – smarte Netzintegration, Sektorkopplung, V2X – müssen spätestens jetzt greifen, um die kosteneffiziente Generierung der notwendigen (Lade-)Infrastruktur zu gewährleisten. Sind auch die systemischen Potenziale der Circular Economy für Traktionsbatterien in Regulatorik, Wirtschaft und Wissenschaft berücksichtigt, sind wichtige Schritte hin zur Circular Economy in Deutschland getan.

Pilotprojekte

2021–2024: Kurzfristig „Grundlagen legen“

Politik



1. Festlegung klarer und verbindlicher **Definitionen** und **Standards**: zum Beispiel CO₂, Menschenrechte etc. unter Wahrung von Datenschutz und -sicherheit
2. Klarstellung von **Rechten und Pflichten** aller Akteure, zum Beispiel in den Bereichen Arbeitsschutz und -sicherheit, End-of-Waste-Pflichten, Reporting, und Start von **Anreizsystemen** (zum Beispiel Pfandsysteme)
3. Schaffung eines **zentralen institutionellen Trägers** zur Sicherstellung der Transformation
4. Sicherstellung von **Bildung und Ausbildung**

Wirtschaft



5. Kollaborative Initiierung gemeinsamer (**Mindest-**)Standards für Prozessketten- und Systemdesign im Sinne des systemischen Designs for Circularity
6. Etablierung industrieweiter Vereinbarungen, unter anderem zu Indikatoren für die **Messung von Zirkularität** (ökonomisch, ökologisch, sozial sowie deren Interaktionen) und sicherheitsrelevante Aspekte
7. Sicherstellung der **Ausbildung** von Fachkräften für EoL-Management von Traktionsbatterien

Wissenschaft



8. Wissenschaftlich fundierter Beitrag zur Etablierung allgemein akzeptierter **Kennzahlen, Messgrößen und -methoden**
9. Technische und transdisziplinäre **Grundlagenforschung**, insbesondere für die Unterstützung der Optimierung der gesamtsystemischen Effekte
10. Bereitstellung **akademischer Ausbildung** für Circular Economy



Abbildung 27: Roadmap zur Erreichung des Zielbilds (Quelle: eigene Darstellung)



6.1 Nächste Schritte

Offene Fragen verbleiben, bei deren Klärung weitere Kooperation notwendig ist. Auch der Zivilgesellschaft kommen hierbei teils zentrale Rollen zu. Insbesondere traten in diesem Zusammenhang hervor:

1. Lebenszeit von Traktionsbatterien verlängern
 - a. Welche Daten sind zum Lebenszyklus der Batteriesysteme unter dem Gesichtspunkt von Datenschutz und Geheimhaltungsmaximen zwingend notwendig?
 - b. Welche kommerziellen Potenziale bestehen für den automatisierten Batterieaustausch (Battery Swapping) und welchen Effekt könnte dies auf die Lebenszeit der Traktionsbatterien haben?
2. Kreisläufe schließen
 - a. Wie sind Anreiz- und Sanktionsmechanismen konkret auszugestalten, um die optimale Rückführung und hochwertige Verwertung von Traktionsbatterien zu gewährleisten?
 - b. Wie kann eine thermodynamisch fundierte Optimierung breitflächig Eingang in unternehmerisches Handeln finden?
 - c. Welches Potenzial haben Materialsubstitute (zum Beispiel Batteriegehäuse aus Polymeren statt Stahl oder nicht toxische Batteriematerialien) und welche Effekte könnten sie auf die Zirkularität der Batterien haben?
 - d. Wie kann der deutsche Gesetzgeber über seine nationalstaatlichen Grenzen hinaus Circular Economy für Traktionsbatterien und die nötigen globalen Wertschöpfungsnetze gestalten?

3. Systemische Produktivität maximieren

- a. Wie kann das Potenzial von Traktionsbatterien für die Optimierung der Elektrizitätsnetze genutzt werden (Sektorkopplung, Vehicle-to-X – V2X)?
- b. Welche (aktive oder kontrollierende) Rolle können die Konsumierenden spielen?
- c. Wie kann der negative Einfluss von geopolitischen Spannungen auf nachhaltige Entwicklung reduziert werden?
- d. Wie interagieren Vehicle-to-X(V2X)- und andere Mehrfachnutzungskonzepte wie Car- und Ridesharing – beispielsweise in Bezug auf Batteriealterung, Nutzerkomfort und Standzeiten?

Ohne die Etablierung eines zirkulären Modells werden die Batterie und somit die Elektromobilität die hohen Erwartungen der Gesellschaft nicht erfüllen können. Es besteht die Gefahr, dass Vorbehalte artikuliert werden – mit schädlichen Folgen für die Mobilitäts- und Energiewende. Die Einführung der Zirkularität hingegen verstärkt die wirtschaftlichen und ökologischen Vorteile. Es geht um den schnellen Aufbau eines über den Lebenszyklus integrierten Produkt-Dienstleistungssystems, nicht zuletzt auch als Vorbild für andere Systeme. Mit diesem Bericht hoffen die Mitglieder der Arbeitsgruppe Traktionsbatterien der *Circular Economy Initiative Deutschland* einen Beitrag zur Transformation hin zu einer Circular Economy für Traktionsbatterien geleistet zu haben. Vielfach steht diese, wie der Sektor insgesamt, noch am Anfang und wird infolgedessen eines weiteren kollaborativen Austauschs bedürfen. Nun wäre es Aufgabe aller beteiligten Akteure in Politik, Wirtschaft und Wissenschaft, entschlossen an die Umsetzung der hier aufgezeigten Handlungsempfehlungen zu gehen.

7 Anhang

A Glossar

Die folgenden Begriffe sind thematisch sortiert:

Begriff	Definition	Kommentar
Circular Economy	Die Circular Economy zielt darauf ab, durch die Einnahme einer Systemperspektive – etwa unter Einsatz von digitalen Technologien, einer Produktumgestaltung und der Rekonfiguration von Wertschöpfungsketten – den maximalen Werterhalt von eingesetzten Rohstoffen zu gewährleisten. Sie betont damit die Bedeutung höherer Ressourcenproduktivität und letztlich der Entkopplung von Wertschaffung. Somit folgt sie konsequent der Abfallhierarchie, in der die Vermeidung von Abfällen an erster, die Verbrennung und Deponie hingegen an letzter Stelle stehen. Hierdurch sollen nicht zuletzt negative Umwelteffekte (zum Beispiel CO ₂ -Emissionen und Ökotoxizität) vermieden werden. Zu betonen ist insbesondere die Abgrenzung von dem in Deutschland genutzten Konzept der „Kreislaufwirtschaft“, welches bis dato vielmehr eine recyclingorientierte Abfallwirtschaft ist. ¹⁷⁶ Circular Economy für Traktionsbatterien wird in Kapitel 1 im Gesamtbericht definiert.	Vergleiche Vorstudie der CEID ¹⁷⁷
Traktionsbatterien	Batterien, die batterieelektrische Fahrzeuge antreiben	
(Ressourcen-) Entkopplung	Entkopplung von Wirtschaftsleistung und Wohlbefinden von Ressourcennutzung und Externalitäten. Es wird zwischen relativer und absoluter Entkopplung unterschieden. Eine relative Entkopplung findet statt, wenn das Wirtschaftswachstum stärker zunimmt als die damit verbundenen Umwelt- und Sozialfolgen. Eine absolute Entkopplung tritt erst auf, wenn Ressourcennutzung und Externalitäten bei anhaltendem Wirtschaftswachstum abnehmen.	Vergleiche International Resource Panel ¹⁷⁸
Kritische Rohstoffe	Gemäß der Definition der EU-Kommission: große wirtschaftliche Bedeutung bei gleichzeitigem hohem Versorgungsrisiko für die EU, siehe https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_en	Auch wenn nicht als kritisch eingestuft, so können Rohstoffe für Traktionsbatterien doch von großer Wichtigkeit sein, zum Beispiel Nickel.
Wichtige Batteriematerialien, -stoffe und -komponenten	Für Lithium-Ionen-Batterien zentrale Metalle, andere Stoffe und Materialien, für die eine physische Kreislauflösung aufgrund ihres Fußabdrucks (CO ₂ , Wasserverbrauch, andere Umweltfaktoren, Menschenrechtsprobleme), ihrer Kritikalität (gemäß EU-Definition: große wirtschaftliche Bedeutung und hohes Versorgungsrisiko) und/oder ihres relativ hohen Nachfrageanteils für Batterien besonders wichtig ist. Zu unterscheiden ist zwischen den besonders wichtigen elementaren Metallen/Stoffen Lithium, Kobalt, Nickel, Kupfer und Grafit, funktionalen Materialien (Engineered Materials) wie Kathodenmaterial und Komponenten wie Elektroden, Batteriegehäuse oder Batterie-Managementsystem.	
ACES	Autonomous, Connected, Electric, Shared Mobility: Überbegriff für die größten Makrotrends, die durch technologischen Fortschritt versprechen, die Automobilbranche grundlegend zu transformieren	
Carsharing	Wie Ridesharing, jedoch ohne Angebot eines Mobilitätsdienstes, sondern lediglich das Angebot eines Fahrzeugs für einzelne Nutzerinnen und Nutzer nach Bedarf. Hierdurch erhöht sich zwar die Kilometerleistung und verändert sich gegebenenfalls die Besitzstruktur, jedoch ist keine Produktivitätssteigerung der Nutzung (Personenkilometer pro Kilometer beziehungsweise Personenkilometer pro Kilowattstunde) zu erwarten.	Beispiele: Mietwagen, Sharing-Plattformen wie „car2go“

176 | Vgl. Sachverständigenrat für Umweltfragen 2020.

177 | Vgl. Weber/Stuchtey 2019.

178 | Vgl. International Resource Panel 2019.



Begriff	Definition	Kommentar
Material- beziehungsweise Produktpass (hier insbesondere: Batteriepass; englisch: Battery Passport)	Digitales Tool zur Speicherung und Bereitstellung von Informationen über die Herkunft, Haltbarkeit, Zusammensetzung, Wiederverwendung, Reparatur- und Demontagemöglichkeiten von Material (Materialpass) beziehungsweise eines Produkts (Produktpass) sowie Nutzungsdaten/SoH und die Verortung und die Handhabung am Ende der Lebensdauer	Vergleiche EU-Kommission Strategy for Data ¹⁷⁹
Ridesharing	Geteilte Nutzung von (Elektro-)PKW entweder von Privatfahrzeugen (Peer to Peer) oder im professionell betriebenen Flottenbetrieb für Mobilitätsdienste. Durch die signifikant höhere Auslastung (Personenkilometer pro Kilometer) steigt die Produktivität der eingesetzten Fahrzeuge und darin enthaltenen Batterien im Vergleich zu individuell besessenen Fahrzeugen. Zudem kann Ridesharing Innovationstreiber durch die dadurch schnellere Abnutzung im Dauerbetrieb sein. Hierdurch und infolge der klareren Besitzstrukturen kann dies die einfachere Umsetzung von Circular-Economy-Strategien (Design for Circularity, Langlebigkeit, Reparatur und hochwertiges Recycling) unterstützen.	Beispiele: Fahrgemeinschaften, Sammeltaxis, (autonome) Busse und Bahnen
Smarte Netzintegration (Vehicle-to-Grid V1G/V2G beziehungsweise Vehicle-to-X)	Gesteuertes „smartes“ Laden von Elektrofahrzeugen (V1G) und bidirektionaler Austausch von Elektrizität zwischen Fahrzeug und Netz (V2G) zwecks Lebenszeitoptimierung von Traktionsbatterien und systemischer Optimierung von Ladeinfrastruktur und -energieverfügbarkeit. Um weiterhin alle bidirektionalen Ladeoptionen darzustellen, wie etwa den direkten Austausch zwischen Fahrzeug und Heimspeichern ohne Kontakt mit dem Elektrizitätsnetz, wird alternativ und erweiternd zu V2G von Vehicle-to-X (V2X) gesprochen. Hierdurch können verschiedene Vorteile erwartet werden, einschließlich der zusätzlichen Umsatzgenerierung durch verschiedene Netzdienste (zum Beispiel Regelleistung, Frequenzregulierung etc.), höhere Produktauslastung (Mehrfachnutzung) und Kosteneinsparungen im Ausbau der Netzinfrastruktur. Anmerkung: Die empirische Evidenz zeigt, dass die befürchtete zusätzliche Abnutzung der Traktionsbatterie durch V2X in der Realität durch gezielte Steuerung nicht eintreten muss; tatsächlich kann V2X die Lebenszeit der Batterie unter Umständen verlängern beziehungsweise sogar erhöhen. ¹⁸⁰	Nicht im Fokus der Arbeitsgruppe, jedoch wichtige Voraussetzung für Marktskalierung. Siehe GBA „Vision for a sustainable battery value chain by 2030“ und IRENA „Innovation Outlook: Smart Charging“ ^{181, 182}
Zweitnutzung (englisch: Repurposing/ Second Life (SL))	Weiternutzung von Traktionsbatterien oder deren Komponenten in neuem Anwendungskontext, meist in weniger anspruchsvollen Anwendungen nach Ende der ersten „Lebenszeit“, zum Beispiel in Rollern oder Lastenfahrzeugen – insbesondere aber in stationären Anwendungen. Gegebenenfalls nach Ertüchtigung als ganze Batterie oder in einzelnen Modulen. Weiter- beziehungsweise Wiedernutzung in der gleichen Anwendung (PKW) wird unter „Reparatur beziehungsweise Ertüchtigung“ berücksichtigt	Gemäß EU-Definition https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/1996-Sustainability-requirements-for-batteries
Aufbereitung	Teilweise als Synonym für Recycling verwendet, beschreibt im engeren Sinne aber nur die mechanisch-physikalischen Schritte des Recyclings (Zerkleinerung/Aufschluss und Sortierung/Separation) auf Basis von physikalischen Eigenschaften. Output sind in der Regel verschiedene Fraktionen/Konzentrate, in denen Stoffe angereichert sind, die aber meist weitere (metallurgische) Reinigungsschritte benötigen, um als hochwertiger Sekundärrohstoff einsetzbar zu sein (siehe Abbildung 26).	

179 | Vgl. Europäische Kommission 2020.

180 | Vgl. Thompson 2018.

181 | Vgl. World Economic Forum 2019.

182 | Vgl. IRENA 2019.

Begriff	Definition	Kommentar
Closed Loop/ Open-Loop-Recycling	Closed-Loop-Recycling bedeutet die Wiederverwendung von Rezyklaten in der gleichen Anwendung, aus der die Inputmaterialien stammen – zum Beispiel aus Batteriematerialien oder -metallen werden wieder Batterien gefertigt. Beim Open-Loop-Recycling hingegen werden die Rezyklate auch in anderen Anwendungen verwendet – zum Beispiel: aus Batterien recyceltes Nickel in Stahllegierungen.	Das Open-Loop-Recycling ermöglicht ein größeres Anwendungsspektrum der Rezyklate, was einen größeren Markt und damit gegebenenfalls eine höhere Nachfrage mit sich bringt – aber auch das Risiko für höhere Qualitätsverluste im Recycling. Ein Closed Loop im Sinne hundertprozentiger permanenter Kreislaufführung aller Materialien ist physikalisch nicht möglich und eine Annäherung daran thermodynamisch zunehmend sub-optimal. Diese Idealvorstellung ist daher nicht erstrebenswert.
Design for Circularity	Übergreifende Berücksichtigung von Design for Disassembly, Remanufacturing and Recycling bei der Produktgestaltung	
Ertüchtigung/ Instandsetzung/ (englisch: Refurbishment)	Lebenszeitverlängerung von Traktionsbatterien bei reduzierter Leistung (verbleibende Kapazität, spezifischer Widerstand etc.) – zum Beispiel durch den Austausch von Steuerungselementen oder einzelner Module oder durch eine digitale Ertüchtigung (Upgrades). Angestrebt wird dabei die Herstellung eines befriedigenden, an neue Fahrzeuganwendung angepassten Betriebszustands der gebrauchten Traktionsbatterie. Danach Einsatz erneut als Traktionsbatterie oder in Zweitnutzung wie im Fall der Second-Life-Anwendung	Zum Teil wird auch der synonyme Begriff „Aufarbeitung“ verwendet – zu unterscheiden von Wiederaufbereitung = Remanufacturing sowie von Reparatur (siehe Glossar).
(Extraktive) Metallurgie	Schmelzmetallurgische (pyro-/thermische) und/oder nasschemische (= hydrometallurgische) Verfahren zum Aufschluss und zur Separation von Erzkonzentraten, Materialverbänden oder Stoffgemischen. Als Output werden zum Beispiel Feinmetalle erzielt.	
Recycling	End-of-Life-Prozess zur stofflichen Wiedernutzung von Komponenten, Batteriematerialien und/oder Stoffen durch eine Kombination aus manuellen (Demontage), mechanischen, thermischen und/oder metallurgisch-chemischen (pyro- und/oder hydrometallurgischen) Prozessen. Hier definiert als der Gesamtprozess, von der Deaktivierung der Batterie(-komponenten) bis zur abgeschlossenen Gewinnung von verkaufsfertigen Rohstoffen (Rezyklate) für die Herstellung neuer Batteriematerialien, in einer dem Primärmaterial vergleichbaren Qualität, das heißt nutzbar für ähnliche Anwendungen. Eine rein thermische Verwertung ohne Rückgewinnung wieder einsetzbarer hochwertiger Rohstoffe wird wegen der fehlenden physischen Kreislaufschließung nicht als Recycling betrachtet. ¹⁸³	Aufgrund der hohen technischen Anforderung an Funktionsmaterialien (Engineered Materials) ist Recycling nach dieser Definition in der Regel nur für Metalle möglich, zum Beispiel Kobalt, Nickel, Kupfer oder Lithium. Die hochwertige Rückgewinnung von Polymeren oder gegebenenfalls auch Grafit erweist sich in der Regel als herausfordernd beziehungsweise unökonomisch.
Recyclingraten = Rückgewinnungsrate (RR) = Recyclingquoten	Auf den Gesamtprozess des Batterierecyclings bezogene Ausbeuten/Rückgewinnungsraten. Die RR beschreibt den Quotienten aus der Masse des physisch wieder einsetzbaren Rezyklats und der Masse des Inputs in den Recycling-Gesamtprozess. Zu erheben als das Mittel über ein Geschäftsjahr einer operativen Einheit (Recyclingstandort oder Geschäftseinheit). Neben der Festlegung von RR bezogen auf die Gesamtmasse der Batterie sind differenzierte RR für einzelne Metalle/Stoffe (zum Beispiel Kobalt, Lithium, Nickel) wichtig. Diese beziehen sich auf hundert Prozent des jeweils in der Batterie enthaltenen Metalls/Stoffes, und nur der zurückgewonnene, real wieder einsetzbare Output darf für die RR gezählt werden. Bei mehrstufigen Recyclingprozessen müssen die Verluste jeder einzelnen Stufe berücksichtigt werden, das heißt, die Gesamt-RR/Ausbeute ist das Produkt der Ausbeuten/Wirkungsgrade jedes einzelnen Schrittes.	An die Recyclingraten im Sinne der physischen Kreislaufwirtschaft sind höhere Anforderungen gestellt als an die derzeitige in der Abfallgesetzgebung festgesetzte RR. Letztere beziehen sich in der Regel nicht auf die wieder einsetzbaren Outputströme des Gesamtprozesses, sondern meist auf Inputströme in die finale Prozessstufe.



Begriff	Definition	Kommentar
Reparatur (englisch: Repair)	Lebenszeitverlängerung von Traktionsbatterien bei Defekt durch Austausch von Steuerungselementen oder einzelner defekter Batteriemodule beziehungsweise Zellen, oder durch digitale Ertüchtigung (Softwareupgrades). Angestrebt wird dabei die Wiederherstellung eines Betriebszustands der gebrauchten Traktionsbatterie wie vor dem Defekt.	Damit ist Reparatur auch ein Teil der Ertüchtigung, bei der die Weiternutzung ausschließlich als Traktionsbatterie stattfindet.
Responsible Recycling	Analog zum Responsible Sourcing: Produkte werden am Lebensende einem qualitativ hochwertigen Recycling zugeführt. Es besteht volle Transparenz über die EoL-Kette, von der Erfassung der Altgeräte über die verschiedenen Stufen der Recyclingkette bis zum Output des finalen Recyclingprozesses. Alle Prozesse entlang der Kette genügen definierten technischen, ökologischen, sozialen und ethischen Standards und können entsprechend auditiert und zertifiziert werden.	
Responsible Sourcing	Bereitstellung von (Batterie-)Rohstoffen unter Berücksichtigung international anerkannter Standards bezüglich der Wahrung der Menschenrechte und des Umweltschutzes. Nennenswerte Referenzen hierzu sind insbesondere die Richtlinien der OECD ¹⁸⁴ und der Vereinten Nationen, ¹⁸⁵ einschlägige Regulatorik zum Beispiel der Vereinten Staaten von Amerika und der Europäischen Union.	Auch global tätige Unternehmen und internationale Unternehmensnetzwerke sind in dem Bereich tätig, wie etwa die Global Battery Alliance. ¹⁸⁶
Rezyklat	Durch Recycling wiedergewonnener Sekundär-Rohstoff (insbesondere aufgereinigtes Aktivmaterial oder darin enthaltene Metalle und Stoffe, beispielsweise als metallische Salze oder in elementarer Form) in vergleichbarer Qualität zu Primärrohstoffen. Kann als Input für die Herstellung neuer Produkte verwendet werden.	Zu unterscheiden von Zwischenprodukten/Intermediates aus Recyclingprozessen, die noch weitere Recyclingprozesse benötigen, bevor sie für Neuprodukte einsetzbar sind (zum Beispiel Schwarzmasse)
Stoffreinheit/ Rezyklatreinheit	Reinheit der zurückgewonnenen Sekundärrohstoffe bezüglich Verunreinigungen durch andere Metalle etc.	Für die Herstellung von Batteriematerialien sollten die Sekundärrohstoffe eine möglichst hohe Reinheit aufweisen.
Verwertung	Im Sinne von wirtschaftlicher Nutzung; umfasst bei Batterien sowohl die Ertüchtigung für die Weiternutzung als auch das Recycling	Nicht zur Verwertung zählt bei Circular-Economy-Betrachtung die Deponie oder Verbrennung.
Weiternutzung, Weiterverwendung	In der Praxis verwendete, mehrdeutige Begrifflichkeit, die den Wiedereinsatz der Batterie (gegebenenfalls nach Ertüchtigung) in derselben Anwendung als Traktionsbatterie (Reparatur/Ertüchtigung) oder in neuer Anwendung (Zweitnutzung/Second Life) einschließt	
Wiederaufbereitung = Remanufacturing	Ertüchtigung in einen Zustand „wie neu“, verbunden mit der Garantie, dass die Traktionsbatterie beziehungsweise deren Komponenten im Vergleich zur ursprünglichen Leistungsfähigkeit gleich oder sogar besser abschneiden. Dabei ist zu berücksichtigen, wie dieser Zustand bei Batterien zu definieren ist (verbleibender State of Health, SoH).	Vergleiche „Reparatur“ und „Ertüchtigung“

184 | Vgl. Organisation for Economic Co-operation and Development 2016.

185 | Vgl. United Nations Human Rights 2011.

186 | Vgl. World Economic Forum 2019.

B Abkürzungsverzeichnis

ACES	Autonomous, Connected, Electric, Shared Mobility (autonome, vernetzte, elektrische, geteilte Mobilität)
BEV	Battery Electric Vehicle (batterieelektrisches Fahrzeug, in der Regel PKW)
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
CAN	Controller Area Network
CE	Circular Economy
CEID	<i>Circular Economy Initiative Deutschland</i>
CEPS	Center for European Policy Studies
EC	Europäische Kommission
EE	Erneuerbare Energien
EGD	European Green Deal
ELV	End of Life Vehicle (Altfahrzeug)
EoL	End-of-Life (Ende des (ersten) Produktlebens)
EoU	End-of-Use (Ende der (ersten) Nutzungsphase)
EPR	Extended Producer Responsibility (erweiterte Herstellerverantwortung)
EU	Europäische Union
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle (Brennstoffzellenfahrzeug, in der Regel PKW)
GBA	Global Battery Alliance
HEV	(Mild) Hybrid Electric Vehicle; Hybridfahrzeug (ohne Möglichkeit der externen Ladung)
IIOT	Industrial Internet of Things
IP	Intellectual Property
KEA	Kumulativer Energieaufwand
LCA	Life Cycle Assessment
LFP	Lithium-Eisen-Phosphat
LIB	Lithium-Ionen-Batterien
LMO	Lithium-Mangan-Oxid
MaaS	Mobility as a Service
Mio.	Millionen
Mrd.	Milliarden
NCA	Nickel-Kobalt-Aluminium
NMC	Nickel-Mangan-Kobalt
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle; Plug-in Hybrid
PRO	Product Responsibility Organisations
ROI	Return on Investment
SL	Second Life
SoH	State of Health
TCO	Total Cost of Ownership, Lebenszeitkosten
THG	Treibhausgas
V1G	Smart Charging (gesteuertes unidirektionales Laden von Elektrofahrzeugen)
V2G/V2X	Vehicle-to-Grid/Vehicle-to-X (bidirektionales Laden zwischen Fahrzeug und Elektrizitätsnetz (V2G) beziehungsweise Heimspeichern und anderen Elektrizitätskonsumierenden (V2X))



C Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Darstellung der Circular Economy für Traktionsbatterien und Fokus der Arbeitsgruppe Traktionsbatterien. Die Ziffern 1. bis 3. verorten die bearbeiteten Pilotthemen entlang der Wertschöpfungskette (Quelle: eigene Darstellung, angelehnt an die Darstellung des World Economic Forum 2019)	6
Abbildung 2:	Circular Economy bedeutet einen Transformationsprozess der Wirtschaft in vielen Bereichen (Quelle: eigene Darstellung)	7
Abbildung 3:	Zielbild der Arbeitsgruppe für eine Circular Economy für Traktionsbatterien (Quelle: eigene Darstellung)	11
Abbildung 4:	Roadmap der Arbeitsgruppe Traktionsbatterien, basierend auf einer Synthese der Handlungsempfehlungen (siehe Kapitel 5) (Quelle: eigene Darstellung)	12
Abbildung 5:	Kernprodukt der Unterarbeitsgruppe 1 sind Empfehlungen hinsichtlich der Informationsflüsse zur Förderung der Kreislaufführung von Traktionsbatterien (Quelle: eigene Darstellung, angelehnt an die Darstellung des World Economic Forum 2019)	13
Abbildung 6:	Akteure, Datenbedarfe und Kooperationsanreize für eine Pilotumsetzung (Quelle: eigene Darstellung)	14
Abbildung 7:	Modellstruktur der Entscheidungsplattform (Quelle: eigene Darstellung)	14
Abbildung 8:	Konzept einer Demontageanlage für Traktionsbatterien (Quelle: eigene Darstellung)	15
Abbildung 9:	Wechselwirkungen und Synergien zwischen den Pilotthemen (Quelle: eigene Darstellung)	16
Abbildung 10:	Darstellung der Circular Economy für Traktionsbatterien und Fokus der Arbeitsgruppe Traktionsbatterien. Die Ziffern 1. bis 3. verorten die bearbeiteten Pilotthemen entlang der Wertschöpfungskette (Quelle: eigene Darstellung, angelehnt an die Darstellung des World Economic Forum 2019)	25
Abbildung 11:	Selektive Darstellung einzelner relevanter Initiativen zur Circular Economy für Traktionsbatterien (Quelle: eigene Darstellung)	26
Abbildung 12:	Geschätzte Verfügbarkeit von Second-Life-Batterien in stationären Anwendungen in der EU bis 2030, gemäß mehreren Szenarioberechnungen (Quelle: Bobba et al.,2019)	30
Abbildung 13:	Konzeptionelle Darstellung einer Circular Economy für komplexe technische Produkte, basierend auf thermodynamischer Bewertung entlang des Lebenszyklus ¹¹² (Quelle: Abadías Llamas et al. 2020)	33
Abbildung 14:	Circular Economy bedeutet einen Transformationsprozess der Wirtschaft in vielen Bereichen (Quelle: eigene Darstellung)	39
Abbildung 15:	Zielbild der Arbeitsgruppe für eine Circular Economy für Traktionsbatterien (Quelle: eigene Darstellung)	40
Abbildung 16:	Zielkonflikte in der Wertschöpfungskette von Batterien machen einen systemischen Ansatz unabdingbar (Quelle: eigene Darstellung).	44
Abbildung 17:	Kernprodukt der Unterarbeitsgruppe 1 sind Empfehlungen hinsichtlich der Informationsflüsse zur Förderung der Kreislaufführung von Traktionsbatterien (Quelle: eigene Darstellung, angelehnt an die Darstellung des World Economic Forum 2019)	47
Abbildung 18:	Akteure, Datenbedarfe und Kooperationsanreize für eine Pilotumsetzung (Quelle: eigene Darstellung)	48
Abbildung 19:	Wichtigste Umsetzungsschritte für die Implementierung des Projektsteckbriefs „Kenntnis des Batterielebens“ (Quelle: eigene Darstellung)	48
Abbildung 20:	Modellstruktur der Entscheidungsplattform (Quelle: eigene Darstellung)	49
Abbildung 21:	Schematische Darstellung der Einbindung einer Plattform in die Geschäftsprozesse der Circular Economy (Quelle: eigene Darstellung)	50
Abbildung 22:	Mögliche Roadmap der modellbasierten Entscheidungsplattform (Quelle: eigene Darstellung)	51
Abbildung 23:	Konzept einer Demontageanlage für Traktionsbatterien (Quelle: eigene Darstellung)	52
Abbildung 24:	Mögliche Implementierungsschritte für die Etablierung eines europaweiten Demontagenetzwerkes (Quelle: eigene Darstellung)	53
Abbildung 25:	Wechselwirkungen und Synergien zwischen den Pilotthemen (Quelle: eigene Darstellung)	54
Abbildung 26:	Systemgrenzen von Batterierecycling (mit wesentlichen Prozessen und Stoffen) (Quelle: eigene Darstellung, angelehnt an Buchert et al. 2011)	58

Abbildung 27:	Roadmap zur Erreichung des Zielbilds (Quelle: eigene Darstellung)	69
Abbildung 28:	Darstellung der Circular Economy Initiative und der drei Arbeitsgruppen (Quelle: eigene Darstellung)	78
Abbildung 29:	Organigramm und inhaltlicher Fokus der Circular Economy Initiative Deutschland (Quelle: eigene Darstellung)	79
Abbildung 30:	Teilnehmende der Arbeitsgruppe Traktionsbatterien Batterien (Quelle: eigene Darstellung)	81
Abbildung 31:	Verbleib abgemeldeter Fahrzeuge in Deutschland (Quelle: Umweltbundesamt 2016)	85
Abbildung 32:	Szenario mit extrem hohem Anteil an Batterien in einer Zweitnutzung (Quelle: elementenergy 2019)	86
Abbildung 33:	Jährliches Aufkommen an Fahrzeug-Alt-Batterien von 2020 bis 2050 bei Second Use 0 Prozent, 20 Prozent und 50 Prozent (Quelle: Wuppertal Institut)	87
Abbildung 34:	Informationsflüsse zur Förderung der Kreislaufführung von Traktionsbatterien (Quelle: eigene Darstellung, angelehnt an die Darstellung des World Economic Forum 2019)	92
Abbildung 35:	Akteure, Datenbedarfe und Kooperationsanreize für eine Pilotumsetzung (Quelle: eigene Darstellung)	96
Abbildung 36:	Wichtigste Umsetzungsschritte für die Implementierung des Projektsteckbriefs „Kenntnis des Batterie-lebens“ (Quelle: eigene Darstellung)	100
Abbildung 37:	Konzept der modellbasierten Entscheidungsplattform (Quelle: eigene Darstellung)	103
Abbildung 38:	Modellstruktur der Entscheidungsplattform (Quelle: eigene Darstellung)	104
Abbildung 39:	Entscheidungslogik – Kombination aus Entscheidungsbaum und Fließschemasimulation für Entscheidungen auf Unternehmensebene (Mikroebene) (Quelle: eigene Darstellung)	105
Abbildung 40:	Integration der Netzwerk- und Unternehmensebene in der Entscheidungsplattform (Quelle: eigene Darstellung)	106
Abbildung 41:	Schematische Darstellung der Einbindung einer Plattform in Geschäftsprozesse der Circular Economy (Quelle: eigene Darstellung)	110
Abbildung 42:	Einfluss und Interesse der Akteure in Bezug auf die Ausgestaltung der Entscheidungsplattform (Quelle: eigene Darstellung)	112
Abbildung 43:	Umsetzungsschritte der modellbasierten Entscheidungsplattform (Quelle: eigene Darstellung)	116
Abbildung 44:	Roadmap der modellbasierten Entscheidungsplattform (Quelle: eigene Darstellung)	117
Abbildung 45:	Konzept einer Demontageanlage für Traktionsbatterien (Quelle: eigene Darstellung)	119
Abbildung 46:	Mögliche Implementierungsschritte für die Etablierung eines europaweiten Demontagenetzwerks (Quelle: eigene Darstellung)	125

D Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Empfehlungen der Arbeitsgruppe Traktionsbatterien für verbindlich geltend zu machende beziehungsweise anzustrebende Rückgewinnungsraten (unter Berücksichtigung der dazugehörigen Definitionen)	8
Tabelle 2:	Empfehlungen der Arbeitsgruppe Traktionsbatterien für verbindlich geltend zu machende beziehungsweise anzustrebende Rückgewinnungsraten (unter Berücksichtigung der dazugehörigen Definitionen)	60
Tabelle 3:	Annahmen zu den eingesetzten Batterietypen bis 2050 (Quelle: Buchert et al. 2019)	84
Tabelle 4:	Metallinhalte unterschiedlicher Lithium-Ionen-Batterien (Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von Fab4Lib und BloombergNEF)	84
Tabelle 5:	Optimierte Rückgewinnungsraten für Rohstoffe aus Traktionsbatterien (Quelle: eigene Darstellung)	89
Tabelle 6:	Beteiligte Akteure und Kooperationsanreize des Pilotkonzeptes	95
Tabelle 7:	Exemplarische Informationen für die Entscheidungsfindung	107
Tabelle 8:	Ausgestaltung der Entscheidungsplattform in Abhängigkeit des Betreibers	109
Tabelle 9:	Relevante Akteure für Entscheidungsplattform	111
Tabelle 10:	Handlungsempfehlungen in Abhängigkeit des Plattformbetreibers	115



E Verzeichnis der Vertiefungen

Vertiefung I:	Covid-19 und Circular Economy für Traktionsbatterien	10
Vertiefung II:	Second-Life-Batterien	29
Vertiefung III:	Quantifizierte Materialflussanalyse einer Circular Economy für Traktionsbatterien	35
Vertiefung IV:	Batterierecycling: Definitionen, differenzierte Ziele und Ambitionslevel	57
Vertiefung V:	Maßnahmen zur Erhöhung von Rücklaufquoten: Finanzielle Anreizsysteme – Fokus Pfandsysteme	61

F Hintergrund zur Circular Economy Initiative Deutschland

Die *Circular Economy Initiative Deutschland (CEID)* wurde 2019 mit Förderung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gegründet, um in einem Stakeholder-übergreifenden Ansatz die Transformation Deutschlands hin zu einer zirkulären Wirtschaft voranzutreiben. Übergreifendes Ziel ist es, bis Anfang 2021 eine Roadmap für Deutschland hin zu einer stärker zirkulären, ressourcenproduktiveren Wirtschaft zu entwickeln und hierfür Handlungsempfehlungen für Politik, Wirtschaft und Wissenschaft abzuleiten.

In einer im Juli 2019 veröffentlichten Vorstudie leitete die Geschäftsstelle der *Circular Economy Initiative Deutschland* durch

die qualitative Analyse von 12 europäischen Circular-Economy-Roadmaps 24 Erkenntnisse ab, aus denen sie 10 Empfehlungen für eine deutsche Umsetzung formulieren konnte.¹⁸⁷ Die durch ein umfassendes Multistakeholder-Review validierten Ergebnisse der Vorstudie bilden die Grundlage für die Arbeit der *Circular Economy Initiative Deutschland* und fließen in die Erarbeitung des Abschlussberichts ein, der 2021 veröffentlicht wird.

Getragen durch Mitglieder aus Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft sowie Politik bietet die *Circular Economy Initiative Deutschland* einen breit angelegten Stakeholder-Dialog, um einen systemischen Ansatz zur Auflösung zentraler Herausforderungen für die Circular Economy zu entwickeln.

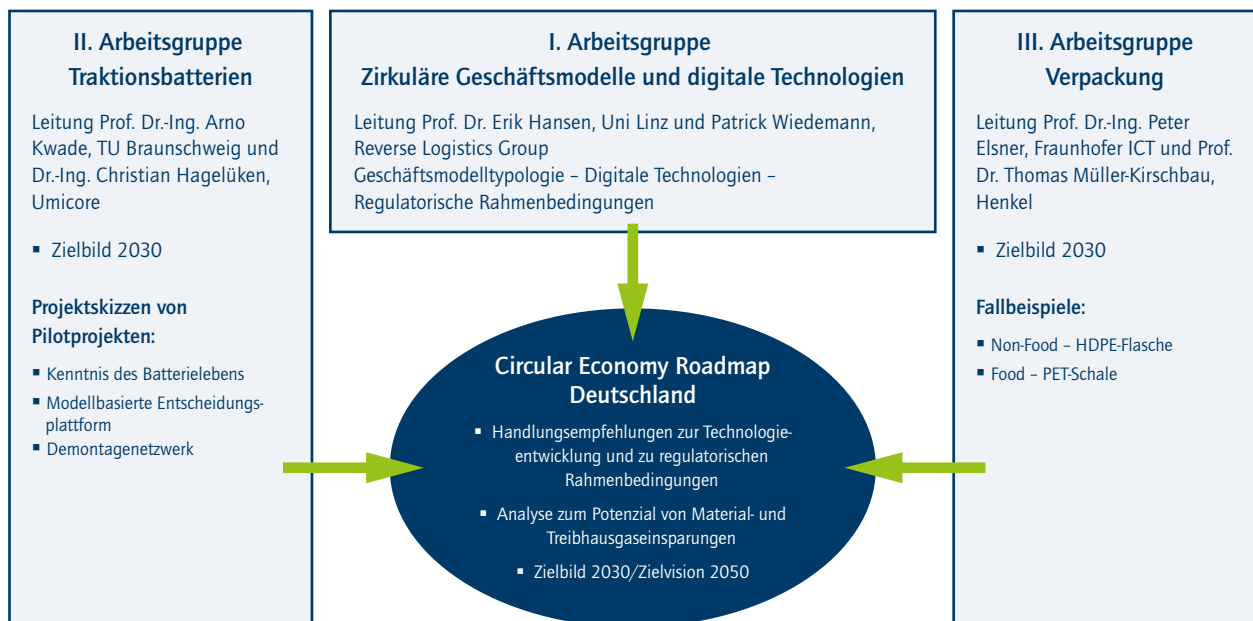


Abbildung 28: Darstellung der Circular Economy Initiative und der drei Arbeitsgruppen (Quelle: eigene Darstellung)

187 | Vgl. Weber/Stuchtey 2019.

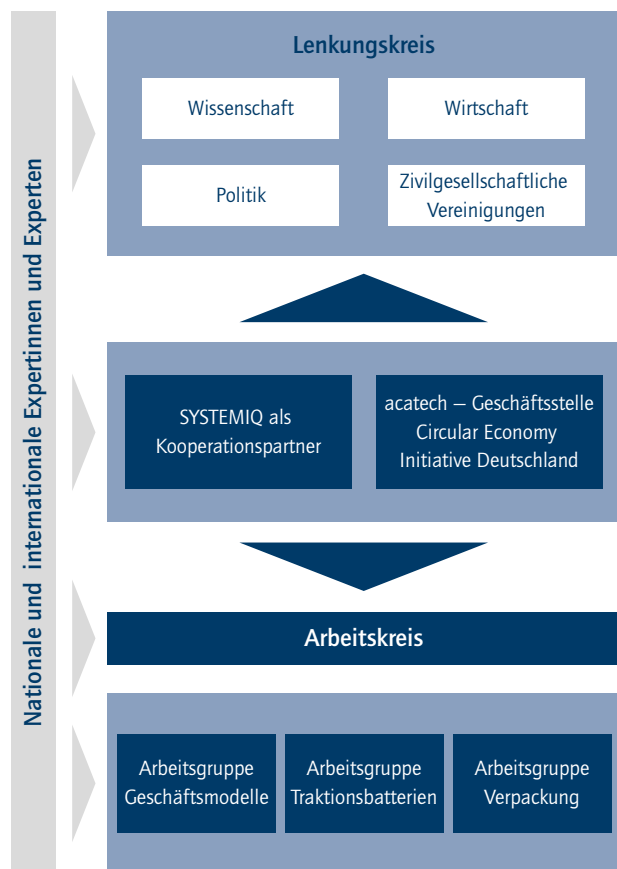


Abbildung 29: Organigramm und inhaltlicher Fokus der Circular Economy Initiative Deutschland (Quelle: eigene Darstellung)

Die Arbeit der *Circular Economy Initiative Deutschland* strukturiert sich in drei Arbeitsgruppen (siehe Abbildung 28):

- Die Arbeitsgruppe Geschäftsmodelle befasst sich auf konzeptioneller Ebene mit den Potenzialen zirkulärer Geschäftsmodelle und digitaler Technologien als Innovationstreiber.
- Die Arbeitsgruppen Verpackung und Traktionsbatterien arbeiten entlang ihrer jeweiligen sektorspezifischen Funktionssysteme. Die inhaltliche Arbeit in den Arbeitsgruppen erfolgt wertschöpfungskettenübergreifend basierend auf einer ganzheitlichen Lebenszyklusbetrachtung (Produktentwicklung, Produktion, Nutzung und Nachnutzung).
- Den Arbeits- und Lenkungsreis der Circular Economy Initiative Deutschland bilden Mitglieder aus der Wissenschaft,

der Wirtschaft und der Zivilgesellschaft und den Bundesministerien für Bildung und Forschung (BMBF), für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) und für Wirtschaft und Energie (BMWi). Dadurch ist eine enge Abstimmung zwischen den Mitgliedern und der Geschäftsstelle der Circular Economy Initiative Deutschlands garantiert und eine permanente Anschlussfähigkeit an die deutsche Politik sichergestellt.

- In der Geschäftsstelle der Circular Economy Initiative Deutschlands wird der Gesamtprozess koordiniert und die Circular-Economy-Roadmap Deutschland erarbeitet.

Die Wahl des Themas Traktionsbatterien für die *Circular Economy Initiative Deutschland* war aus mehreren Gründen naheliegend:

1. Aufgrund der zentralen Rolle der Batterie in der Wertschöpfung und technischen Marktführerschaft elektrischer Fahrzeuge (BEV) ist die Relevanz dieses Sektors für den Standort Deutschland signifikant. Das umfassende Management dieser zentralen Wertschöpfungskette stellt eine Gelegenheit dar, eine Alternative zu der sinkenden Wertschöpfung aus der „alten“ Industrie bereitzustellen – in Form von Arbeitsplätzen, Investitionsmöglichkeiten und Umsatzpotenzial.
2. Gleichzeitig kommt es jedoch aufgrund der hohen Marktdynamik, beispielsweise infolge hoher Investitionskosten sowie der Entstehung neuer Zentren globaler Industriekompetenz, darauf an, Risiken und Chancen einer zirkulären Batterie-wertschöpfung realistisch einander gegenüberzustellen. Nicht zuletzt gilt es das schnelle globale Wachstum^{188, 189} der (batterie)elektrischen Mobilität nachhaltig zu gestalten, denn der ökologische Fußabdruck einer Batterie (Cradle-to-Gate) ist wesentlich für ihren Beitrag zur Dekarbonisierung des Mobilitätssektors.¹⁹⁰
3. Um dabei jedoch die gesellschaftliche Akzeptanz sicherzustellen und bei der Produktion, Nutzung und Verwertung von Batterien Mensch und Umwelt auch anderswo in der Welt zu schützen, ist systemisches Handeln jetzt gefragt. Denn der Aufbau einer ausreichenden Verwertungs- und Recyclinginfrastruktur für die künftig vielfach größeren Mengen verbrauchter Batterien bedarf nicht nur eines genügenden Vorlaufs, sondern die neuen Batterien sollten insbesondere während des steilen Marktanstiegs über die kommenden Jahrzehnte möglichst lang und produktiv eingesetzt werden.

188 | Vgl. International Energy Agency 2019a.

189 | Prognosen gehen für das Jahr 2030 von einem rasanten Marktwachstum des Marktes für batterieelektrische Fahrzeuge (Battery Electric Vehicle, BEV) von 20 bis 40 Prozent pro Jahr aus.

190 | Vgl. World Economic Forum 2019.



Zudem empfiehlt es sich, die Batterien demontage-, wartungs- und recyclinggerecht zu gestalten.

4. Die Betrachtung des Batteriesystems ist zudem aus Perspektive der Circular Economy zentral, um Lehren zum Aufbau zirkulärer Wertschöpfungssysteme zu ziehen. Das System stellt einen klar definierbaren Analyserahmen mit eindeutig definierbaren Materialströmen dar. Zudem weist das Fallbeispiel Batteriesystem Zielkonflikte auf, die nur im Rahmen einer ganzheitlichen Betrachtung zu klären sind (siehe hierzu Kapitel 3.4 im Gesamtbericht) und somit von dem Multistakeholder-Format der Circular Economy Initiative Deutschland besonders profitieren kann. Circular Economy in Batterien hat dabei eine Signalwirkung: Elektromobilität und Traktionsbatterien sind eine neue Anwendung mit hohen

Auswirkungen auf die Ressourcen. Hier ist es essenziell, die Circular Economy von Anfang an mitzudenken. Die Circular Economy bei Traktionsbatterien kann sogar ein Referenzbeispiel für weitere neue ressourcenrelevante Technologien sein.

5. Wenngleich die Materialströme und das direkte Treibhausgas(THG)-Einsparpotenzial des Batteriesektors im gesamtwirtschaftlichen Kontext relativ gering sind, ist die Relevanz der Kreislaufwirtschaft für Traktionsbatterien hoch: vom Werterhalt der enthaltenen teils kritischen Materialien über Produktivitätsgewinne durch maximierte Nutzung (Shared Mobility, Vehicle-to-Grid) bis hin zu verbesserter Versorgungssicherheit für kritische Rohstoffe und die Ökobilanz der Elektromobilität und systemischen Hebeleffekten für die Energiewende.

G Hintergrund und Methodik der Arbeitsgruppe Traktionsbatterien

Die Arbeit der Arbeitsgruppe Traktionsbatterien profitierte von der umfassenden Beteiligung hochkarätiger Teilnehmender aus Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft (siehe Abbildung 30 unten). Sie besteht aus zentralen Stakeholdern, deren Expertise die gesamte Wertschöpfungskette von Traktionsbatterien abdeckt: Zu den Mitwirkenden zählen Veredler von Grundmaterialien, Werkzeughersteller und Batterieproduzenten und auch Logistiker, Dienstleister sowie Verwerter und Recycler.

- Hochkarätige Vertreterinnen und Vertreter aus der Wissenschaft und Zivilgesellschaft beziehungsweise Mitglieder von Plattformen stellen fundiertes Fachwissen und Perspektiven außerhalb der Wirtschaft bereit.
- Durch die Beteiligung der Bundesministerien für Bildung und Forschung (BMBF), für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) und für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Lenkungskreis wird der Anschluss an die Politik

sichergestellt. Die Teilnahme relevanter Unternehmensplattformen (Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien – KLiB, World Wide Fund For Nature – WWF, World Economic Forum – WEF) unterstützt den Anschluss an Zivilgesellschaft und einschlägige Unternehmensnetzwerke.

- Die Geschäftsstelle der Circular Economy Initiative Deutschland verantwortet die Prozesskoordination und leistet inhaltliche Unterstützung. Zudem stellt sie den Anschluss an andere nationale und internationale Initiativen sicher, wie etwa Nationale Plattform Mobilität (NPM), European Battery Alliance (EBA250), Global Battery Alliance (GBA) und relevante Aktivitäten der Europäischen Kommission.

Methodik

Der vorliegende Abschlussbericht der Arbeitsgruppe „Traktionsbatterien“ im Rahmen der *Circular Economy Initiative Deutschland* ist das abgestimmte Resultat eines zehnmonatigen Multi-Stakeholder-Prozesses mit Akteuren aus Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft (vergleiche Teilnehmerübersicht im Kapitel Projekt im Gesamtbericht). Entsprechend den

Leitung	Wirtschaft: Dr.-Ing. Christian Hagelüken – Umicore, Director EU Government Affairs
	Wissenschaft: Prof. Dr.-Ing. Arno Kwade – TU Braunschweig, Leiter Institut für Partikeltechnik, Vorstandssprecher Battery LabFactory

Aktuelle Mitglieder

<p>Wirtschaft</p>
<p>Wissenschaft</p>
<p>Zivilgesellschaft, Plattformen und Netzwerke</p>

Abbildung 30: Teilnehmende der Arbeitsgruppe Traktionsbatterien Batterien (Quelle: eigene Darstellung)



allgemeinen Zielsetzungen und kartellrechtlichen Vorgaben der *Circular Economy Initiative Deutschland* beschränkte sich die Zusammenarbeit zwischen den beteiligten Akteuren innerhalb der Arbeitsgruppe ausschließlich auf den vorwettbewerblichen Raum. Dabei stellten sechs über den Zeitraum verteilte Arbeitsgruppentreffen, die von der Geschäftsstelle der *Circular Economy Initiative Deutschland* gemeinsam mit der Arbeitsgruppenleitung geplant und durchgeführt wurden, den zentralen Koordinationsmechanismus dar. Konkret boten die Treffen den Arbeitsgruppenmitgliedern die Möglichkeit, über thematische Schwerpunkte und inhaltliche Positionierungen gemeinsam zu diskutieren und zu entscheiden. Durch intensive Vor- und Nachbereitung der Arbeitsgruppentreffen sowie iterative Abstimmungsschleifen zwischen den einzelnen Treffen wurde ein hohes Maß an Stakeholder-Einbindung bei der Entwicklung der Themen und inhaltlichen Positionierungen sichergestellt.

Die Ergebnisse des Abschlussberichts fassen die Diskussionen und gemeinsamen Positionen der Arbeitsgruppe zusammen. Zusätzlich zu diesen internen Abstimmungsschleifen fand abschließend auch eine externe Begutachtung einzelner Kapitel durch ausgewiesene Fachexpertinnen und -experten aus der Wissenschaft statt.

Aufbauend auf der Identifikation von Themen mit hervorhebener Bedeutung für die konkrete Umsetzung einer zirkulären Batteriewertschöpfung in Deutschland wurden zudem aus der Arbeitsgruppe heraus drei Projektgruppen gebildet, die parallel zu dem Arbeitsprozess der Gesamtgruppe jeweils einen sogenannten Pilotsteckbrief verfasst haben (vergleiche Kapitel 4, Pilotthemen im Gesamtbericht, sowie Anhang I, Pilotsteckbriefe I, II, III). Strukturiert wurde dieser parallel stattfindende Arbeitsprozess ebenfalls durch regelmäßig stattfindende virtuelle Treffen der Projektgruppen, die durch die Geschäftsstelle sowie die jeweiligen Moderatoren der Pilotprojekte organisiert und durchgeführt wurden. Die Ergebnisse der Steckbriefe beruhen auf dem inhaltlichen Input der jeweiligen Projektgruppen. Zudem wurden der inhaltliche Zuschnitt sowie die zentralen Aussagen der einzelnen Steckbriefe in regelmäßigen Konsultationsschleifen mit der Gesamtarbeitsgruppe Traktionsbatterien abgestimmt. Abschließend fand auch hier eine zusätzliche externe Begutachtung jedes Pilotsteckbriefs durch ausgewählte Fachexperten aus der Wissenschaft statt.

H Materialflussanalyse von Circular-Economy-Maßnahmen bis 2050

Eine vom Stiftungsfonds für Umweltökonomie und Nachhaltigkeit (SUN) beauftragte Materialflussanalyse durch das Wuppertal Institut¹⁹¹ quantifiziert mögliche Effekte von Circular-Economy-Maßnahmen auf die Wirtschaft – bezogen auf Materialströme, Energieaufwand, CO₂-Effekte sowie wirtschaftliche Parameter bis ins Jahr 2050.

Als erstes Fokusthema wurde die optimierte Rückgewinnung von Rohstoffen aus den **Batterien von Elektrofahrzeugen** gewählt – mit Blick auf die im Bericht der Arbeitsgruppe dargelegte Relevanz für eine Transformation zur Kreislaufwirtschaft. Hierzu wurden in Abstimmung mit den Expertinnen und Experten der Arbeitsgruppe verschiedene Szenarien entwickelt, mit denen grundlegende Annahmen und Ergebnisse im Folgenden dargestellt werden. Konkret wurden dabei folgende Aspekte berücksichtigt:

- Annahmen zum Hochlauf des Bestands an Elektrofahrzeugen bis 2050
- Annahmen zur Nutzungsdauer der Batterien
- Annahmen zur verwendeten Batterietechnik und daraus resultierender Rohstoffbedarfe
- Annahmen zur Quote exportierter Fahrzeuge
- Annahmen zur Weiternutzung/zum Second Life
- Annahmen zu erreichbaren Rückgewinnungsquoten
- Annahmen zur Reduktion des kumulierten Energieaufwands durch optimiertes Recycling

Annahmen zum Hochlauf des Bestands an Elektrofahrzeugen bis 2050

Entscheidend für die Menge an Rohstoffen, die hier zum Recycling zur Verfügung stehen, ist grundlegend die Entwicklung des Bestands an Elektrofahrzeugen (Battery Electric Vehicles, BEV). Nach Angaben des Kraftfahrzeugbundesamts waren mit Stand 2020 in Deutschland nur 136.617 batteriegetriebene PKW zugelassen,¹⁹²

diese Zahl soll nach Vorstellungen der Bundesregierung¹⁹³ und getrieben durch einen globalen Megatrend¹⁹⁴ in den kommenden Jahren massiv gesteigert werden.

Für die Entwicklung des Bestands wurde hier auf ein Szenario von BCG/Prognos¹⁹⁵ zurückgegriffen, das für das Jahr 2030 einen Bestand von 8,9 Millionen batterieelektrischen Fahrzeugen annimmt (unter der Annahme starker finanzieller Anreize für den weiteren Ausbau der Elektromobilität und der gleichzeitigen Verlagerung von Verkehrsleistungen, zum Beispiel auf den öffentlichen Personennahverkehr¹⁹⁶). Für den weiteren Verlauf bis zum Jahr 2050 wurde ein insgesamt weiterhin exponentieller Anstieg der jährlichen Neuanmeldungen angenommen¹⁹⁷, der zu einem Bestand von 25,7 Millionen elektrisch betriebenen Fahrzeugen im Jahr 2050 führen würde, was in der Größenordnung anderer Abschätzungen liegt, zum Beispiel in der Bandbreite der Szenarien, die im Rahmen des Projekts „eMobil – 2050 Szenarien zum möglichen Beitrag des elektrischen Verkehrs zum langfristigen Klimaschutz“ vom Öko-Institut für das Bundesumweltministerium entwickelt wurden.¹⁹⁸

Annahmen zur Nutzungsdauer der Batterien

Die in diesem Bestand enthaltenen Fahrzeuge mit ihren Batterien werden nach einer gewissen Nutzungsphase zu Altfahrzeugen und sollten dann einem hochwertigen Recycling zugeführt werden. Für die Dauer dieser Nutzungsphase wurde ein durchschnittlicher Wert von zwölf Jahren angenommen, der im Betrachtungszeitraum eine weitere Verbesserung der Haltbarkeit der Batterien sowie intensivierete Bemühungen zur Reparatur während der Nutzungsphase unterstellt.

Eine durchschnittliche Nutzungsdauer von 12 Jahren beinhaltet sowohl einen gewissen Anteil an Batterien, die sehr früh in der Nutzungsphase ausfallen, als auch einen Anteil an Batterien, die deutlich länger als 12 Jahre genutzt werden. Für die Verteilung der Ausfälle wurde hier basierend auf Literaturangaben eine Weibull-Verteilung mit den Kernparametern k (Form der Verteilung) = 4 und T (durchschnittliche Nutzungsdauer) = 12 gewählt.¹⁹⁹

191 | Vgl. Wuppertal Institut [im Erscheinen].

192 | Batterie-Elektrische und Hybrid/FCEV zum Stichtag 1.1.2019. | Vgl. Kraftfahrt-Bundesamt 2019a.

193 | Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie et al. 2011.

194 | Vgl. International Energy Agency 2019a.

195 | Vgl. Boston Consulting Group/Prognos 2019.

196 | Vgl. ebd.

197 | Ausgehend von den Zielwerten für 2030 und 2050 wurde für die Zwischenschritte hier vereinfachend eine gleichmäßige Verteilung des Wachstums des Bestands angenommen.

198 | Vgl. Öko-Institut 2014.

199 | Vgl. Sander et al. 2017a.

Annahmen zur verwendeten Batterietechnik und daraus resultierende Rohstoffbedarfe

Die möglichen Beiträge zum Klima- und Ressourcenschutz durch ein optimiertes Recycling von Batterien aus Elektrofahrzeugen sind abhängig von der Menge darin enthaltener Rohstoffe – und damit von den verwendeten Batterietechnologien.

Im Rahmen dieser Szenarienentwicklung wird dazu auf Ergebnisse des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projektes Fab4Lib zurückgegriffen, das sich zum Ziel gesetzt hat, innovative Lösungen entlang der Wertschöpfungskette der Lithium-Ionen-Technologie zu erforschen und diese in Demonstratoren zu validieren.²⁰⁰

Die nachfolgende Tabelle 3 zeigt die dort entwickelten Annahmen zur Entwicklung der eingesetzten Batterietechnologien: „Nach heutigem Kenntnisstand wird die Speichertechnologie im Bereich der Elektrofahrzeuge eindeutig von unterschiedlichen Varianten der Lithium-Ionen-Zellen dominiert. Dies kann zumindest bis 2030 als sehr wahrscheinlich gelten. Daher sind die mittelfristigen Entwicklungen bis 2030 wesentlich sicherer als die langfristige Betrachtung bis 2050. Technologische Innovationen, die sich disruptiv auf den Markt auswirken könnten, wie beispielsweise Feststoff-Batterien, wurden in den Betrachtungen nicht berücksichtigt.“²⁰¹ Angesichts der dynamischen Entwicklungen der Batterietechnologien wurde hier auf Basis von Diskussionen in der Arbeitsgruppe für die Modellierung angenommen, dass 90:5:5-Batterien nicht vor 2040 auf den Markt kommen werden und damit aufgrund der Lebensdauer von Traktionsbatterien im Betrachtungszeitraum auch nicht in wesentlichen Mengen für das Recycling anfallen.

Auf Basis dieser Annahmen lässt sich im nächsten Schritt abschätzen, welche Mengen der hier im Fokus stehenden Rohstoffe Nickel, Kobalt und Lithium in diesen Batterien enthalten sein werden und dann für ein Recycling potenziell zur Verfügung stehen würden. Die folgende Tabelle zeigt die hier gewählten Annahmen für die durchschnittlichen Mengen der relevanten Metalle pro Batterieeinheit in einem Fahrzeug auf Basis der in Fab4Lib angegebenen Angaben für die durchschnittlichen Kapazitäten der einzelnen Batterietypen.²⁰²

Während die dargestellte Weiterentwicklung der Batterietechnik für den Einsatz dieser Rohstoffe zu signifikanten Veränderungen

Batterietyp	Anteile der Batterietypen im Verkauf		
	2016	2030	2050
NMC (1:1:1)	32 %	–	–
NMC (5:3:2)	4 %	–	–
NMC (6:2:2)	–	45 %	–
BEV NMC (8:1:1)	–	45 %	54 %
NMC (90:5:5)	–	–	36 %
NCA	16 %	10 %	10 %
LMO	12 %	–	–
LFP	36 %	–	–

NMC = Nickel-Mangan-Kobalt
 NCA = Nickel-Kobalt-Aluminium
 LMO = Lithium-Mangan-Oxid
 LFP = Lithium-Eisen-Phosphat

Tabelle 3: Annahmen zu den eingesetzten Batterietypen bis 2050 (Quelle: Buchert et al. 2019)

Batterie	Masse der Metalle in den Zellen, in kg	Davon Lithium (kg)	Davon Nickel (kg)	Davon Kobalt (kg)
LMO	69,9	2,7	0	0
LFP	37,8	1,6	0	0
NMC (111)	87,5	6,5	17,5	17,5
NMC (532)	82	6	25	10
NMC (622)	75	5,5	27	9
NMC (442)	69,5	5	17	8,5
NMC (811)	66	5	32	4
NCA	116,8	8,8	56,8	10,4
NCA+	127,2	9,6	69,6	4

NMC = Nickel-Mangan-Kobalt
 NCA = Nickel-Kobalt-Aluminium
 LMO = Lithium-Mangan-Oxid
 LFP = Lithium-Eisen-Phosphat

Tabelle 4: Metallinhalte unterschiedlicher Lithium-Ionen-Batterien (Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von Fab4Lib und BloombergNEF)

führen wird – deutlich weniger Kobalt pro Batterieeinheit, dafür deutlich mehr Nickel – wurden für die weiteren Bestandteile (Elektronik, Gehäuse etc.) konstante Einsatzmengen angenommen

200 | Vgl. Elektroauto-News 2018.

201 | Vgl. Buchert et al. 2019.

202 | Lithium-Eisen-Phosphat(LFP) = 20 Kilowatt pro Stunde; Lithium-Mangan-Oxid(LMO) = 30 Kilowatt pro Stunde; Nickel-Kobalt-Aluminium(NCA) = 80 Kilowatt pro Stunde und Nickel-Mangan-Kobalt(NMC) = 50 Kilowatt pro Stunde.

und hierzu auf die Ökobilanz zum „Recycling von Lithium-Ionen-Batterien“ (LithoRec) von Buchert et al. zurückgegriffen.²⁰³

Annahmen zur Quote exportierter Fahrzeuge

Der weitaus größte Teil der in Deutschland endgültig außer Betrieb gesetzten Fahrzeuge wurde in der Vergangenheit als Gebrauchtfahrzeuge exportiert.²⁰⁴ Analysen im Auftrag des Bundesumweltministeriums zum finalen Verbleib von Altfahrzeugen haben gezeigt, dass ein relativ geringer Anteil direkt aus Deutschland außerhalb der Europäischen Union verbracht wird, aber ein größerer Anteil nach einer zweiten Nutzungsphase häufig in osteuropäischen EU-Mitgliedstaaten landet.²⁰⁵

Es ist zum aktuellen Zeitpunkt nicht absehbar, ob sich für Elektrofahrzeuge ähnliche Nutzungsstrukturen entwickeln werden. Die vergleichsweise hohen Anschaffungskosten für Elektrofahrzeuge könnten solche Tendenzen unterstützen, zugleich könnten die Anforderungen an eine Ladeinfrastruktur oder die mit Blick auf den Wert, die Kritikalität und den Umweltfußabdruck der verwendeten Materialien zu erwartende Entwicklung neuer Leasing-Geschäftsmodelle zu einem verstärkten Verbleib solcher Fahrzeuge in der Europäischen Union führen.

Für den Zweck der Betrachtung hochwertiger und umweltfreundlicher Recyclings wird in dieser Studie nur außereuropäischer

Export als solcher gewertet, während die Verwertung in anderen EU-Mitgliedstaaten als inländisch eingestuft wird.

Vor diesem Hintergrund wurden für die Berechnungen zwei alternative Optionen angenommen:

- Option 1: Exportquote zehn Prozent
- Option 2: Exportquote fünfzig Prozent

Hierbei handelt es sich um Netto-Exportquoten, weil in geringem Umfang natürlich auch Elektrofahrzeuge zur Verwertung in die Europäische Union importiert werden könnten. Gleichzeitig kann davon ausgegangen werden, dass diese Fahrzeuge auch im Ausland einem Recycling zugeführt werden – aufgrund von fehlenden gesetzlichen Vorgaben allerdings nicht zu einem mit Deutschland beziehungsweise der EU vergleichbaren Qualitätsstandard. Von daher wird auch für die exportierten Fahrzeuge eine Rückgewinnung von der Hälfte der in Deutschland beziehungsweise in der EU möglichen Rückgewinnungsquoten angenommen.

Annahmen zur Weiternutzung/zum Second Life

Lithium-Ionen-Batterien können typischerweise in batteriebetriebenen Fahrzeugen genutzt werden, bis ihre Leistungs- und Speicherkapazität auf circa achtzig Prozent abgesunken ist.²⁰⁶ Auch mit einer solchen reduzierten Leistungsfähigkeit sind

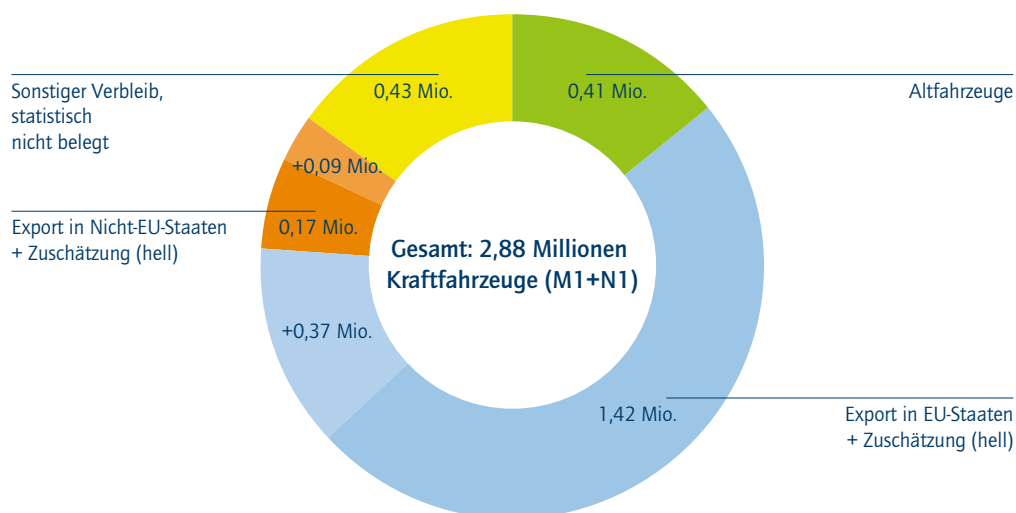


Abbildung 31: Verbleib abgemeldeter Fahrzeuge in Deutschland (Quelle: Umweltbundesamt 2016)

203 | Vgl. Öko-Institut 2011.

204 | Vgl. Umweltbundesamt 2019.

205 | Vgl. Sander et al. 2017b.

206 | Vgl. Bobba et al. 2019.

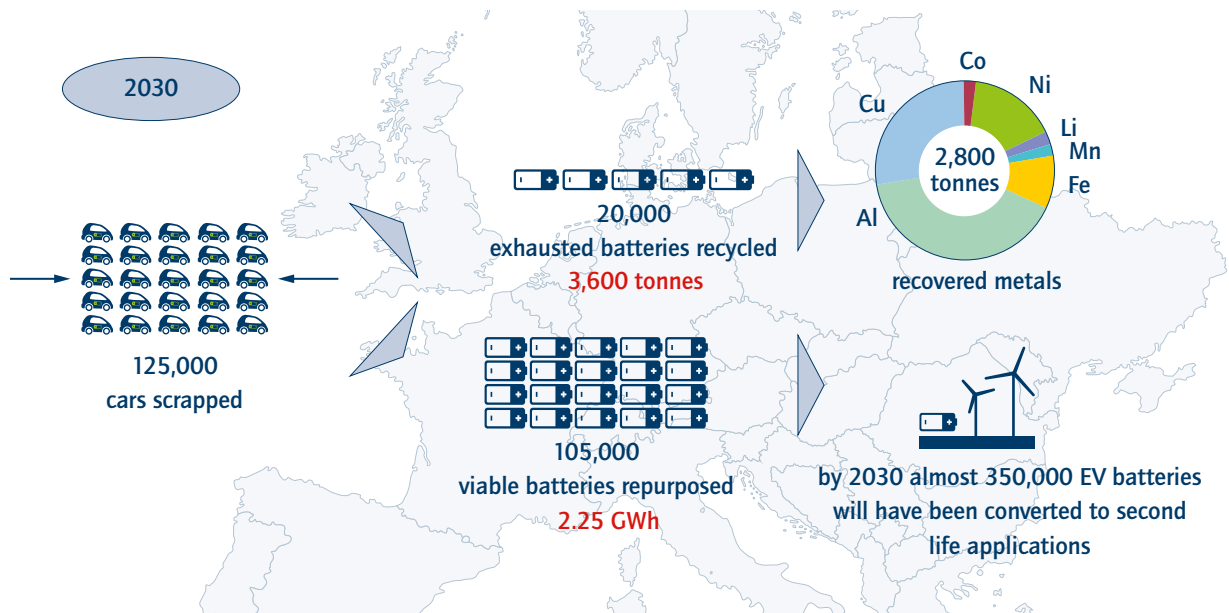


Abbildung 32: Szenario mit extrem hohem Anteil an Batterien in einer Zweitnutzung (Quelle: elementenergy 2019)

jedoch zahlreiche andere Anwendungen vorstellbar, für die diese Batterien in einer zweiten Nutzungsphase eingesetzt werden könnten, wodurch die Produktion einer neuen Batterie für diese Zwecke eingespart würde:

„... thus, not surprisingly, there is a high interest and potential for less energy-demanding applications, e.g. residential buildings, uninterruptible power supply, sweepers and driverless transport vehicles.“^{207, 208, 209, 210}

Aktuell ist noch kaum seriös abschätzbar, zu welchen Anteilen Lithium-Ionen-Batterien tatsächlich solchen Zweitverwendungen zugeführt werden. In der Literatur werden hierzu extrem abweichende Aussagen getroffen, die von 85 Prozent (ElementEnergy²¹¹, siehe Abbildung 32) bis hin zu Einschätzungen reichen, dass sich die Nachfrage nach Second Life auf eine begrenzte Anzahl an technisch umfassend qualifizierten Speicheranwendungen beschränkt. Studien zur Marktrelevanz weisen unter anderem darauf hin, dass bei Abschätzungen für

Second-Life-Anwendungen Unsicherheiten über die tatsächliche Nachfrage bestehen:²¹² „(...) there is a risk that such applications are obsolete at the time when the volumes of available used EV batteries become large“ (vergleiche hierzu auch die Vertiefung zum Second Life im Gesamtbericht).

Vor diesem Hintergrund sollen hierzu unterschiedliche Szenarien betrachtet werden, die in Anlehnung an Bobba et al. 2019 von 0 Prozent, 20 Prozent und 50 Prozent Second Life ausgehen.²¹³ Dazu wurden die Annahmen getroffen, dass

- die Batterien für 8 Jahre in dieser zweiten Nutzungsphase verbleiben,
- in ihrer Leistungsfähigkeit weiter abnehmen, sodass im Durchschnitt eine Kapazität von 60 Prozent einer Neubatterie ausgegangen wird²¹⁴ und
- drittens aufgrund der dezentralen Verteilung in unterschiedlichste Anwendungsfälle eine finale Erfassungsquote für ein anschließendes Recycling von 80 Prozent angenommen

207 | Vgl. Bobba et al. 2018.

208 | Vgl. Rehme et al. 2016.

209 | Vgl. Rohr et al. 2017.

210 | Vgl. Bobba et al. 2019, S. 280.

211 | Vgl. elementenergy 2019.

212 | Vgl. Kurdve et al. 2019.

213 | Bobba et al. 2019 betrachten in ihren Szenarien sogar eine Second-Use-Quote von siebzig Prozent, was aus Sicht der Mitglieder der Arbeitsgruppe jedoch nicht als realistisch eingeschätzt wurde.

214 | Hierbei wurde vereinfachend von der Substitution einer Nickel-Mangan-Kobalt(NMC)-Batterie ausgegangen. In der Praxis würden natürlich auch andere Batterietypen (zum Beispiel Lithium-Eisen-Phosphat(LFP)-Batterien) ersetzt.

werden kann. Diese Erfassungsquote wird signifikant von der tatsächlichen Nutzung abhängen (zum Beispiel im privaten Haushalt oder in industriellen Anwendungen), ebenso von Rahmenbedingungen wie der möglichen Einführung eines Pfands auf Lithium-Ionen-Batterien.

Mit diesen Annahmen verschiebt sich für die Optionen 20 Prozent beziehungsweise 50 Prozent Second Life der Zeitpunkt, wann die in diesen Batterien enthaltenen Rohstoffe für ein Recycling zur Verfügung stehen (siehe Abbildung 33). Sollten 50 Prozent der Batterien einem Second Life zugeführt werden, würde sich beispielsweise das erste Jahr mit einer Menge von mehr als einer halben Million Batterien für das Recycling von 2030 um 4 Jahre auf das Jahr 2034 verschieben. Gleichzeitig würden die in Second Life angewendeten Batterien während dieser Zeit weiter Mehrwert generieren, beispielsweise im Energiesektor durch Bereitstellung von Netzdiensten. Selbst bei einer Second-Life-Quote von 50 Prozent könnten angesichts des starken Marktwachstums im Jahr 2030 nur zusätzliche 16 Prozent der Marktnachfrage für wichtige Batteriematerialien abgedeckt

werden. In diesem Szenario würden alleine im Jahr 2050 noch fast 750.000 Batterien einer Zweitnutzung zugeführt, die dann in den Jahren nach 2050 sukzessive einem Recycling zugeführt werden könnten.

Die Wiederverwendung von Traktionsbatterien in Zweitverwendung reduziert in diesem Szenario den Bedarf an neuen Batterien, deren Produktion einen nicht unerheblichen Netto- CO_2 -/Materialfußabdruck verursachen würde (auch unter der Annahme einer späteren Verfügbarkeit für ein Recycling und damit der Anrechnung möglicher Gutschriften). Für die Einsparungen durch die Nutzungsdauerverlängerung der Batterien in einer zweiten Nutzungsphase wurde auf Ergebnisse von Melin²¹⁵ zurückgegriffen, die im Rahmen eines Reviews bestehender Ökobilanzierungen auf die Spannweite von Abschätzungen zum kumulativen Energieaufwand (KEA) pro Batterie hinweisen.²¹⁶ Basierend auf den Daten von Peters et al. 2017²¹⁷ und in Abstimmung mit den Expertinnen und Experten der Arbeitsgruppe wurde ein KEA von 1.200 Megajoule pro Kilowattstunde Kapazität angenommen.²¹⁸

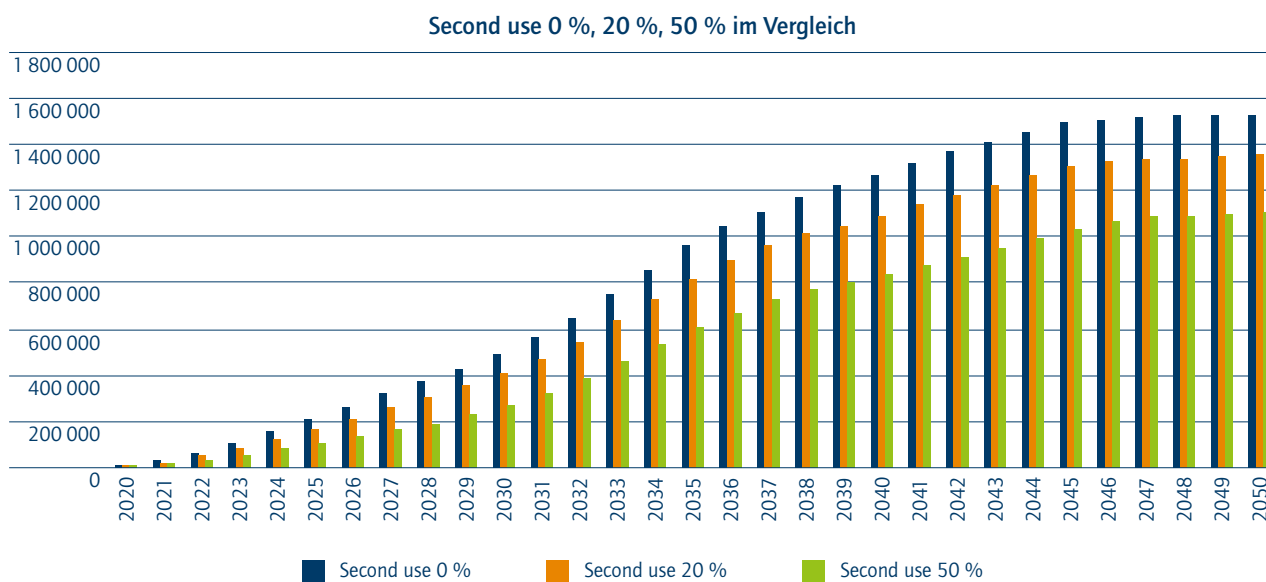


Abbildung 33: Jährliches Aufkommen an Fahrzeug-Altbatterien von 2020 bis 2050 bei Second Use 0 Prozent, 20 Prozent und 50 Prozent (Quelle: Wuppertal Institut)

215 | Vgl. Melin 2019b.

216 | „In some of the most referred reviews of previous literature the cumulative energy demand for battery productions are within ranges such as 500 MJ/kWh–2000 MJ/kWh (average 1030), 316 MJ/kWh–2,318 MJ/kWh (most likely 960), 349 MJ/kWh–651 MJ/kWh and 2.4 MJ/kWh–1062 MJ/kWh.“ Vgl. Melin 2019a, S.3.

217 | Vgl. Peters et al. 2017.

218 | Für die Abschätzung von CO_2 -Emissionen wurde hier zunächst der aktuelle Strommix Deutschlands (2019) angenommen, vgl. Umweltbundesamt 2020.



Instandsetzung

Neben der Verwendung von Batterien für andere Zwecke ist ein im Sinne der inneren Ringe einer Kreislaufwirtschaft noch näher liegenderer Ansatz die verlängerte Nutzungsdauer der Batterien für ihren ursprünglichen Zweck durch ein Refurbishment. Dieser Hebel setzt an, bevor die Batterie so weit an Kapazität verliert, dass sie für ihren eigentlichen Zweck nicht mehr nutzbar ist.

Analog zur zukünftigen Marktrelevanz von Second Life finden sich in der Literatur auch sehr unterschiedliche Einschätzungen zum Thema Instandsetzung sowohl zur Marktrelevanz als auch zu den damit verbundenen Einspareffekten. So haben beispielsweise Kampker et al.²¹⁹ in einer Studie die ökonomischen und ökologischen Effekte einer Refabrikation (Remanufacturing) von Batterien aus batterieelektrischen Fahrzeugen (Battery Electric Vehicles, BEV) abgeschätzt und dabei eine Reduktion des Kumulativen Energieaufwands (KEA) pro Kilowattstunde Batteriekapazität von 224,1 Megajoule berechnet – das entspräche einer theoretischen Reduktion des Energiebedarfs von circa 20 Prozent gegenüber den hier verwendeten Annahmen für die Primärproduktion einer Batterie. Unter anderen Annahmen zur weiteren Lebensdauer der Batterien nach der Instandsetzung kommen Richa et al. zu 49 Prozent Einsparungen des KEA.²²⁰ Ein im Rahmen des Forschungsprojekts LiBRi durchgeführtes Life-Cycle-Assessment (LCA) zeigt darüber hinaus, dass bei einem Zellaustausch von nur 5 Prozent Einsparungen von 95 Prozent Treibhausgasemissionen erreicht werden können.²²¹ Vor dem Hintergrund der Spannweite dieser Angaben wurde für die weiteren Berechnungen eine Einsparung von achtzig Prozent des Kumulativen Energieaufwands (KEA) pro Batterie durch Instandsetzungsmaßnahmen angenommen. Die Batterien werden dann in den ursprünglichen Fahrzeugen wiederverwendet.

Hinzu kommen nach Angaben von Kampker et al.²²² signifikante Kosteneinsparpotenziale, die am Beispiel der Lithium-Ionen-Batterie eines Chevrolet Volts auf vierzig Euro pro Kilowattstunde gegenüber einer neuen Batterie geschätzt wurden. Mit steigenden Skaleneffekten könnten diese Einsparungen auf bis zu sechzig Euro pro Kilowattstunde gesteigert werden, was einer Einsparung von einem Drittel gegenüber einer Neubatterie entsprechen würde. Sowohl im Bereich der Batterieherstellung als auch beim Remanufacturing-Prozess sind in den letzten Jahren äußerst

dynamische Preisentwicklungen zu beobachten gewesen: Für die Batteriekosten war das Joint Research Centre der Europäischen Union (JRC) noch 2017 von Kosten in Höhe von 215 Euro pro Kilowattstunde ausgegangen,²²³ aktuelle Prognosen von Bloomberg New Energy Finance (BNEF) für das Jahr 2030 gehen von circa 55 Euro pro Kilowattstunde aus.²²⁴

Würden ab dem Jahr 2030 25 Prozent der Batterien, die das Ende ihrer Nutzungsphase erreichen (Annahme: Export 10 Prozent, 0 Prozent Second Life), einer Instandsetzung zugeführt, ergäbe sich unter der Annahme eines Durchschnittspreises von 55 Euro pro Kilowattstunde und eines konstanten Einsparpotenzials von 33 Prozent der Kosten einer Primärbatterie eine Einsparung von circa 5,3 Milliarden Euro und 282 Petajoule Energiebedarf.

Annahmen zu erreichbaren Rückgewinnungsquoten

Für die Produktion von Sekundärrohstoffen müssen diese in den Batterien enthaltenen Metalle am Ende ihrer Nutzungsphase durch Recyclingprozesse zurückgewonnen werden. Dabei ist die tatsächliche Rückgewinnungsquote für einzelne Rohstoffe aus den Batterien entscheidend, nicht zum Beispiel die abfallrechtliche Verwertungsquote, die zum einen auf das gesamte Fahrzeug bezogen wird, insbesondere aber daran gemessen wird, welche Anteile einer Verwertung zugeführt werden und nicht daran, welche Anteile der verschiedenen Rohstoffe am Ende im Kreis geführt und einer erneuten Nutzung zugeführt werden können.

Aus einer solchen systemischen Perspektive sind für die Rückgewinnung von Metallen aus Batterien zwei aufeinanderfolgende Prozesse zu differenzieren:

- Im ersten Schritt müssen die Batterien in ihre Einzelteile zerlegt werden, dies passiert in der Regel durch einen Schredderprozess; alternative Prozesse sind aktuell in der Entwicklung.
- Im zweiten Schritt werden die so aufbereiteten Metalle verschiedenen hydro- beziehungsweise pyrometallurgischen Verfahren unterzogen. Die Systemgrenzen des Recyclingprozesses sind im Gesamtbericht der Arbeitsgruppe dargestellt.

Angesichts der zahlreichen Aktivitäten im Bereich der Forschung und Entwicklung zum Thema des Recyclings von Batterien²²⁵ sind hier in der wissenschaftlichen Literatur verschiedenste Angaben

219 | Vgl. Kampker et al. 2016.

220 | Vgl. Richa et al. 2017b.

221 | Vgl. Daimler AG 2014.

222 | Vgl. Kampker et al. 2016.

223 | Vgl. Lebedeva et al. 2018.

224 | Beziehungweise 62 US-Dollar in konstanten Preisen von 2018. | Vgl. Goldie-Scot 2019.

225 | Vgl. Melin 2019b.

zu finden, zu welchen Anteilen Rohstoffe wie Lithium, Kobalt oder Nickel in einem optimierten Recyclingsystem zurückgewonnen werden könnten. Im Rahmen der Arbeitsgruppe Traktionsbatterien wurde dazu aufbauend auf der Fachexpertise aus Industrie und Wissenschaft sowie akademischer Forschung die in der folgenden Tabelle dargestellte Übersicht zu anzustrebenden Rückgewinnungsraten erarbeitet. Diese stellen ambitionierte, jedoch in der Praxis realistischerweise kommerziell umsetzbare Werte dar – unter Berücksichtigung des gesamten Recyclingprozesses und der hochqualitativen Rückgewinnung der Kombination der genannten Stoffe.

Material	Empfohlene Rückgewinnungsraten 2030
Lithium	85 %
Kobalt	90 %
Nickel	90 %
Kupfer	90 %
Stahl	95 %

Tabelle 5: Optimierte Rückgewinnungsraten für Rohstoffe aus Traktionsbatterien (Quelle: eigene Darstellung)

Auf der Basis dieser Annahmen zum Materialgehalt pro Batterie, der Menge der ausfallenden Batterien sowie der Gesamtrückgewinnungsquoten wurden für jede der insgesamt sechs Szenariovarianten (Exportquote 10 Prozent und 50 Prozent; Second Life 0 Prozent, 20 Prozent und 50 Prozent) die Gesamtmenge der in den Jahren 2020 bis 2050 zurückgewinnbaren Rohstoffe bestimmt.

Annahmen zur Reduktion des Kumulierten Energieaufwands (KEA) durch optimiertes Recycling

Recyclingprozesse lassen sich mit Blick auf eine Vielzahl unterschiedlicher Zielgröße optimieren, zum Beispiel Kosten, Umweltmissionen oder Energieverbräuche im Recycling.²²⁶ Im Fokus der hier angestellten Betrachtungen stehen die Beiträge einer

Kreislaufwirtschaft zum Klima- und Ressourcenschutz, daher sollen im Folgenden speziell die Reduktionen des kumulierten Energieaufwands als Indikator für den notwendigen Energieinput abgeschätzt werden.

Hierzu sind insgesamt zwei verschiedene Aspekte zu berücksichtigen:

1. Die Rückgewinnung von Rohstoffen wie Lithium, Kobalt oder Nickel sowie der weiteren enthaltenen Materialien führt zur Einsparung von Ressourcenverbräuchen und assoziierten Sozial- und Umwelteffekten wie zum Beispiel Treibhausgasemissionen, weil damit die Produktion neuer Rohstoffe ersetzt werden kann.
2. Gleichzeitig sind auch mit den dafür notwendigen Recyclingprozessen Ressourcen- und Energieverbräuche verbunden, die bei der Berechnung von Nettoeinsparungen berücksichtigt werden müssen.

Zu 1) Für die Bestimmung der konkreten Einsparungen durch Lithium, Kobalt und Nickel wurde auf die Datenbank ecoinvent 3.6²²⁷ zurückgegriffen, die hierzu Daten für die notwendige Primärgewinnung bereitstellt. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass diese Werte natürlich immer nur einen durchschnittlichen Prozess darstellen können, von denen konkrete Prozesse in der Realität deutlich abweichen können. Für die Gutschriften der weiteren Materialien aus der Batterie- und Modulzerlegung wurde auf die Ergebnisse von Buchert et al. 2019²²⁸ zurückgegriffen. Hier wurde von einer Rückgewinnung in Batteriequalität ausgegangen, sodass im gleichen Ausmaß Primärmaterial eingespart werden kann.

Zu 2) Für die notwendigen Aufwendungen für den pyrometallurgischen Rückgewinnungsprozess wurde analog auf die Prozessbeschreibung aus ecoinvent 3.6²²⁹ zurückgegriffen. Hier wird er mit 20,02 Megajoul pro Kilogramm Batterie angegeben. Auch hier ist zu berücksichtigen, dass die Werte für konkrete Anlagen mit ihren technischen Fortentwicklungen im Einzelfall andere Werte aufweisen könnten.²³⁰

226 | Vgl. Worrell/Reuter 2014.

227 | Vgl. Wernet et al. 2016.

228 | Vgl. Buchert et al. 2019.

229 | Vgl. Wernet et al. 2016.

230 | Der hier auch in der neuesten Version von ecoinvent dokumentierte Prozess verwendet Daten aus dem Jahr 2007, der natürlich weder den Prozess in 2020 noch in 2050 exakt abbilden kann. Insofern wurde hier vereinfachend auf die aktuellsten, öffentlich verfügbaren Daten zurückgegriffen.



I Pilotsteckbriefe

Pilotsteckbrief I: „Kenntnis des Batterielebens“

1 Motivation und Zielsetzung

Der Pilotsteckbrief I „Kenntnis des Batterielebens“ ist eine vertiefte Ergänzung zu Kapitel 4.1 im Gesamtbericht und beschreibt konkrete Handlungsempfehlungen. Deren Umsetzungen gewinnen mit dem geplanten Anstieg der Elektromobilität in Deutschland wesentlich an Bedeutung, da die zunehmende Herstellung von Lithium-Ionen-Batterien mit negativen Umwelteinflüssen und steigenden Abhängigkeiten von Ressourcen einhergeht.

Eine Entkopplung oder Reduzierung dieser Einflüsse und Abhängigkeiten kann durch eine stärkere Kreislaufführung herstellungs- und umweltintensiver Stoffe im Sinne der Circular Economy erreicht werden. Für die wirtschaftliche Umsetzung der damit einhergehenden unternehmens- und lieferkettenübergreifenden Zusammenarbeit sowie einer ökonomischen, ökologischen und effizienten Regulierung der Kreislaufführung spielt die Nutzung von Daten und Informationen aus den Batterielebenszyklen eine zentrale Rolle. Für deren Bereitstellung durch die jeweiligen Akteure müssen Anreize sowie einheitliche Standards geschaffen werden. Die vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Aktivitäten *Industrial Data Spaces* und *Product Passports* bieten hierzu wertvolle Vorarbeiten.

Mit diesem Pilotsteckbrief soll der Rahmen einer unternehmensübergreifenden Informationsplattform zur Förderung der Kreislaufführung von Lithium-Ionen-Batterien abgesteckt werden, um auf dieser Basis weiterführende Arbeitsgruppen, Forschungsprojekte und Umsetzungsplanungen zu ermöglichen.

1.1 Momentane Herausforderungen im System

A Fehlende Datenlage erschwert die Kreislaufführung und Bewertung der Effekte

- i Ökonomisch-ökologische Bewertung
Aktuell sind Angaben zu Material- und Produkteigenschaften von Lithium-Ionen-Batterien sowie zu den Beiträgen von Second Life und Recycling unzureichend verfügbar, weshalb eine belastbare Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Assessment) sehr aufwendig ist. Das fehlende Vertrauen in die Umweltverträglichkeit dieser Batterien wird durch eine geringere Akzeptanz von Konsumierenden zur

Herausforderung für die Elektrifizierung des Individualverkehrs. Damit dieser Aspekt für politische Maßnahmen nicht zum kritischen Umsetzungsrisiko wird, werden Daten zur Bewertung der Umwelteffekte (insbesondere Dekarbonisierung) und zur Sicherstellung ethischer Wertschöpfungsketten benötigt. Auf der Ebene der Europäischen Union wurden diese Notwendigkeit bereits erkannt und erste Maßnahmen geplant, wobei der Bedarf an Daten und die Art und Weise der Erfassung bislang undefiniert sind.

ii Planung, praktische Gestaltung und Monitoring der Kreislaufführung

Auch bei der Weiterverwendung und beim Recycling von Altbatterien bedarf es einer fundierten Datenbasis für eine effiziente Gestaltung der Wertschöpfung und -erhaltung. Eine Datenbasis ermöglicht es, das weitere Nutzungspotenzial am Ende eines Batterielebenszyklus einzuschätzen, die Effektivität von kreislaufwirtschaftlichen Prozessen zu analysieren und nachhaltige End-of-Life(EoL)-Strategien zu entwickeln. Akteure in der Verwertungskette sind für die praktische Umsetzung auf valide Daten angewiesen, Aufsichtsbehörden können ohne belastbare Daten zur End-of-Life-Phase kein Monitoring zur Einhaltung der gesetzlichen Vorgaben und zum Grad von Zirkularität und Recycling durchführen. Von besonderer Bedeutung in diesem Kontext sind dabei auch dynamische Daten zum Verbleib der Traktionsbatterien und zum Ort und Zeitpunkt der Verwertung, einschließlich der Qualität der eingesetzten Prozesse.

B Export inlandsproduzierter Batterien erschwert die Kreislaufführung

Der Verkauf von Elektroautos ist auf dem europäischen Binnenmarkt ohne Ein- beziehungsweise Ausfuhrzölle möglich, wodurch auch in Zukunft in Deutschland produzierte Fahrzeuge in andere EU-Mitgliedstaaten exportiert werden können. Der Anteil aller in Deutschland produzierten und ins EU-Ausland exportierten NeupKW betrug 2018 über 42 Prozent.²³¹ Es ist anzunehmen, dass schon ohne die Berücksichtigung von Altautoexporten eine rein nationale Umsetzung der Kreislaufführung die Rückführquote annähernd halbieren würde. Darüber hinaus werden seit einigen

231 | Eigene Berechnungen, basierend auf DatenVgl. Verband der Automobilindustrie 2020.

Jahren über achtzig Prozent der deutschen Altfahrzeuge in andere EU-Staaten sowie größtenteils in Drittstaaten außerhalb der EU exportiert. Gleichzeitig unterliegt eine Rückführung der verbauten Batterien auf EU-Ebene jedoch besonderen zusätzlichen Herausforderungen hinsichtlich des Notifizierungsverfahrens länderübergreifender Transporte sowie eines EU-weiten Zugriffs auf Informationen der nationalen oder EU-weiten Kreislaufwirtschaftsinitiativen. Während bei den Neuwagenexporten die Wege dokumentiert sind, werden große Anteile der Altautoexporte über Kanäle mit unzureichender Dokumentation exportiert, wodurch Zeitpunkte und Routen nicht nachvollzogen werden können.

Daraus ergibt sich ein Handlungsbedarf in Bezug auf mehr Transparenz bei den Exporten von Altautos und eine schrittweise Erweiterung des Rückführungsgebiets in Abhängigkeit der Marktrelevanz beziehungsweise der Batteriemenge. Es bedarf sowohl einer Ermittlung nationaler Sicherheitsstandards, einer Einordnung von Gefahrgütern sowie Vorgaben für Umschlags- und Vorbehandlungszentren als auch einer Klärung von Anforderungen beziehungsweise Vereinfachungsmöglichkeiten für grenzüberschreitende Transporte innerhalb des europäischen Binnenmarkts.

C Niedrige Rücklaufmengen zu Beginn erschweren die Wirtschaftlichkeit in einer dezentralen Struktur

Der Anteil der zurückgeführten End-of-Life-Batterien ist aktuell noch sehr gering. Mit sinkenden Batteriepreisen und der Steigerung des Verkaufs und der Nutzung von Elektrofahrzeugen werden diese jedoch deutlich zunehmen. Der Anlaufprozess bis zum Erreichen einer stabilen Rücklaufquote wird mehrere Jahre in Anspruch nehmen. Demnach wird ebenso die potenzielle Rücklaufquote der Batterien mit dem Ende ihres Lebenszyklus prognostizierbar. Es ergibt sich ein Handlungsbedarf zur Betrachtung von Second-Life-Nutzung, Rücklaufmenge und deren Verteilung sowie dafür notwendiger Rückführungsstrukturen. Weitere Details hierzu werden im Pilotsteckbrief III „Demontage-Netzwerk für Traktionsbatterien“ näher erörtert.

D Unternehmensübergreifende Kooperation im wettbewerblichen Bereich benötigen verbesserte Rahmenbedingungen

Stoffströme von Batterien und deren Komponenten zu bündeln ist sinnvoll, um den Transport, die Lagerung und die Behandlung ökonomisch und ökologisch effizient zu gestalten. Dies wird speziell vor dem Gesichtspunkt niedriger Einstiegsmengen

ersichtlich. Hierzu sind jedoch Abgrenzungen zwischen Einzel- und kooperativen Vorgehen zu definieren.

Eine wesentliche Rahmenbedingung im Hinblick auf freigegebene Informationen wäre die Schaffung einer Art IDIS for Batteries (International Dismantling Information System). Der Fokus sollte dabei in der glaubhaften und vertretbaren Durchsetzung von Ansprüchen (zum Beispiel gegenüber Versicherungen bezüglich Brandschutzstandards), der Begrenzung von Nebenkosten der Prozesse und der Bereitstellung der notwendigen Informationen und Sicherheitsaspekte für alle Akteure entlang der Rückführungslogistik liegen.

Handlungsbedarf besteht daher hinsichtlich der vielschichtigen Konstellationen der Akteure, des Managements der Batteriesysteme sowie des Informationsaustauschs. Darüber hinaus braucht es eine Identifikation potenzieller Geschäftsmodelle und des erforderlichen Datenbedarfs sowie einer Ermittlung der kritischen und kostentreibenden Prozesse entlang der Wertkette – vom Ende der Nutzungsdauer im Automobilbetrieb (Primary Life) über ein potenzielles Second Life bis hin zur stofflichen Verwertung durch Recycling, unter Berücksichtigung aller Stakeholder.

Neben der Definition des Informationsbedarfs der einzelnen Stakeholder der Wertkette sind die Bedarfe von Datenbesitzern sowie -nutzerinnen und -nutzern, unter Berücksichtigung von Anreizen zur Datenfreigabe, und eine Informationsanalyse durch operative Betriebe als Dienstleistung zu bestimmen. Darüber hinaus ist die Definition notwendiger Standards von Informationen im Sinne eines IDIS for Batteries festzulegen.

1.2 Fokus und Definitionen des Pilotthemas

Ziel des Pilotprojekts „Kenntnis des Batterielebens“ von Traktionsbatterien ist es, die datenbezogenen Anforderungen zur Erfassung und Bereitstellung von Batteriedaten entlang des Produktlebenszyklus zu ermitteln, um die Kreislaufführung zu steigern. Die konkrete Auslegung des Pilotprojekts geht dabei über ein reines Tracking und Tracing im Sinne der Nachverfolgung der Batterien hinaus und beinhaltet eine umfassende Betrachtung von Lebenszyklusdaten. Durch die Bereitstellung dieser Daten (in beide Richtungen, das heißt bei Datenaufnahme und -nutzung) sollen die Transparenz des Materialflusses erhöht, die Herkunft und Umwelteinflüsse, insbesondere von CO₂-Emissionen der Batteriematerialien nachvollziehbarer, der Zustand und Standort der Batterie geklärt und die Überführung in mögliche Second-Life-Anwendungen beziehungsweise die Rückführung in

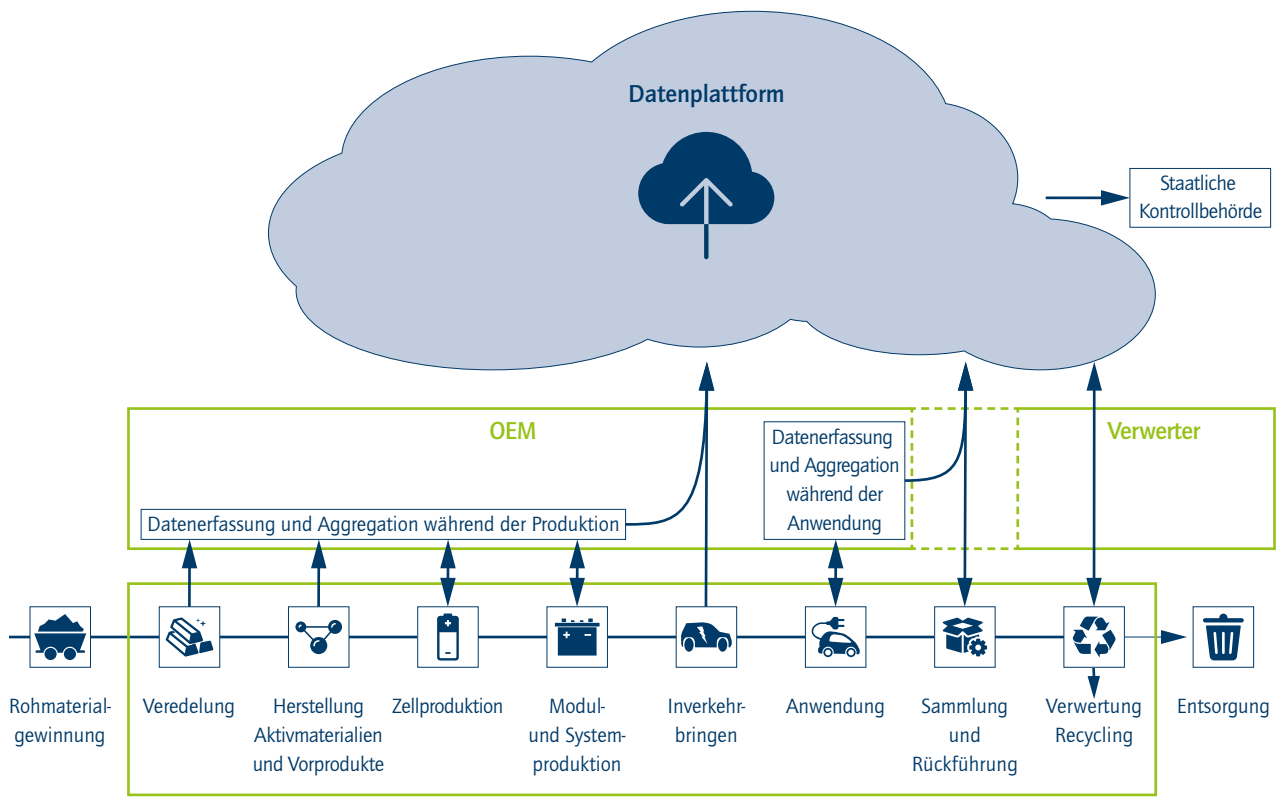


Abbildung 34: Informationsflüsse zur Förderung der Kreislaufführung von Traktionsbatterien (Quelle: eigene Darstellung, angelehnt an die Darstellung des World Economic Forum 2019)

Demontage- und Recyclingzentren effizienter gestaltet und nachgewiesen werden.

In erster Linie soll geklärt werden, wie eine möglichst vollständige Rückführung von genutzten Batterien erreicht werden kann und ob dies in der Praxis auch tatsächlich erfolgt ist. In Abgrenzung zum Pilotsteckbrief II „Modellbasierte Entscheidungsplattform“ fokussiert der Pilotsteckbrief I „Kenntnis des Batterielebens“ primär auf die Bereitstellung dafür notwendiger und nützlicher Daten. Die Implementierung des Pilotthemas dient als gemeinsame „Dateninfrastruktur“ bei der Umsetzung der anderen Pilotthemen.

In der obenstehenden Abbildung 34 ist der erforderliche und potenziell umsetzbare Datenfluss dargestellt. Ein direkter Datenaustausch aller Akteure der Wertschöpfungskette mit der Datenplattform ist durch eine vorherige Aggregation zu sinnvollen Blöcken effizient gestaltet. Die Art der Ausgestaltung hängt jedoch auch stark vom gewählten Geschäftsmodell ab. So sind zum Beispiel bei einem Leasingmodell, hier bleibt der

Fahrzeughersteller oder der Flottenbetreiber über den gesamten Lebensweg der Traktionsbatterie Eigentümer der Batterie, die Datenverfügbarkeit und -verfolgbarkeit, die Regelung von Zugriffsrechten und der Schutz von vertraulichen Daten deutlich einfacher zu gestalten als bei einem „business as usual“, bei dem sich das Eigentum an der Traktionsbatterie mit jedem Fahrzeugverkauf ändert. Dabei ist hervorzuheben, dass benötigte Daten vor oder zu Beginn des Folgeprozessschritts zur Verfügung stehen müssen. Deshalb ist eine zentrale und permanente Datenverfügbarkeit (jedoch keine zwingende, permanente (Live-) Übermittlung) von Bedeutung. Die Erfassung der benötigten Batteriedaten erfolgt über vorangegangene Prozessschritte und könnte im Sinne eines „digitalen Batteriezwilings“ über verschiedene Instanzen bis auf Plattformebene aggregiert werden. Zusätzlich wird die Einrichtung einer unabhängigen (staatlichen) Kontrollinstanz für die Evaluation und für das Monitoring befürwortet.

Im Folgenden werden die Datenanforderungen nach den einzelnen Herstellungsschritten der Batterieproduktion aufgeführt.

Unterschieden wird zwischen notwendigen Daten, die für die Ausführbarkeit der Batteriekreisläufe essenziell sind, und ergänzenden Daten, die die Effizienz der Abläufe, die Rückführungsquote und die Wirtschaftlichkeit weiter erhöhen können. Darüber hinaus wird differenziert, ob die jeweiligen Daten in einem Prozessschritt aufgenommen oder genutzt werden.

 <p>Veredelung</p>	<p>Benötigte Daten aus dem Veredelungsprozess:</p> <ul style="list-style-type: none"> ↑ Rohstoffherkunft (Land/gegebenenfalls Abbauggebiet etc.); zertifiziert als „Responsible Sourcing“ ↑ Land/Ort/Firma des Veredelungsprozesses ↑ Recyclinganteil der Rohstoffe ↑ Ökologischer Fußabdruck des Veredelungsprozesses inklusive Vorstufen
 <p>Herstellung Aktivmaterialien und Vorprodukte</p>	<p>Benötigte Daten aus der Herstellung der Vorprodukte:</p> <ul style="list-style-type: none"> ↑ Zusammensetzung und Angaben über Gefahrstoffe ↑ Verwendete Rohmaterialien ↑ Land/Ort/Firma der Herstellung ↑ Ökologischer Fußabdruck der Herstellung (gegebenenfalls vorgelagerte Prozesse)
 <p>Zellproduktion</p>	<p>Benötigte Daten zur beziehungsweise aus der Herstellung der Batteriezellen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ↓ Zusammensetzung und Angabe über Gefahrstoffe ↓ Verwendete Rohmaterialien ↑ Zellformat (Pouch/Rund/Hardcase beziehungsweise Flüssig-/Fest-Elektrolyt) ↑ Verwendete Zellchemie auf Anoden- und Kathodenseite ↑ Sicherheitsrelevante Demontage-/ Recyclinghinweise – Zelle ↑ Prüfergebnisse aus dem End-of-Line-Test der Zellfertigung ↑ Produktionsdatum (kalendarische Alterung) ↑ Energiebilanz der Fertigung ↑ Produktionsparameter mit Auswirkung auf Zellperformance und Lebensdauer (Porositäten, Flächenkapazitäten, Formierdaten ...)
 <p>Modul- und Systemproduktion</p>	<p>Benötigte Daten zur beziehungsweise aus der Modulherstellung:</p> <ul style="list-style-type: none"> ↓ Zusammensetzungen und Angaben über Gefahrstoffe ↓ Verwendete Zellchemie auf Anoden- und Kathodenseite ↓ Prüfergebnisse aus dem End-of-Line-Test der Zellfertigung ↑ Produktionsdatum ↑ Risikoklasse ↑ Demontageanleitung – Batteriepack und Modul ↑ Sicherheitsrelevante Demontagehinweise – Batteriepack und Modul ↑ Transportbehälter plus Abmessung ↑ Informationen über Thermomanagement (zum Beispiel maximale Temperaturunterschiede im Pack, Kühlraten, Art der Kühlung ...)

Legende

Notwendige Daten (dunkelblau)

Ergänzende Daten (orange)

Datenauftrag (↑)

Datendownload (↓)



 <p>Anwendung</p>	<p>Benötigte Daten aus der Batterienutzung:</p> <ul style="list-style-type: none">↑ Ort (bei Überschreitung der Systemgrenze beziehungsweise Eigentümerwechsel)↑ Interner Zustand (unbeschädigt/defekt unkritisch/defekt kritisch)↑ State-of-Charge (SoC)↑ State-of-Health (SoH)↑ Anzahl der durchgeführten Ladezyklen↑ Weitere für die Bestimmung des Batteriezustandes gegebenenfalls relevante Daten, beispielsweise mittlere Entladetiefe (Depth of Discharge, DoD), mittlere Ladezustände, maximale und mittlere Temperatur, sowie maximale und mittlere Ströme je nach Temperaturen (diese könnten durch intelligente Zyklenanalysen erhoben werden)↑ Über-/Unterschreitung von sicherheits- und leistungsrelevanten Limits, wie zum Beispiel Temperatur, Anzahl Schnellladezyklen, Tiefentladung↑ Gesamtbestand und Lebensdauerabschätzung der Fahrzeuge, zur Bestimmung des erwarteten Sammlungs-/Rückführvolumens zum Zeitpunkt x
 <p>Sammlung und Rückführung</p>	<p>Benötigte Daten aus beziehungsweise für den Sammlungs- und Rückführungsprozess:</p> <ul style="list-style-type: none">↑ Land/Ort/Firma (Datenaufnahme)↓ Ort (Datennutzung)↓ Zustand (unbeschädigt/defekt unkritisch/defekt kritisch)↓ State-of-Charge (SoC)↓ Informationen zur Bestimmung der Transportvorschriften²³²↓ Transportbehälter plus Abmessung↓ Gewicht↓ Erwartetes Sammlungs-/Rückführvolumen zum Zeitpunkt x
 <p>Verwertung Recycling</p>	<p>Benötigte Vorgaben auf Systemebene als Grundlage der Datenbewertung:</p> <ul style="list-style-type: none">↑ Land/Ort/Firma (Verwertungsbetriebe entlang der Verwertungskette)↑ Rohstoffverbleib, real erzielte Second Life Anwendung beziehungsweise Recyclingquote, Nachweis der Outputmassen (zertifiziert als „Responsible Recycling“)↓ Durch Gesetzgeber geforderte Recyclingrate↓ Arten von Nachfolgeanwendungen <p>Benötigte Daten für die Entscheidung über Second Life:</p> <ul style="list-style-type: none">↓ State-of-Health (SoH); inklusive Lebenszyklen↓ Energiebilanz der Fertigung↓ Kalendarisches Alter↓ Zustandsdaten bezüglich Materialien zur ökonomischen Weiternutzung (Derating), abgeleitet aus Material- und Zellparametern

232 | Notwendige Informationen zur Bestimmung der Transportvorschriften einer Batterie: Hersteller, Batterietyp, UN-Nummer der Batterie nach dem Europäischen Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR), Gewicht, Energieleistung, Zusammensetzung und Angabe über Gefahrenstoffe, Angabe zum Material der Batteriegehäuse und Zelle, Informationen über Anforderungen an Lagerung, Handling und Transportbedingungen.

<p>Benötigte Daten für den Verwertungs- und Recyclingprozess:</p> <ul style="list-style-type: none"> ⇓ Zustand (unbeschädigt/defekt unkritisch/defekt kritisch) ⇓ State-of-Charge (SoC) ⇓ Verwendete Zellchemie auf Anoden- und Kathodenseite ⇓ Demontageanleitung – Modul ⇓ Sicherheitsrelevante Demontagehinweise – Modul ⇓ Sicherheitsrelevante Demontage-/Recyclinghinweise – Zelle ⇓ Zellformat ⇓ Prozesshinweise (Einfluss von Verunreinigungen; Automatisierungsmöglichkeit) ⇓ Erwartetes Sammlungs-/Rückführvolumen zum Zeitpunkt x aus Big-Data-Analyse
--

2 Erfolgskriterien für Implementierung

Für eine erfolgreiche Implementierung des Pilotsteckbriefs ist die Mit- und Zusammenarbeit der Akteure von wesentlicher Bedeutung. Um eine Kooperation der einzelnen Akteure zu fördern, bedarf es für die jeweiligen Stakeholder-Gruppen Anreize, die in Abhängigkeit ihrer Interessen und Geschäftsmodelle zur Teilnahme am Piloten motivieren. Zuverlässige Datenbereitstellung und -verfügbarkeit sowie Sicherstellung des Datenschutzes bilden die

Grundlage der richtigen betrieblichen Ausgestaltung und werden im regulatorischen Rahmen des Pilotkonzepts berücksichtigt.

2.1 Übersicht über einzubindende Akteure

Die in Tabelle 6 genannten Akteure sind für eine erfolgreiche Umsetzung des Pilotthemas von erheblicher Relevanz. Dabei ist hervorzuheben, dass ein Akteur mehrere Aufgaben übernehmen

Stakeholdergruppe	Akteur	Kooperationsanreiz
Lieferanten/Hersteller	Rohstofflieferanten	Gesetzlich verordnete Recyclingquoten, Versorgungssicherheit, Nachweispflicht, verantwortungsvoller Ressourcenkonsum
	Batteriekomponentenhersteller	
	Batteriehersteller	
	Fahrzeughersteller	
Nutzer	Nutzer (Privat-/Flottennutzer)	Performancesteigerung durch Daten-bereitstellung/finanziellen Anreiz, ökologisches Bewusstsein
	Betreiber der Ladeinfrastruktur	
Verwerter	Werkstätten, Logistiker	Daten-/Plattformzugang für eigenes Geschäftsmodell im Austausch mit Datenbereitstellung fürs Monitoring
	Wiederverwender, Weiterverwerter	
	Demontagebetriebe/Demontagezentren	
	Recycler (Rohstoffrückgewinnung)	
Service Provider	Service (IT, Tracking & Tracing, Monitoring, Reporting: Dateninfrastruktur- beziehungsweise Plattformbetreiber)	Ausübung/Ausweitung des eigenen Geschäftsmodells (bei staatlicher Forschung und Zertifizierung durch Mittelbereitstellung)
	Forschung und Entwicklung	
	Serviceanbieter für Second Life	
	Energieerzeuger (stationäre Speicher)	
	Zertifizierer/Prüfinstanz	
Regulatoren	Gesetzgebung	Kooperationsanreize nur für privatwirtschaftliche Akteure notwendig
	Genehmigungs- und Überwachungsbehörden	
	Datenschutz	
	Grenzüberwachung (Zoll)	

Tabelle 6: Beteiligte Akteure und Kooperationsanreize des Pilotkonzeptes

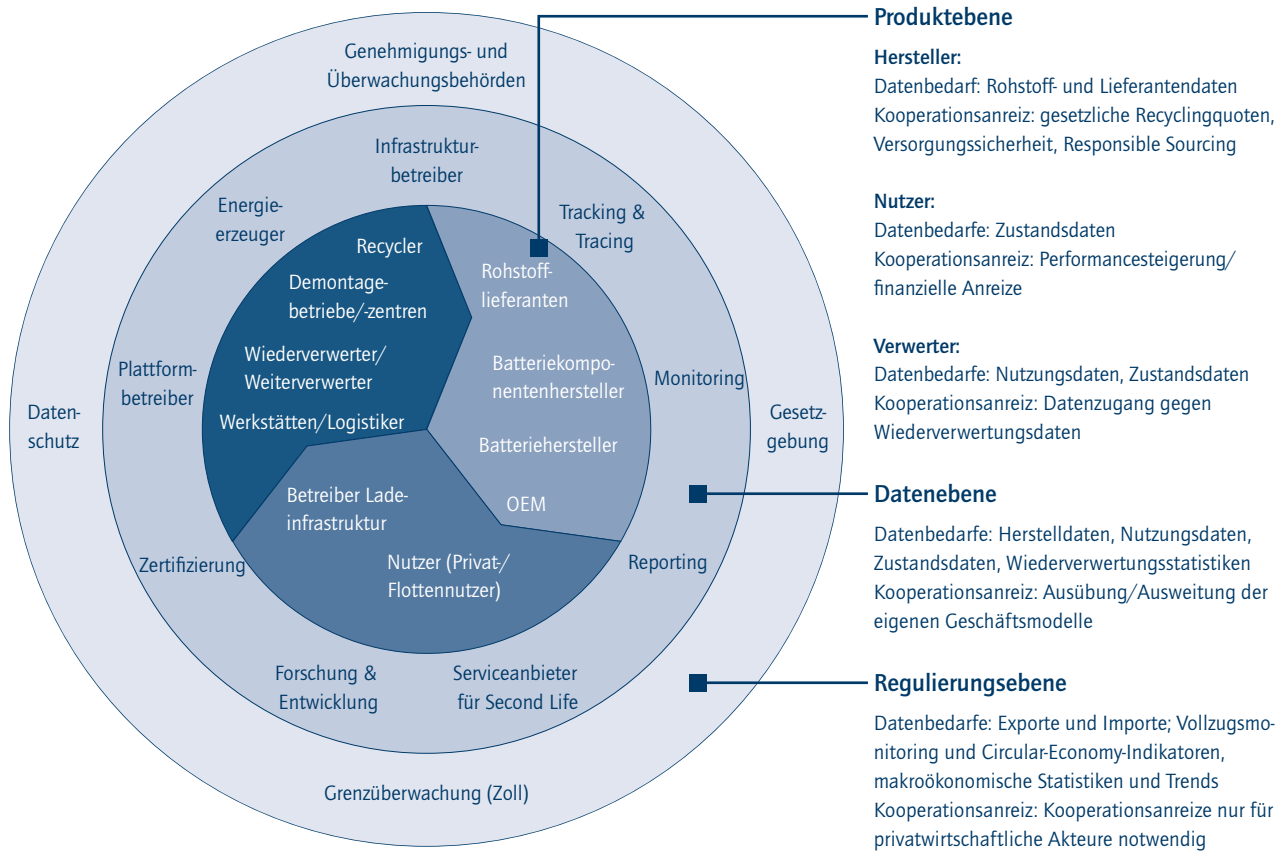


Abbildung 35: Akteure, Datenbedarfe und Kooperationsanreize für eine Pilotumsetzung (Quelle: eigene Darstellung)

kann, aber für manche Aufgaben die Zusammenarbeit mit anderen Akteuren notwendig ist.

2.2 Anforderungen an betriebliche Ausgestaltung

Für eine erfolgreiche Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft im Bereich Lithium-Ionen-Batterien ist es wichtig, alle Akteure entlang der gesamten Wertschöpfungskette einzubinden und die erforderlichen Handlungsschritte frühzeitig zu implementieren. Mit der Vielzahl von Akteuren, wie Zulieferer, Logistiker, Fahrzeughersteller, Betreiber etc., entstehen zahlreiche Übergabepunkte von Daten und physischen Produkten. Eine Herausforderung des Pilotprojektes ist es, diese Übergabepunkte technologisch, organisatorisch und ökonomisch optimal zu gestalten. Grundlage für diese Ausgestaltung bilden die genannten Daten, auf deren Basis die Entscheidungen zur Weiterverwertung (Übergabe von physischen Produkten) getroffen und der Erfolg der vorgeschlagenen Maßnahmen im Sinne der Circular Economy beurteilt werden können (siehe hierzu auch Pilotsteckbrief II

„Modellbasierte Entscheidungsplattform“). Die betriebliche Ausgestaltung der Datenbereitstellung unterliegt dabei sehr hohen Anforderungen, da in einer unternehmens- und lieferkettenübergreifenden Beteiligung die Standorte und Teilnehmer variieren können.

A Datenhaltung (lokal versus zentral)

Grundsätzlich könnten die Daten lokal oder zentral abgelegt werden. Bei einer lokalen Lösung sind die Daten räumlich nah an der Batterie abgelegt und stehen erst dann zur Verfügung, wenn sie über ein entsprechendes Programm ausgelesen werden. Das kann zum Beispiel in einer Werkstatt oder im Recyclinghof erfolgen. Wenn allerdings Fahrzeuge oder Batterien aus dem Kreislauf entnommen werden (zum Beispiel durch Export), sind bei einer lokalen Datenablage diese Daten nicht verfügbar. Im Gegensatz dazu werden bei einer zentralen Datenablage die Daten mittels geeigneter IT-Infrastruktur an einem zentralen Ort gespeichert (Cloud, Server des Datenowners) und können

jederzeit von verschiedenen Akteuren abgerufen werden. Da eine lokale Datenspeicherung den Aufwand verringert, jedoch zentrale Auswertungen und neuartige Ansätze wie das Datenmining oder Korrelationsanalysen erschweren, ist voraussichtlich eine kombinierte Datenhaltung anzustreben.

B Zugriff (rollenbasiert)

Die zur Batterie abgelegten Daten dürfen nicht von jedem am Lebenszyklus der Batterie beteiligten Akteure gleichermaßen gelesen oder bearbeitet werden. Lese- und Schreibrechte müssen entsprechend der Akteursrolle definiert sein. So wird in der Regel lediglich der Batteriehersteller relevante Informationen zu den Bestandteilen der Batterie sowie deren Konstruktion ablegen. Andere Informationen wie Serviceinformationen sind für seine Rollenfunktion von geringerer Bedeutung.

C Datentransparenz

Darüber hinaus muss ersichtlich und nachvollziehbar sein, wann welche Daten erzeugt oder verändert hat.

Es ergeben sich für die zentrale Datenplattform des Pilotprojektes folgende Anforderungen:

 <p>Datenplattform</p>	<p>Anforderungen an die zentrale Datenplattform:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Verfügbarkeit ▪ Strukturierte Datenablage und standardisiertes Format ▪ Ausreichend Speicherkapazität und Performance (Erweiterbarkeit) ▪ Sicherheit und Schutz vor Manipulation ▪ Datentransparenz/Nachverfolgbarkeit ▪ Rollenbasierter Zugriff ▪ Zentraler Zugriff (Potenzial für Big Data) ▪ Zugriff/Schnittstellen für Weiterverwendung (zum Beispiel Enterprise Resource Planning/Customer Relationship Management)
---	---

Der jeweilige Beitrag zum Gesamtnutzen des Pilotprojektes ist für die verschiedenen Akteure entlang der Wertschöpfungskette unterschiedlich. Dabei den individuellen Beitrag zu maximieren, gestaltet sich als Herausforderung für die betriebliche Ausgestaltung.

Hierbei sollte auf die Betriebsdatenhoheit der Fahrzeughersteller eingegangen werden, da das aus den Daten resultierende bessere Verständnis weitreichende Potenziale bietet. Als Beispiel hierfür ist eine effiziente und somit kostengünstige Handhabung der Batterien von der Erstanwendung im Auto über die Transportlogistik bis zu den Weiterverwendern und den anschließenden Endverwertern zu nennen. Eine lückenlose Datenlage ist hierfür wesentlich. Die Verfügbarkeit der Daten der Fahrzeugteilehersteller über die Erstanwendung und das entsprechende Batterieverhalten ist daher als einer der wichtigsten Punkte identifiziert worden. Diesbezüglich müssen verstärkt Anreize für die Fahrzeughersteller zur Bereitstellung von Betriebsdaten geschaffen werden.

Für die Logistik (sowohl von Erst- nach Zweitnutzung und Endwertung) sind vor allem Planungssicherheit und Reduzierung von Sicherheitsmargen ein sinnvolles und erstrebenswertes Ergebnis. Verfügbarkeit und Zustand der Batterie sollten zu jedem Zeitpunkt eingeschätzt und Transportwege effizient geplant werden können.

Eine Effizienzsteigerung durch bessere ökonomische Ausgestaltung der Prozesse ist ein angestrebter Mehrwert bei einer Weiternutzung der Daten durch Dritte. Der Zustand der Batterie korreliert direkt mit deren Restwert und einer möglichen Weiternutzung in Zweitanwendungen. Bei bekannter Datenlage können somit aufwendige Tests zur Zustandseinschätzung deutlich reduziert werden. In einem geregelten Top-down-Ansatz kann von der angestrebten Datenlage sowohl die Forschung als auch die Entwicklung profitieren. Ist die Performance und Sicherheit aktueller Batteriesysteme bekannt, lassen sich künftige Entwicklungen besser auf den Marktbedarf abstimmen. Da kein Zugriff auf CAN-Schnittstellen (Controller Area Network, CAN) möglich ist, erfolgt die momentane Datenerhebung in aufwendigen Labortests und Prognosen. Folgende Punkte bedürfen ebenfalls einer weitergehenden Betrachtung und sollten bei Ausgestaltung des Datenhandlings verstärkt berücksichtigt werden:

Besitzverhältnisse und Haftung: Bisher gibt es keine etablierten Geschäftsmodelle, die eine klare Struktur der Besitzverhältnisse von Batterien und Daten und damit die Haftungsrisiken definieren.

Optimum für Wechsel von Erst- auf Zweitnutzung: Zur Abschätzung des Marktpotenzials für Second-Life-Anwendungen muss die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung aus Kundensicht berücksichtigt werden. Es ist realistisch anzunehmen, dass Batterien lange (etwa 12 Jahre bis verbleibenden 80 Prozent State of Health) in ihrer ersten Anwendung bleiben. Bei einer



verschleißabhängigen Abnahme der Restreichweite des Fahrzeugs wird die Nutzerin oder der Nutzer ihr/sein Verhalten umstellen beziehungsweise das Auto an eine weniger anspruchsvolle Nutzerin oder einen weniger anspruchsvollen Nutzer verkaufen. Der Ersatz einer Batterie in einem PKW ist wirtschaftlich nur unter bestimmten Voraussetzungen sinnvoll, wie zum Beispiel bei einer Erhöhung der Gesamtnutzungsdauer oder durch Preisanreize.

Datengrundlage für stationäre Weiternutzung: Viele Daten, die auch schon für die Diagnostik in der Erstinutzung benötigt werden, können auch für die Analyse und Auslegung einer Zweitnutzung zum Einsatz kommen. Das statische Konzept von Erst- und anschließender Zweitnutzung in einer stationären Anwendung ist jedoch nicht immer zutreffend (siehe oben). Hier ist Transparenz bereits im ersten Leben der Batterie notwendig, beispielsweise für Reparaturen oder Einschätzungen des Batterierestwerts und der Verwendungsmöglichkeiten. Ein direkter Zugang über die Fahrzeugschnittstelle (CAN-Bus) wäre die effizienteste Lösung. Diese ist allerdings nur dem Fahrzeughersteller zugänglich.

Daher müssen die Datenbesitzer (insbesondere Batteriehersteller und Fahrzeughersteller) einen eigenen Mehrwert aus der Datenbereitstellung ziehen. Das Aufzeigen von Potenzialen beziehungsweise die Incentivierung, die mit der Datenbereitstellung einhergeht, ist für den Umsetzungserfolg von großer Bedeutung. Ein mögliches Beispiel für solch einen Anreiz ist eine Kostenreduktion innerhalb der einzelnen Wertschöpfungsstufen entlang des Lebenszyklus.

Darüber hinaus bietet die Datenbereitstellung für Forschung und Entwicklung, speziell für institutionelle Anbieter, enorme Innovationspotenziale. Auch für die Kundin oder den Kunden kann es ein Anreiz sein, wenn auf Basis einer genauen Zustandsbewertung der Kauf- oder Wiederverkaufswert eines Gebrauchtwagens wertgerecht bemessen werden kann. Damit steigt ebenfalls die Glaubwürdigkeit durch unabhängige Tests und Gutachten (analog zu TÜV, Dekra ...).

Aggregation von Produktions- und Betriebsdaten: Ein weiterer wichtiger Punkt ist die zwischenzeitliche Aggregation von Daten zur Komplexitätsreduzierung und Effizienzsteigerung, die in Zusammenarbeit mit den Industrieunternehmen erfolgen sollte. Wesentliche Elemente sind die Ausgestaltung von Datenrechten, Datenschutz und der Schutz vor Manipulation. Hierbei sind verschiedene Konzepte möglich. Denkbar wäre eine Zusammenstellung relevanter Daten beim Fahrzeughersteller und die anschließende Weiterleitung an eine Datenbank. Batterieparameter und Nutzungsverläufe sowie sicherheitsrelevante Ereignisse liegen

demnach vor. Hier könnte eine standardisierte Übergabeschnittstelle zur Datenplattform bereitgestellt werden.

2.3 Anforderungen an regulatorische Rahmenbedingungen

A Relevante Aspekte für die Regulierung

Wesentliche Aspekte für eine Regulierung sind neben der Erhebung und der Relevanz der Daten die Materialien und zustandsbezogenen Daten der Traktionsbatterien (zum Beispiel die verbauten Materialien sowie die Daten zum Batteriesystem, Recycling und Reuse). Ebenso sind ein hoher Datenschutz und die Privatsphäre von besonderer Bedeutung. Auf Nutzungsebene sind die Nachweispflichten über die Weiterverwendung, etwa bei Pfandsystemen sowie die Ortung der Batterie zur Nachverfolgung bis zum End-of-Life und entlang der Recyclingkette eine Herausforderung. Angaben zum Recyclinginhalt, dem Recyclinganteil der Batterie sowie zur Batteriesicherheit (zum Beispiel durch die Einführung eines elektrischen Siegels) spielen im Rahmen der Weiternutzung oder Wiederverwertung eine wichtige Rolle. Darüber hinaus sind Aspekte wie Datenbesitz, -transfer, -zugriff, -validierung und Manipulationsschutz regulativ zu gestalten.

B Mögliche Regularien

Vorzugsweise ist beim Bereitstellen und Teilen von Batteriedaten natürlich auf die Selbstverpflichtung der beteiligten Akteure und deren freiwillige Teilnahme zu setzen. Anreize können dieses Vorgehen unterstützen. Weitergehend ist die Entwicklung beziehungsweise Festlegung von Standards maßgeblich, speziell im Hinblick auf die große Anzahl von unterschiedlichen Akteuren. Darüber hinaus könnte eine Verpflichtung zu einem Reporting denkbar sein, die mit dem Reporting von Verbrauchsdaten von Verbrennern an die EU vergleichbar ist. Abschließend könnten finanzielle Anreize, das heißt Boni oder Strafzahlungen, zur Durchsetzung und Steuerung der gewünschten Umsetzung zum Einsatz kommen.

3 Erwartete Impact-Potenziale des Pilotprojekts

Durch die im Pilotprojekt geplante Bereitstellung von Daten über den Batterielebenszyklus sind positive Effekte für die jeweiligen Eigentümer und Wertschöpfungsteilnehmer, die Branche sowie auf volkswirtschaftlicher, gesellschaftlicher und ökologischer Ebene zu erwarten. Da die zukünftigen Eigentumsverhältnisse der Traktionsbatterien stark von noch zu entwickelnden Geschäftsmodellen abhängen und sich über den Lebenszyklus verändern können, bedarf die Einflussnahme auf die Eigentümer einer

noch weitergehenden Betrachtung. Grundsätzlich bietet die Unterstützung einer effizienten Bewertung und Ausweitung der Nutzungsdauer im Sinne einer Second-Life-Anwendung oder des Recyclings zusätzliche Effizienzgewinne durch ökonomisch-ökologisch sinnvolle Pfadentscheidungen. Darüber hinaus eröffnen sich durch die bereitgestellten Daten Kostensenkungspotenziale für Logistik- und Demontagebetriebe sowie für die Prozesskette der Materialrückgewinnung.

Eine aufbereitete Datenlage bietet zudem das Potenzial, Ressourcen effizienter einzusetzen und durch die damit einhergehende Planungssicherheit eine effizientere Investitions- und Kapitalplanung zu begünstigen. Des Weiteren beinhaltet es die Möglichkeit, Transparenz für Konsumierende und politische Entscheidungen zu erzeugen.

4 Handlungsempfehlungen und Roadmap

Um die genannten Batteriedaten für eine wirtschaftliche Umsetzung und eine ökonomische/ökologische und effiziente Regulierung erfassen und bereitstellen zu können, ist die Sicherstellung der Datenverfügbarkeit im Hinblick auf die übergeordnete Zusammenarbeit der unterschiedlichen Akteure sowie einer Bewertung der Batterien im Sinne der Kreislaufführung das zentrale Element. Auch muss aufgrund der Vielzahl von Datenbereitstellern und -nutzern die Interoperabilität der Daten durch einheitliche Standards gewährleistet sein.

Aus datenrechtlichen und unternehmenspolitischen Gründen sind die Verfügbarkeit der Daten sowie deren Bereitstellung an Dritte (zum Beispiel für Forschungsprojekte) klar und einheitlich zu definieren und rechtlich abzusichern.

Darüber hinaus ist zu definieren, wie die operative Ausgestaltung einer Plattform erfolgen soll, das heißt, auf welche Art und Weise (zum Beispiel als Platform as a Service (PaaS)) und durch wen sie betrieben und weiterentwickelt wird. Im Zuge dessen sind zudem die notwendigen und ergänzenden Auswertungen festzulegen, die den Betrieb der Kreislaufführung unterstützen und verbessern können.

4.1 Handlungsempfehlungen an Politik, Wirtschaft und Wissenschaft

Im Folgenden werden nach Adressaten unterteilte Handlungsempfehlungen aufgeführt. Dabei ist wichtig, dass einzelne Empfehlungen die Zusammenarbeit zwischen Politik, Wirtschaft und Wissenschaft erfordern können. Darüber hinaus gibt es

Empfehlungen, die sich gegenseitig bedingen und die eine Umsetzung nur in der Gesamtheit nahelegen (zum Beispiel bei der Erforschung, Gesetzgebung und Anwendungsunterstützung des Monitorings).

4.1.1 Politik

- Kohärenz mit nationalen und internationalen gesetzlichen Datenanforderungen erzeugen (Abfallgesetzgebung, Kreislaufwirtschaft, Energie- und Ressourceneffizienz, Klimaziele, Chemiekaliengesetzgebung/REACH)
- Vereinheitlichung von Kennzeichnungen (Batterie und Materialien) durchsetzen
- Verpflichtende Sammelquoten festlegen
- Vorschriften und Standards für Second-Life-Bewertungen und -Anwendungen festlegen
- Standards für ein qualitativ hochwertiges Recycling definieren und entlang der Verwertungskette verpflichtend vorgeben
- Gesetzliche Grundlage für Tracking und Tracing von Traktionsbatterien schaffen
- Grundlage für einen zentralen Daten-/Plattformzugang und eine entsprechende Nutzung sowie deren Sicherheit schaffen
- Ein Reporting- und Monitoringsystem zur Erfassung und Verfolgung von Batterien (Statistiken und Transparenz) etablieren
- Rechte und Pflichten für Verbraucherinnen und Verbraucher (zur Sicherstellung eines pfandähnlichen Systems; Rückgabe und Rücknahmepflichten) definieren
- Klare und strenge Regelungen für Reuse-Exporte vorgeben
- Anreize für Steigerung der Zirkularität entwickeln

4.1.2 Wirtschaft

- Datenbedarf und Verfügbarkeit definieren (zum Beispiel Informationsmaterial bereitstellen zum Umgang mit den Batterien, Informationen zur Forecast-Erstellung etc.)
- Daten- und IP-Schutz festlegen – mit Einbindung in Datenplattformen
- Datenbasierende beziehungsweise datenbreitstellende zirkuläre Geschäftsmodelle entwickeln und umsetzen
- Vorteile eines zirkulären Ansatzes (über die rein monetären Größen hinaus) systematisch erfassen
- Anforderungen, rechtliche Rahmenbedingungen und Schnittstellen für langfristige Kooperationen definieren
- Sich in Bezug auf Reuse und Second Life von Batterien positionieren
- Recyclingunternehmen zertifizieren
- Bei der Entwicklung von Standards (Recycling und Reuse) mitwirken

4.1.3 Wissenschaft

- Technische und ökonomische Potenziale sowie Grenzen der Zirkularität von Batteriematerialien analysieren
- Ein Zielsystem zur Bestimmung der Zirkularität und damit einhergehender Auswirkungen (allgemeingültige Kenngrößen) entwickeln
- Systemintegration und systemische Optimierung monetärer und nicht monetärer Parameter vorantreiben (zum Beispiel Entwicklung eines Anreizsystems, um Batterieflüsse im Sinne ökologisch sinnvollster („Kreislauf-“)Wege zu beeinflussen)
- Den Nutzen von Datenverfügbarkeit für die Effizienz von Recyclingsystemen quantifizieren
- Modelle und Szenarien für die Bedarfsbestimmung von Rückführungslogistik und Demontageinfrastruktur entwickeln
- Ein Reporting- und Monitoringsystem (mit Politik und Wirtschaft) entwickeln
- Bei der Entwicklung von Standards (Recycling und Reuse) mitwirken
- Eine Datengrundlage für die Bewertung von Batteriezellen und -modulen im Hinblick auf Second-Life-Anwendungen (Test-/Diagnoseverfahren) entwickeln
- Eine Datenplattform und Datenstandards entwickeln
- Ökologische Indikatoren zur Bewertung und Verbesserung des Umwelteinflusses und ethisch korrekter Lieferketten von Lithium-Ionen-Batterien bestimmen

4.2 Gemeinsame Roadmap

Die zur Umsetzung des Pilotthemas notwendigen Hauptarbeitspakete werden in der Abbildung 36 nach Einteilung des Zeithorizonts in kurzfristig, mittelfristig und langfristig dargestellt. Eine zeitliche Verschiebung der Arbeitspakete ist aufgrund von Abhängigkeiten und Wechselwirkungen nur äußerst begrenzt möglich.

Die Umsetzung des Pilotprojekts zur Steigerung der Kreislauf-führung von umweltintensiven Batteriestoffen bedingt neben dem gesetzlichen Rahmen, einer ökonomisch-ökologisch effizienten Regulierung, neuen Geschäftsmodellen und dem damit verbundenen Datenbedarf und deren Verfügbarkeit, dass eine Vielzahl unterschiedlicher Akteure eingebunden werden und eine technisch komplexe Implementierung durchgeführt wird. Durch die vielen daraus resultierenden variablen Einflussgrößen und Abhängigkeiten ist neben absehbaren auch mit nicht vorher-sehbaren Herausforderungen zu rechnen.

4.3 Erwartete Herausforderungen

Da grundsätzlich bereits viele Daten über den Zustand einer Batterie vorhanden, aber nicht verfügbar sind, liegt eine Herausforderung darin, für Fahrzeughersteller und weitere Akteure Anreize zum Teilen von Daten zu schaffen. Dies setzt in einem ersten

Zeithorizont Arbeitspaket	Horizont 1												Horizont 2	Horizont 3
	2021				2022				2023				bis 2027	bis 2030
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4		
Grundlagen für die Nachverfolgbarkeit des Verbleibs über den Lebenszyklus													Dateneinbindung und -schutz (Daten- und IP-Schutz, Einbindung in Datenplattformen); Definition von Reporting Anforderungen; Entwicklung eines Reporting und Monitoring Systems (inkl. Big-Data-Analysen) in Abstimmung mit Wirtschaft und Politik (sowie Integration zu EU-Vorhaben)	Europäische und globale Harmonisierung von Dateneinbindung, Reporting und Monitoring
Definition von Datenbedarfen und deren Verfügbarkeit														
Grundlagen zentrale Datenplattform (+Zugang und Schutz)														
Entwicklung einer interoperablen Datenplattform und notwendiger Standards														

Abbildung 36: Wichtigste Umsetzungsschritte für die Implementierung des Projektsteckbriefs „Kenntnis des Batterielebens“ (Quelle: eigene Darstellung)

Schritt eine deutlichere Spezifizierung der notwendigen Datentypen, ihrer Verfügbarkeit und Sicherheit voraus. Auch Minimalanforderungen hinsichtlich einzuhaltender regulatorischer Rahmenbedingungen (Verpflichtungen, Nachweispflicht, Gewährleistungsregelungen) sind in diesem Zusammenhang weiter zu definieren. Um das Pilotprojekt erfolgreich zu implementieren, müssen (1) die makroökonomischen Potenziale, die mit einer Bereitstellung batteriespezifischer Daten in Verbindung gebracht werden, klarer mit (2) dem spezifischen, unternehmerischen Mehrwert der beteiligten Akteure in Beziehung gesetzt werden.

Technische Herausforderungen ergeben sich zudem bei der Übertragung von Daten in der Demontage und Neuzusammensetzung von Batterien. Auch die kritische Rolle der Endverbraucherin oder des Endverbrauchers ist zu adressieren (insbesondere falls sie/er Eigentümerin/Eigentümer der Traktionsbatterien ist). Darüber hinaus ist die Transparenz und Validität der bereitgestellten Daten über den Batterielebenszyklus zu gewährleisten, weshalb eine unabhängige Auditierung und Zertifizierung sinnvoll werden könnte. Dies gilt auch für die Prüfung und Sicherung datenschutzrelevanter Aspekte und Standards für alle Akteure.

Pilotsteckbrief II: „Modellbasierte Entscheidungsplattform“

1 Motivation und Zielsetzung

Nach der mobilen Nutzung von Lithium-Ionen-Traktionsbatterien (TB) stehen zahlreiche Prozesse mit unterschiedlichen Reifegraden zur Weiternutzung und Reuse²³³ (Aufarbeitung) oder Recycling (Aufbereitung und Metallurgie) zur Verfügung. Diese unterscheiden sich in ihrem ökonomisch und ökologisch benötigten Aufwand und in den erzielten Ergebnissen (Outputmaterialien). Die Aufwände sind neben den Prozessen auch produktspezifisch, da die Batterien mit unterschiedlichen Qualitäten (State of Health) zum Aufarbeiter oder Recycler kommen. Das Interesse des Betreibers der Entscheidungsplattform liegt darin, auf Batterieebene Entscheidungen zu treffen, welche Behandlung (zum Beispiel Life versus Recycling) ökologisch und ökonomisch anzustreben ist. Der Aufbau einer benötigten Entscheidungsplattform – in Verbindung mit den zur Verfügung stehenden Informationen des Pilotsteckbriefs I „Kenntnis des Batterielebens“ und des Pilotsteckbriefs III „Demontagenetzwerk für Traktionsbatterien“ – wird im Pilotsteckbrief II erläutert.

Dieser Pilotsteckbrief bildet mit einer zentralen Wissens- und Fragensammlung eine detaillierte Ergänzung zu diesem Gesamtbericht der Arbeitsgruppe Traktionsbatterien und dient dazu, die Grundlage für Projektausschreibung beziehungsweise Umsetzungsplanung für eine „Modellbasierte Entscheidungsplattform“ anzustoßen (noch im vorwettbewerblichen Rahmen).

1.1 Momentane Herausforderungen im System

Eine effiziente Organisation der Rückführung und die gezielte Verwendung oder Verwertung von Traktionsbatterien erfordern einen systematischen Ansatz. Unternehmen der Kreislaufwirtschaft (unter anderem Logistik, Demontage- und Recyclingunternehmen) sind mit volatilen Preisen für Sekundärrohstoffe, einem unsicheren und heterogenem Angebot an verfügbaren Altbatterien sowie einer unsicheren Nachfrage für eine erneute Verwendung mobiler und stationärer Energiespeicher konfrontiert. Die Aufarbeitung beziehungsweise das Recycling von Traktionsbatterien erfordert zudem bisher zumeist eine aufwendige manuelle Demontage. Weitere Herausforderungen sind die zurzeit noch geringen und stochastischen Schwankungen unterworfenen Rücklaufmengen sowie fehlende Informationen bezüglich der Materialzusammensetzung der Energiespeicher sowie der Energiespeichersysteme. Die Recyclingsysteme prozessieren verschiedene Batterietypen gemeinsam (zum Beispiel mit Nickel-Mangan-Kobalt(NMC)-111- und NMC-622-Kathoden), wodurch sich für den Sekundärmaterialmarkt intransparente Lieferketten entwickeln, bei denen eine (sozial und ökologisch) sichere Herkunft und Materialqualität nicht gewährleistet werden kann.

Demontage

Die aktuelle Situation bei der Durchführung von Demontagetätigkeiten ist von einem stark manuellen Charakter geprägt. Neben einer großen Variantenvielfalt und einem komplexen Aufbau von Traktionsbatterien (insbesondere für batterieelektrische Fahrzeuge) werden Aufkommen und örtliche Verteilung der End-of-Use- und End-of-Life-Energiespeicher auch in Zukunft stochastischen

233 | Vgl. Ardente et al. 2018.



Schwankungen unterworfen sein. Erschwerend kommt hinzu, dass die zur Demontage anstehenden Produkte mit Traktionsbatterien wie zum Beispiel die Elektrofahrzeuge häufig noch nicht demontagegerecht (Design for Disassembly) konstruiert wurden. Der Organisationsgrad in Demontage- und Recyclingunternehmen ist daher in der Regel im Vergleich zu produzierenden Unternehmen als niedriger einzustufen, wodurch Rationalisierungsmöglichkeiten, zum Beispiel durch einen optimierten Einsatz der vorhandenen Betriebsmittel oder durch Arbeitsteilung und die damit verbundene Ausnutzung von Lerneffekten, nicht ausgeschöpft werden. Grenzen für eine Automatisierung in der Demontage von Traktionsbatterien beziehungsweise der zugehörigen Produkte liegen zum einen in der mangelnden Wirtschaftlichkeit aufgrund hoher technologischer Anforderungen infolge der Komplexität der Zerlegeprozesse. Zum anderen fehlt häufig die notwendige Flexibilität, die wegen der Heterogenität der Produkte und Energiespeicher erforderlich ist.

Planung von Demontage- und Recyclingsystemen

Ein wesentlicher Bestandteil der Planung von Demontage- und Recyclingsystemen ist die Bestimmung wichtiger Prozesskenngrößen wie Demontagekosten und -zeiten, Demontagetiefen und -reihenfolgen, der erzielbaren Wiederverwendungs- und Recyclingquoten sowie der erzielbaren Qualitäten und Reinheiten der zurückgewonnenen Materialien (siehe Vertiefung Batterierecycling). Ferner gehört die Auslegung und Dimensionierung eines Demontagesystems (zum Beispiel Anzahl der Stationen, Größe der Puffer, Anzahl an Fördereinheiten) für ein gegebenes Produktspektrum beziehungsweise Energiespeicher zur Planung.

Demontage- und Recyclingnetzwerke

Netzwerken kommt bezogen auf die Kreislaufführung von Produkten im Allgemeinen und Energiespeichern im Speziellen eine wichtige Rolle zu (siehe auch Pilotsteckbrief III

„Demontagenetzwerk für Traktionsbatterien“). Vorteile dieser Kreislaufwirtschaftsnetzwerke liegen unter anderem in der Erreichung von Größendegressionseffekten, in der Verteilung von Risiken und Investitionen auf mehrere Träger, der Sicherstellung einer flächendeckenden Entsorgung und dem Zugang zu an unterschiedlichen Punkten im Kreislauf bereitgestellten Informationen.²³⁴ Ein Stoffstrommanagement umfasst daher zumeist eine Vielzahl kooperierender Unternehmen (Stoffstromnetzwerke, Quellen ergänzen). Dazu gehören auf strategischer Ebene die Konzeption von regionalen Verwertungsnetzen sowie branchenbezogener Planungs- und Organisationsansätze. Auf operativer Ebene zu nennen ist das Product-Recovery-Management, welches auf die Wiederverwendung von Produkten, Bauteilen und Materialien aus Altprodukten abzielt. Bestandteil sind Produktionsplanungs- und Lagerhaltungsmodelle für vernetzte Produktions- und Reproduktionssysteme.

Integrierte Betrachtung

Für die Planung von Demontage-, Weiternutzungs- und Recyclingsystemen ist es zumeist nicht ausreichend, die Perspektive eines einzelnen Aufarbeitungs- beziehungsweise Aufbereitungsunternehmens einzunehmen. Vielmehr müssen die Besonderheiten von Demontage-, Weiternutzungs- und Recyclingnetzwerken (Stoffstromnetzwerken) berücksichtigt werden. In der Praxis werden methodische Ansätze zur optimalen Steuerung von Unternehmen und Netzwerken, etwa auf Basis von Operations-Research-Ansätzen, bisher nur vereinzelt eingesetzt. Kommerzielle Systeme zur Produktionsplanung und -steuerung, wie sie heutzutage bereits in der Fertigung von Energiespeichern eingesetzt werden, können nicht direkt auf die Demontage- und Recyclingplanung übertragen werden, da die dort vorhandenen Kuppelproduktionsprozesse oft nicht modellierbar sind. Darüber hinaus muss eine frühzeitige und valide Entscheidung getroffen werden, welche Produkte sinnvoll einem Second Life und welche einem Recycling zugeführt werden.

234 | Vgl. Steinborn et al. 2010.

1.2 Fokus und Definitionen des Pilotthemas

Die Umsetzung einer Circular Economy erfordert insbesondere die Erfassung und Sammlung, die Demontage, die Aufarbeitung und erneute Verwendung sowie das Recycling und die Wiederverwendung von Materialien beziehungsweise Metallen aus Traktionsbatterien für neue Batterien (Closed Loop). Es wird davon ausgegangen, dass eine Circular Economy nur kooperativ, das heißt in Netzwerkstrukturen, umgesetzt werden kann. Derartige Netzwerke bestehen aus einer Vielzahl von Knoten (zum Beispiel Werkstätten, Demontage- und Recyclingbetrieben, Produktionsunternehmen), denen unterschiedliche Aufgaben obliegen. Mit dem Aufbau von Netzwerken werden dabei folgende Zielsetzungen verfolgt:

- Verstärkung des Mengenaufkommens durch Ausweitung der Anzahl der zurückgenommenen End-of-User- und End-of-Life-Produkte beziehungsweise Energiespeicher,
- Erzielung von Betriebsgrößenvorteilen durch die Verwirklichung von Mindestaltproduktmengen,
- verbesserte Demontage- und Verwertungsmöglichkeiten durch einen intensiveren Informationsaustausch sowie
- Verteilung von Risiken und Investitionen auf mehrere Träger.

siehe auch Pilotsteckbrief III „Demontagenetzwerk für Traktionsbatterien“). Als vordringliche Aufgabe auf der operativen Ebene sind kurzfristige Entscheidungen zu den relevanten Stoffströmen im Netzwerk zu nennen. Während die Gestaltung von Netzwerken auf strategischer Ebene durchschnittlich zu erwartende zukünftige Rahmenbedingungen voraussetzt, besteht die operative Lenkungsaufgabe in der kontinuierlichen Anpassung der Stoffströme innerhalb des Netzwerks an im Zeitablauf schwankende Mengen, Verwertungserlöse und -kapazitäten sowie geänderte rechtliche Rahmenbedingungen. Komplementär dazu müssen auf der Ebene einzelner Demontage- und Recyclingbetriebe Entscheidungen zur technischen und organisatorischen Ausgestaltung dieser Betriebe getroffen werden (Mikroperspektive). Die zur Entscheidungsfindung benötigte modellbasierte Entscheidungsplattform kann dabei gemäß Abbildung 37 strukturiert sein.

Die Akteure der Plattform liefern individuelle Daten unter anderem zu Angebot und Nachfrage. Innerhalb der Entscheidungsplattform kann eine Entscheidungsfindung beziehungsweise ein „Matching“ von Angebot und Nachfrage unter diversen Rahmenbedingungen wie zum Beispiel Qualitätsansprüchen stattfinden. Die gebrauchte Traktionsbatterie kann im Anschluss gemäß der Empfehlung der Plattform dem passenden Akteur zugeführt werden. Der genauere

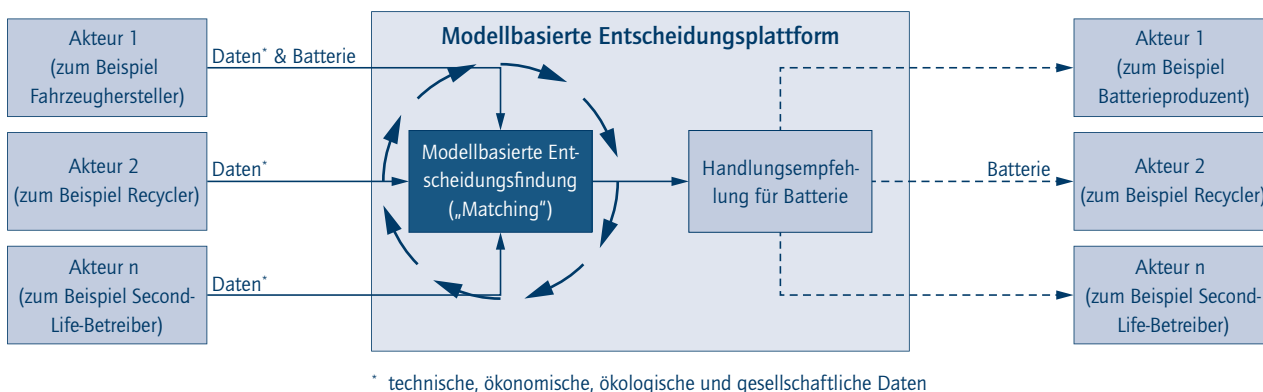


Abbildung 37: Konzept der modellbasierten Entscheidungsplattform (Quelle: eigene Darstellung)

Netzwerke zur Aufarbeitung beziehungsweise Aufbereitung stellen somit Wertschöpfungsverbünde mit verschiedenen Partnern auf überbetrieblicher Ebene dar, um Stoffströme, die im Zusammenhang mit der Redistribution, der Demontage, der Aufarbeitung und der Aufbereitung entstehen, sowohl unter ökonomischen als auch ökologischen Zielkriterien abzustimmen (Makro-Perspektive,

Aufbau der modellbasierten Entscheidungsfindung und dabei berücksichtigte Parameter sind in Abbildung 38 dargestellt. In der Visualisierungsebene (Graphical User Interface, GUI) werden die modellbasierten Ergebnisse stakeholderspezifisch aufbereitet und dargestellt (die in der Abbildung verwendeten Icons stellen beispielhafte Visualisierungsmöglichkeiten dar).

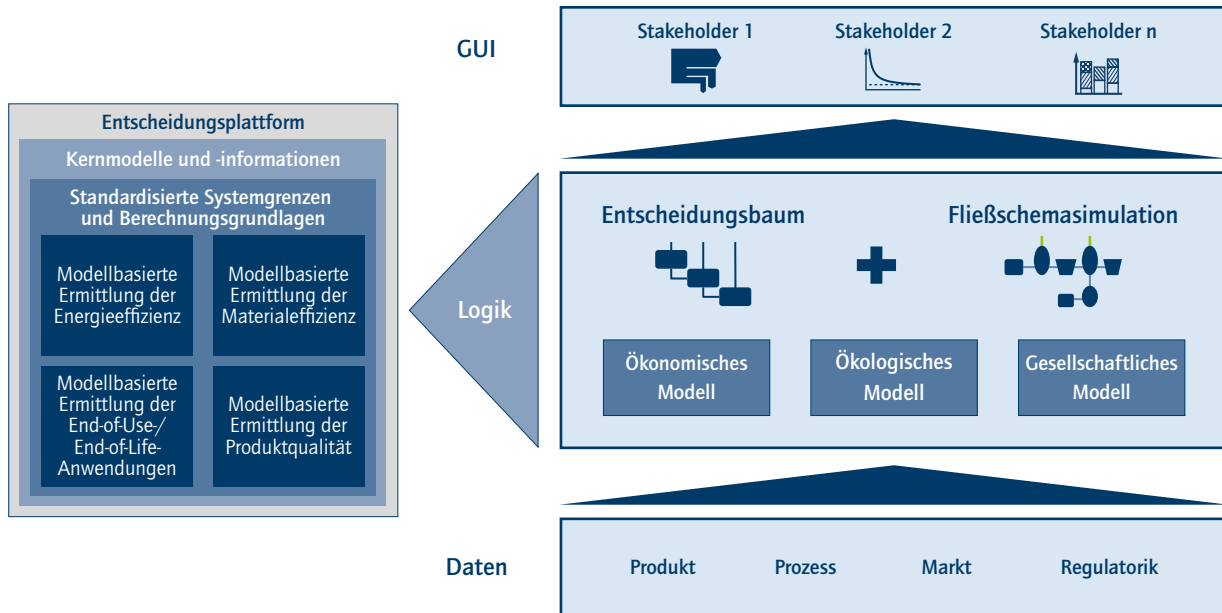


Abbildung 38: Modellstruktur der Entscheidungsplattform (Quelle: eigene Darstellung)

Die Basis bildet eine Datenebene mit Informationen zum aktuell vorliegenden Produkt, zum Prozess und Markt sowie den rechtlichen Rahmenbedingungen (Tabelle 7). Die Daten und Informationen bilden die Grundlage (Input) für die Entwicklung geeigneter Entscheidungsregeln oder Modelle (Logikebene). Wesentliche Daten und Informationsbereiche (siehe auch Pilotsteckbrief I „Kenntnis des Batterielebens“) sind:

- Produktinformationen,²³⁵ zum Beispiel zu Materialzusammensetzung, Produktaufbau, eingesetzten Verbindungstechniken
- Prozessinformationen, zum Beispiel verfügbare Demontage- und Recyclingtechnologien, Prozesspfade, Rückgewinnungsraten, Qualität und Reinheit der zurückgewonnenen Materialien, Stoffe, Metalle
- Marktinformationen, zum Beispiel Mengenaufkommen an End-of-User- und End-of-Life-Speichern, Rohstoffpreise, Bedarf an Second-Life-Batterien und erzielbare Preise
- Informationen zu Gesetzen und Vorschriften, zum Beispiel einzuhaltende reale Recyclingquoten und -qualitäten (siehe Vertiefung Batterierecycling)

Innerhalb der nachfolgend beschriebenen Logikebene werden sozioökonomische und ökologische Modelle in Kombination mit einer Fließschemasimulation und einem Entscheidungsbaum genutzt, um die optimale End-of-User- und End-of-Life-Behandlung zu identifizieren. Mithilfe der Plattform muss modellbasiert entschieden werden, ob mobile Energiespeicher einer Aufarbeitung beziehungsweise einer erneuten Verwendung (Second Life) oder einem Recycling zugeführt werden (siehe Abbildung 39). Diese Entscheidung resultiert oftmals aus der gewählten optimalen Demontagetiefe,²³⁶ die wiederum vom Restwert und den zu erwartenden Aufwendungen und Erlösen abhängt. Der dargestellte Entscheidungsbaum priorisiert dabei gemäß der EU Waste Framework Directive²³⁷ eine Wiederverwendung gegenüber einem Recycling. Im Recycling wiederum wird ein hochwertiges (Batterie-)Materialrecycling für eine erneute Verwendung in Batterien (Closed Loop) einem stofflichen Recycling für andere Branchen und Anwendungen (Open Loop) vorgezogen. Die Entscheidungsunterstützung beruht dabei auf einer physikalisch-chemischen Fließschemasimulation, welche verschiedene End-of-User- und End-of-Life-Szenarien modellbasiert miteinander vergleicht und ein Optimum ermittelt.

235 | Vgl. Europäische Union 2019.

236 | Vgl. Ohlendorf 2006.

237 | Vgl. Europäische Union 2008.

Das simulationsbasierte Footprinting von Verarbeitungsanlagen und -systemen wurde von einem der Verfasser des Dokuments in einem kommerziellen Softwaretool, HSC Sim,²³⁸ entwickelt und unter anderem auf die Bewertung großer Kreislaufwirtschaftssysteme angewandt, wie sie in neueren Veröffentlichungen diskutiert werden.²³⁹ Die Stärke des Ansatzes liegt darin, dass auf der Grundlage der Prozesstechnologie und ihres Fließschemas, ihrer Physik und Chemie (Gibbs'sche freie Energie, Phasengleichgewichte, Kinetik, Transferprozesse) die Lieferketten digital

miteinander verknüpft werden können, auch wenn nicht alle Produktionsdaten vollständig verfügbar sind.²⁴⁰ Auf der Grundlage der rigorosen Massen- und Energiebilanz werden die Daten in Lebenszyklusanalysetools exportiert, die auch die Durchführung von Exergieanalysen ermöglichen, um die wahren Verluste aus dem Kreislaufwirtschaftssystem vollständig zu verstehen. Darüber hinaus können verschiedene Verarbeitungswege rigoros verglichen werden, um zu erkennen, welche Optionen optimal sind, um die Verluste aus dem Kreislaufwirtschaftssystem der Batterie zu minimieren.

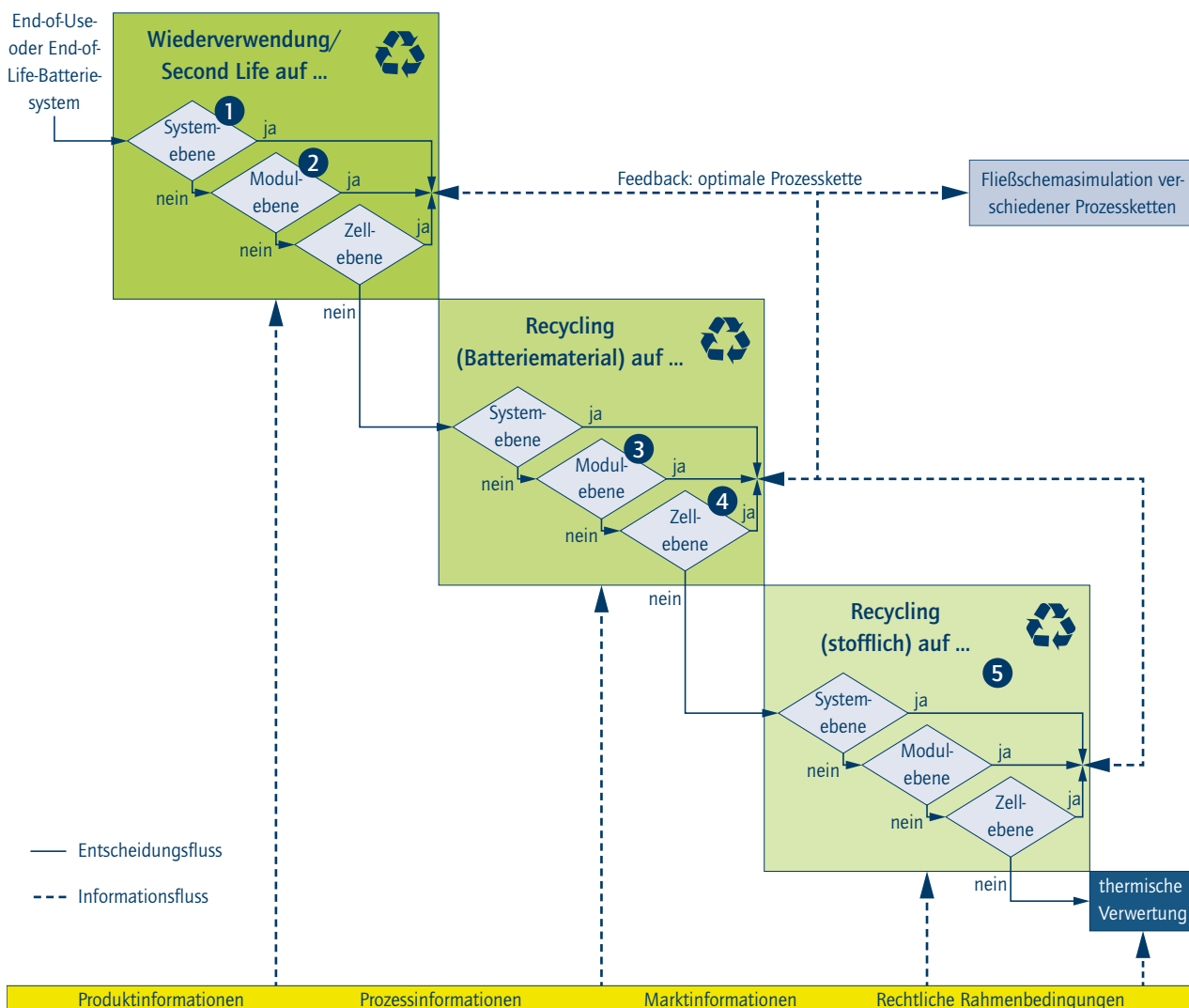


Abbildung 39: Entscheidungslogik – Kombination aus Entscheidungsbaum und Fließschemasimulation für Entscheidungen auf Unternehmensebene (Mikroebene) (Quelle: eigene Darstellung)

238 | Vgl. Outotec.

239 | Vgl. Bartie et al. 2020.

240 | Vgl. Reuter 2016.

Als Beispiel einer Wiederverwendung auf Systemebene lassen sich stationäre Energiespeicher zur Spitzenlastabdeckung im Energiesektor nennen. Hierbei werden beispielsweise die Batteriesysteme im Ganzen in einer Containerlösung neu kombiniert und mit dem Netz verbunden (siehe Abbildung 39, 1). Werden die Batteriesysteme auf Modulebene zerlegt, können einzelne Module individuell kombiniert und zum Beispiel ebenfalls zur Spitzenlastabdeckung im Energiesektor oder in haushaltsüblichen stationären Speichern von Photovoltaikanlagen genutzt werden (siehe Abbildung 39, 2). Ebenso ist eine Weiterverwendung und Neukombination auf Zellebene denkbar. Die Recyclingprozesse lassen sich unter anderem durch ihre Größe, Robustheit und Ansprüche an die geforderte Outputqualität grob in die Verarbeitung von Batterien auf System-, Modul- und Zellebene gliedern. So kann eine (mechanische) Aufbereitung momentan sowohl auf Modulebene (siehe Abbildung 39, 3) als auch auf Zellebene (siehe Abbildung 39, 4) durchgeführt werden. Die Weiterentwicklung dieser Verfahren findet momentan in zahlreichen laufenden Forschungsprojekten statt. Neben der Rückgewinnung von direkt wiedereinsatzbarem Batteriematerial zur erneuten Batterieproduktion (siehe Abbildung 39, 3+4, Closed Loop) kann ebenfalls ein marktöffenes Recycling (siehe Abbildung 39, 5, Open Loop) verfolgt werden. Etablierte und sich in der Forschung befindliche Prozessrouten lassen sich darüber hinaus anhand der Zielmaterialien differenzieren. So fokussieren manche Routen auf die enthaltenen Metalle, dabei vor allem Nickel, Mangan und Kobalt, während sich andere Routen darüber hinaus auf die Rückgewinnung organischer Komponenten, wie zum Beispiel Grafit und Elektrolytbestandteile, spezialisieren. Die Einteilung der Prozesse unterscheidet dabei nicht nach den sich auf dem Markt befindlichen unterschiedlichen Systemgrößen (zum Beispiel Hybridfahrzeuge versus batterieelektrische Fahrzeuge), sondern gibt eine generelle Unterscheidungs- und Entscheidungsmöglichkeit.

Neben der Unterstützung von Entscheidungen auf der Ebene eines einzelnen Demontage- und Recyclingunternehmens soll ein Schwerpunkt des Pilotthemas auch die Integration der Makro-/Netzwerkebene mit der Mikro-/Unternehmensebene in der Entscheidungsplattform sein. Entsprechend müssen die folgenden Aspekte berücksichtigt werden:

- Gestaltung von idealen Demontageprinzipien für ein gegebenes Mengenaufkommen von Energiespeichern
- Entwicklung eines Stoffstrommodells, welches in der Lage ist, sowohl bestehende als auch ideale Demontage- und Recyclingstrukturen abzubilden

- Konzeption eines operativen Lenkungsansatzes zur ökonomisch effizienten Allokation von Stoffströmen auf Demontage- und Recyclingbetriebe im Netzwerk
- Ermittlung optimaler Anpassungsstrategien für bestehende Demontage- und Recyclingstrukturen

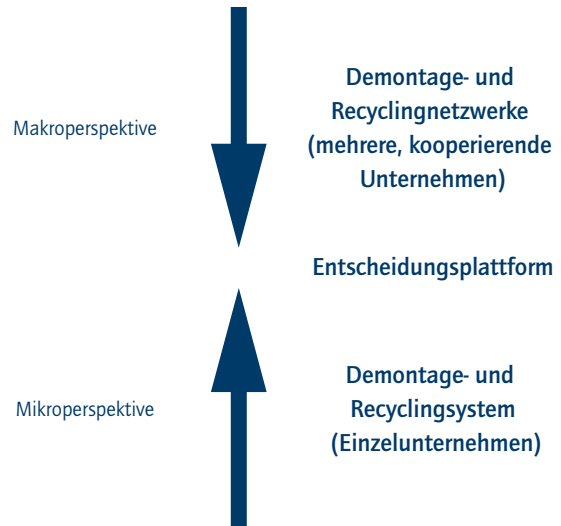


Abbildung 40: Integration der Netzwerk- und Unternehmensebene in der Entscheidungsplattform (Quelle: eigene Darstellung)

Die Integration der beiden Planungsebenen kann erfolgen, indem auf der Grundlage einer Lenkungsmethodik Schwachstellen im Netzwerk ermittelt werden, um darauf aufbauend eine Umgestaltung beziehungsweise Anpassung der Demontage- und Recyclingsysteme auf der Gestaltungsebene zu initiieren. Zur Bewertung und zum Vergleich alternativer Strategien sollten neben Batteriedaten und -kennzahlen (siehe auch Pilotsteckbrief I „Kenntnis des Batterielebens“) zum einen sowohl Investitions- und Kostenschätzungen als auch Kennzahlen wie Durchsatz, Durchlaufzeit, Bestandsentwicklungen, Deckungsbeiträge sowie Flexibilität herangezogen werden. Zum anderen sollte mithilfe einer Umweltbewertung die ökologische Vorteilhaftigkeit einer Circular Economy für Traktionsbatterien anhand aussagekräftiger Key-Performance-Indikatoren (siehe Kapitel 2.3) quantifiziert werden.

Die in der Logikebene gewonnenen Ergebnisse werden anschließend durch auf die Stakeholder angepasste Visualisierungsmethodiken (Graphical User Interface, GUI) aufbereitet, komprimiert und verständlich vermittelt. Der Fokus liegt hierbei auf der Komprimierung und Visualisierung der mithilfe der Modelle berechneten Key-Performance-Indikatoren.

Dieser Pilotsteckbrief fasst die folgenden Aspekte zusammen:

- Entwicklung einer offenen Plattform, die eine Modellierung der optimalen End-of-Life-Verwendung von Traktionsbatterien ermöglicht, wobei sich der Optimierungspfad an technischen, sozioökonomischen und ökologischen Kriterien bemisst
- Das Pilotprojekt umfasst zunächst die Grundsatzentscheidung, ob die Batterien in Second-Life-Anwendungen wiederverwendet oder dem materiellen oder stofflichen Recyclingprozess zugeführt werden.
- Im Falle des Recyclings der Batterien sollen Entscheidungshilfen bei der Auswahl des optimalen Recyclingpfades gegeben werden.
- In Abgrenzung zu Pilotprojekt I Kenntnis des Batterielebens soll der inhaltliche Fokus hierbei über die technologischen Daten hinausgehen und sozioökonomische sowie ökologische Zielp Parameter in die Entscheidungsfindung mit einfließen lassen. Die Implementierung von Pilotprojekt III Demontagenetzwerk ist als entsprechender Dateninput in die Modellierung aufzunehmen.
- Schaffung von Vorbedingungen (insbesondere verbesserte Datenlage), um ein aussagekräftiges Life Cycle Costing (LCC) und Life Cycle Assessments (LCAs) sowie eine Circular Economy im physischen Sinne zu ermöglichen. Hierzu muss eine größtmögliche Transparenz gewahrt werden („White Box“).

2 Anforderung an die Entscheidungsplattform

Die Anforderungen an die Entscheidungsplattform lassen sich gemäß Abbildung 38 in die Anforderungen an die Datenebene, die Logikebene und die Visualisierungsebene gliedern und werden nachfolgend generisch beschrieben.

2.1 Anforderungen an die Daten- und Informationsebene

Die Basis der Entscheidungsplattform bildet eine Daten- und Informationsebene, auf der repräsentative Daten gesammelt werden, um eine aussagekräftige Modellierung mit anschließender Entscheidungsunterstützung durchführen zu können. Die Datenverfügbarkeit basiert dabei auf systematisch und kontinuierlich erfassten Daten entlang des Batterielebenszyklus (siehe auch Pilotsteckbrief I „Kenntnis des Batterielebens“). Die Daten lassen sich in Produkt- beziehungsweise Batteriedaten, Prozessdaten, Marktdaten sowie regulatorische Rahmenbedingungen wie zum Beispiel geforderte Mindestquoten gliedern. Diese Daten müssen für eine valide Modellierung weitestgehend vollständig vorliegen, was eine Herausforderung darstellt. Gemäß Abbildung 37 sollte es die Plattform ermöglichen, dass gewisse Akteure die jeweiligen, fallspezifischen Daten innerhalb ihres Kompetenzbereichs selbst beitragen. Dafür werden in Tabelle 7 exemplarische Daten und Informationen, welche in die Entscheidungsfindung einfließen, benannt.

2.2 Anforderungen an die Ausgestaltung der Logikebene

Vor dem Hintergrund der komplexen Entscheidungssituation wird ein modellbasierter Ansatz für eine Entscheidungsplattform vorgeschlagen. Dabei können sowohl physikalisch-analytische als auch empirische (datengetriebene) Modelle zum Einsatz kommen. Die Ausgestaltung der Logikebene soll, ausgehend von der Netzwerkebene, zum einen strategische Entscheidungen auf der Ebene einzelner Demontage- und Recyclingunternehmen und zum anderen operative Entscheidungen zu konkreten Recyclingpfaden (Verwertung versus Verwendung, Empfehlung zu alternativen Verwertungspfaden) unterstützen.

Produktinformationen	Prozessinformationen	Marktinformationen	Regulatorische Rahmenbedingungen
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zellformat ▪ Zellchemie und Metallinhalt ▪ State of Health (SoH) ▪ Alter ▪ Nutzung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Energiebedarf ▪ Emissionen (Luft, Wasser, Boden) ▪ Arbeitssicherheit ▪ Materialeffizienz (auch für einzelne Schlüsselmaterialien) ▪ Ressourceneffizienz ▪ Reale Outputqualität ▪ Flexibilität ▪ Kapazität und Auslastungsgrad ▪ Reifegrad 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aktuelles qualitatives und quantitatives Angebot an und Preise von Traktionsbatterien ▪ Verteilung des Angebots im Markt ▪ Rohstoffnachfrage und Preise ▪ Aktuelle qualitative und quantitative Nachfrage an und Preise von Second-Life-Anwendungen ▪ Marktentwicklung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mindestsammelquoten ▪ Mindestrecyclingquoten ▪ Mindesteinsatz an Sekundärmaterial in Produktion (Recycled Content) ▪ Pfandsysteme ▪ Sonstige Anreize (für Second Life)

Tabelle 7: Exemplarische Informationen für die Entscheidungsfindung



Technische Bewertung

Die Modellentwicklung und -integration erfordert realistische Betrachtungen der Massen- und Energiebilanz, der Exergieverluste innerhalb des Systems sowie der „Hidden Costs“ durch Vermischung von Materialflüssen und -verbänden. In bestehenden Circular-Economy-Ansätzen (zum Beispiel der Ellen MacArthur Foundation)²⁴¹ werden Exergie und dissipative Verluste nur unzureichend mitgedacht und reale anwendungsspezifische Herausforderungen oft nicht hinreichend berücksichtigt. Daher müssen im Modell spezifische, reale, aktuelle und validierte Daten implementiert werden, was unter anderem einen realistischen Vergleich verschiedener Prozesstechniken²⁴² ermöglicht.

Wirtschaftliche Bewertung

Die in der technischen Bewertung beschriebenen realistischen Betrachtungen werden ebenfalls für die wirtschaftliche Bewertung zugrunde gelegt, um validere Prognosen und Kostenkalkulationen durchführen zu können. Dahingehend werden durch Stoffgemische und Verunreinigungen resultierende geminderte Verkaufswerte ebenso wie Energieverluste berücksichtigt. Die Qualität und Reinheit der erzeugten Rezyklate hat einen wesentlichen Einfluss sowohl auf die Verfahrenskosten als auch auf die erzielbaren Preise.

Ökosoziale Bewertung

Eine ökosoziale Bewertung der Circular Economy benötigt eine transparente Diskussion, wer welche Lasten und welche Vorteile bei einem spezifischen Recycling oder einer Second-Life-Anwendung zu tragen hätte. Dabei ist beispielhaft zu klären, wer sich die verringerte Umweltbilanz eines Sekundärmaterials bei der erneuten Integration in der Produktion zu welchen Teilen anrechnen lassen kann. Ein weiteres Beispiel stellt die Berücksichtigung der Nutzungsverlängerung durch Second-Life-Anwendungen rückwirkend auf die Umweltbilanz der First-Life-Anwendung und der damit verbundenen intensiven Produktion dar. Nur durch ein standardisiertes Bewertungsschema lassen sich ökosoziale Vergleiche darstellen und eine übergeordnete Systemoptimierung realisieren. Eine bloße Problemverschiebung (Burden Shifting, Rebound-Effekte, Trade-offs) soll dahingehend unbedingt vermieden werden.

Im Zusammenhang der ganzheitlichen Optimierung und der Vermeidung einer Problemverschiebung ist eine reine Betrachtung der treibhauswirksamen Emissionen unzureichend. Weitere Indikatoren wie unter anderem das Versauerungspotenzial (Acid Potential, AP) und das Potenzial der Humantoxizität (Human Toxicity Potential, HTP) müssen ebenfalls zwingend bei der

Entscheidungsfindung Berücksichtigung finden und bei Bedarf weitere aussagekräftige Indikatoren ermittelt werden. Insbesondere die Ermittlung und Anwendung von sozialen und kreislauforientierten Indikatoren stellen noch Forschungsbedarf dar. Generell muss bei einer ökosozialen Bewertung eine Abwägung zwischen Vollständigkeit und Aufwand durchgeführt werden. Das Ziel des Pilotthemas stellt eine Berücksichtigung und Weiterentwicklung von Methoden des Life Cycle Assessments (LCA), und des sozialen LCA innerhalb der Entscheidungsunterstützung dar.

In der Logikebene des Pilotprojekts werden zusammenfassend ganzheitliche Betrachtungen vorgenommen, die neben einer ökonomischen ebenfalls eine ökologische Optimierung anstreben.

2.3 Anforderungen an die Ausgestaltung der Visualisierungsebene

Die Visualisierung der Ergebnisse hinsichtlich der zu bevorzugenden End-of-Use- und End-of-Life-Behandlung sollte über vergleichbare Kennzahlen (siehe Kapitel 2.2) erfolgen und dabei kompakt und einfach verständlich sein. Folgend exemplarisch aufgeführte Kennzahlen können dabei berücksichtigt werden, wobei ein Massen- (zum Beispiel Kilogramm Batterie) oder Kapazitätsbezug (zum Beispiel Wattstunde Kapazität) der Indikatoren anzustreben ist:

- Erreichte Batteriekapazität für Weiternutzung oder Second Life
- Erzielbare Recyclingausbeuten und -qualitäten (an Batteriematerialien und/oder einzelnen Metallen und Stoffen)
- Energieeffizienz (Kilowattstunde pro Kilogramm Batterie)
- Treibhausgasemissionen (Kilogramm CO₂ pro Kilogramm Batterie)
- Versauerungspotenzial/Humantoxizitätspotenzial oder Ähnliches
- Kosten (Euro pro Kilogramm Batterie)
- Erlöse (Euro pro Kilogramm Batterie)

3 Erfolgskriterien für die Implementierung

Die Erfolgskriterien der Entscheidungsplattform resultieren aus dem potenziellen Betreiber, dessen Motivation und den berücksichtigten Akteuren der Plattform. Der Betreiber kann sowohl staatliche oder öffentliche, wissenschaftliche als auch privatwirtschaftliche Strukturen besitzen, weshalb die Struktur und Prozesse der Plattform variieren können. Um dennoch im Rahmen des Pilotprojekts die Ausgestaltung einer modellbasierten

241 | Vgl. Ellen MacArthur Foundation 2020.

242 | Vgl. Reuter et al. 2019.

	Plattformbetreiber		
	Fahrzeughersteller	Staatlich/öffentlich	Weitere Privatwirtschaft
Motivation	Reduktion der Kosten und Umweltauswirkungen von Traktionsbatterien Rohstoffsicherung und Verringerung des Einflusses von Rohstoffpreisschwankungen Bessere Zuordnung von Traktionsbatterien zu Second-Life-Anwendungen Sicherstellung der Recyclingquoten und -qualitäten Nachweis von Recycelt Content Marketing Datensouveränität und Datenschutz	Optimierung der Wertschöpfung, Wettbewerbsfähigkeit und Nachhaltigkeit in Deutschland Optimierung von Netzwerken Integration aller Hersteller und Akteure Volkswirtschaftliche Rohstoffsicherung Kein wirtschaftliches Eigeninteresse und Unabhängigkeit	Nutzung der Datenwerte Erzeugung von Gewinnen mit dem Plattformbetrieb Hohes Kundeninteresse (Plattformnutzer) Weitgehende Unabhängigkeit Bessere internationale Handlungsmöglichkeiten
Geschäftsmodell	Kosteneinsparungen und erhöhte Materialverfügbarkeit durch erhöhte Rückgewinnung im Recycling und verstärkte Nutzung von Second-Life-Anwendungen Reduktion von End-of-Life-Rückstellungen durch verbesserte Prognosen zu Second-Life-Potenzialen Sekundäre Vorteile (Imagesteigerung, Risikomitigation) durch verbesserte Umweltbilanz Zusätzliche Geschäftsmodelle für und Einflussnahmen auf den Downstream-Markt von Batterien	kein sich tragendes Geschäftsmodell notwendig Finanzierung über zum Beispiel Herstellerabgaben denkbar Ziel: Verbesserung der Wertschöpfung, Wettbewerbsfähigkeit und Nachhaltigkeit in Deutschland	Sammlung, Aufbereitung von Daten und Bereitstellung einer Datenbank (zum Beispiel für Life Cycle Assessment) Handel mit Datensätzen und Auswertungen Consulting
Erfolgskriterien	Validierung und Vergleichbarkeit verschiedener Plattformen durch zertifizierte Prüfer Daten- und Entscheidungstransparenz Einbindung aller relevanten Akteure und Informationen Schnittstelle für Datenzugriff von außerhalb Rentabilität der Plattform Individuelle Entscheidung bei gebrauchten Traktionsbatterien Optimierter Lebenszyklus der Traktionsbatterien	Datenschutz und Sicherung von Firmeninteressen Speicherort und transparente Nutzung der Daten Betrieb und Wartung der Plattform Einbindung aller Akteure und Informationen Standardisierung und Validierung der Daten Zugriff auf multinationale Unternehmen (auch wenn Hauptsitz außerhalb Deutschlands/der EU) Sicherung von Wissen, Altgeräten und Sekundärmaterial in Deutschland Gegebenenfalls Schnittstelle zu anderen nationalen Plattformen	Datenschutz und Sicherung von Firmeninteressen Speicherort und transparente Nutzung der Daten Einbindung aller Akteure und Informationen Zugang zur Plattform und Datenbank Standardisierung und Validierung der Daten Rentabilität der Plattform Ganzheitlich nachhaltige Betrachtung

Tabelle 8: Ausgestaltung der Entscheidungsplattform in Abhängigkeit des Betreibers

Entscheidungsplattform zu konkretisieren, werden nachfolgend drei potenzielle Plattformbetreiber aus verschiedenen Sektoren exemplarisch erläutert:

1. Fahrzeughersteller,
2. Behörde oder öffentliche Hand,
3. weitere privatwirtschaftliche Betreiber.

Der Fahrzeughersteller kann eine an seine Strukturen angepasste Plattform mit individuellen Interessen betreiben. Daneben kann

die Plattform auch produkt- und herstellerübergreifend durch eine staatliche Behörde oder die öffentliche Hand (zum Beispiel Umweltbundesamt) betrieben werden. Neben den genannten Betreibern kann die Plattform auch durch ein (neben dem Fahrzeughersteller unabhängiges) privatwirtschaftliches Unternehmen betrieben werden.

Tabelle 8 listet die betreiberspezifische Motivation, ein potenzielles Geschäftsmodell sowie Anforderungen und Entscheidungskriterien der Plattform auf, welche nachfolgend erläutert werden.

3.1 Übersicht über Motivation und Geschäftsmodell des Plattformbetreibers

Eine betreiberspezifische Ausarbeitung der Plattform resultiert aus unterschiedlichen Motivationen und Geschäftsmodellen. Die Geschäftsmodelle können dabei unter anderem auf dem Handel mit Daten und Auswertungen beruhen oder auf einer gesellschaftlichen oder industriellen (zum Beispiel in Form einer Herstellerabgabe) Finanzierung basieren. In Tabelle 8 sind mögliche Motivationen und Geschäftsmodelle der verschiedenen Betreiber aufgelistet.

Eine mögliche Plattformausgestaltung mit einem Geschäftsmodell, welches das optimierte Matching von individuellem Angebot und Nachfrage verfolgt, wird nachfolgend in Abbildung 41 demonstriert.

Der Wissenschaft kommt hierbei eine besondere Rolle zu, da sie als Querschnittsfunktion die bestehenden Methoden und Ergebnisse auswerten kann und gleichzeitig für die Aktualisierung der Methoden anhand neuester Erkenntnisse zuständig ist.

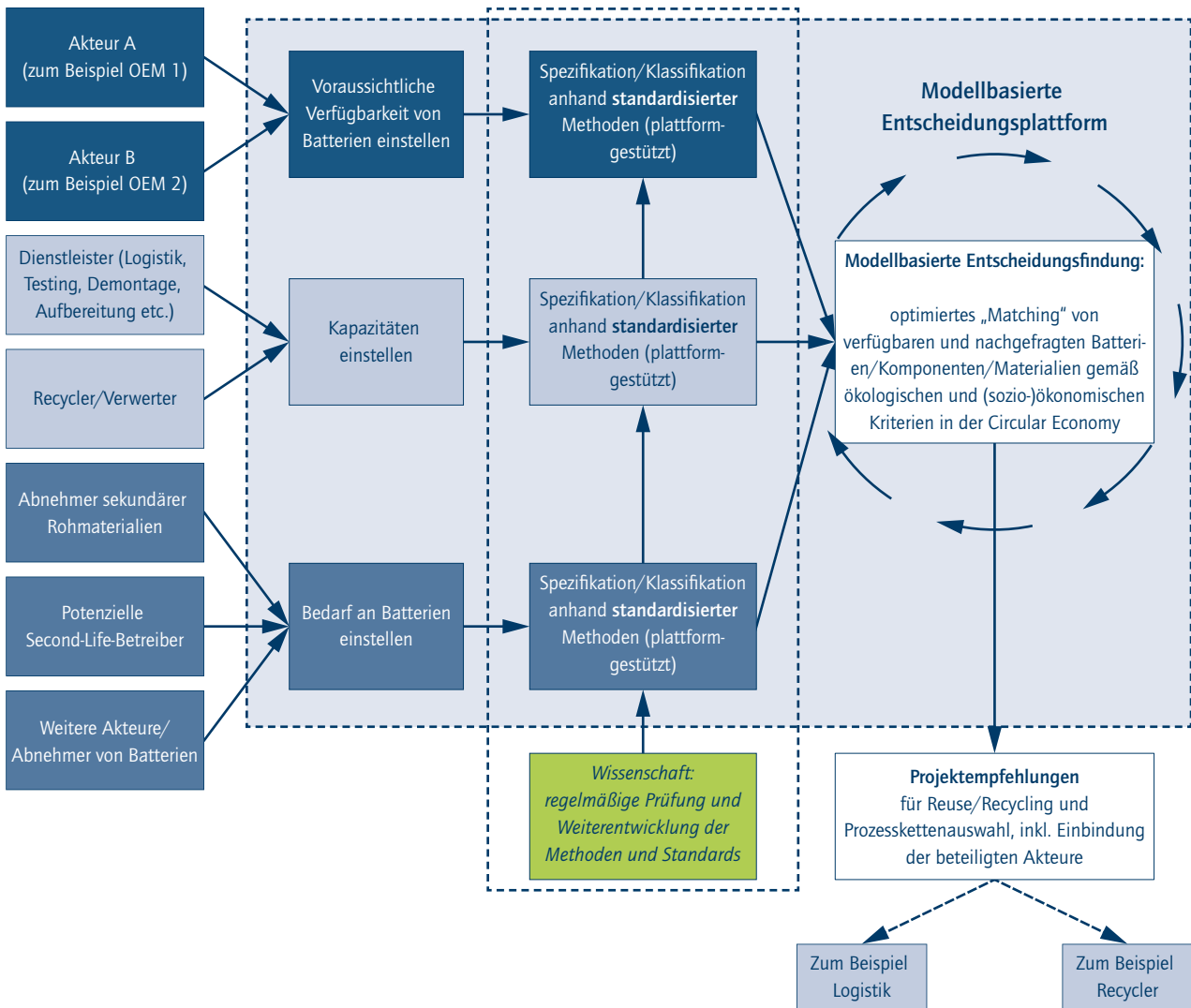


Abbildung 41: Schematische Darstellung der Einbindung einer Plattform in Geschäftsprozesse der Circular Economy (Quelle: eigene Darstellung)

3.2 Übersicht über einzubindende Akteure

Die Identifizierung und Einordnung beteiligter Akteure und Stakeholder der Plattform bedarf einer strukturierten Analyse und ist sehr plattformspezifisch.²⁴³ In die Stakeholderanalyse müssen die Identifizierung („wer“), der Grund des Interesses an der Plattform („warum“) und die Durchsetzung der Interessen beziehungsweise des Einflusses auf die Plattform und andere Stakeholder („wie“) einbezogen werden. In Tabelle 9 sind als erster Schritt relevante Akteure, die in der Umsetzung einer Entscheidungsplattform für gebrauchte Traktionsbatterien zu berücksichtigen sind, aufgelistet.

Stakeholder		
im Materialfluss	in Peripherie	in Regulatorik
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Rohstofflieferant (Primär und Sekundär) ▪ Komponentenhersteller ▪ Batteriehersteller ▪ Fahrzeughersteller ▪ Nutzer (First und Second Life) ▪ Werkstätten ▪ Logistiker ▪ Demontagebetriebe/-zentren ▪ Aufarbeiter ▪ Recycler 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Serviceanbieter (IT, Tracking and Tracing, Monitoring, Reporting; Dateninfrastruktur) ▪ Plattformbetreiber ▪ Serviceanbieter für Second Life ▪ Wissenschaft ▪ Zertifizierer/Prüfinstanz ▪ Energieerzeuger (stationäre Speicher) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gesetzgebung ▪ Genehmigungs- und Überwachungsbehörde ▪ Datenschutz ▪ Grenzüberwachung (Zoll)

Tabelle 9: Relevante Akteure für Entscheidungsplattform

Mögliche Interessen ausgewählter Akteure in Bezug auf die Entscheidungsplattform

- **Rohstofflieferant (Primär und Sekundär)**
Der Rohstofflieferant ist an Marktentwicklungen in Bezug auf First- und Second-Life-Anwendungen sowie dem daraus resultierenden Angebot, der Nachfrage und den Preisentwicklungen von Primär- und Sekundärmaterialien interessiert. Darüber hinaus zeigt er Interesse an erzielbaren Sekundärqualitäten. Durch die Kenntnis kann er seine Kapazitäten und Preise managen.
- **Batteriehersteller**
Der Batteriehersteller ist an Marktentwicklungen bezüglich seiner Supply Chain interessiert. Außerdem hat er durch das Design und die Herstellung der Batterie großen Einfluss auf mögliche End-of-User und End-of-Life-Szenarien, wobei sein Fokus klar auf der Erstanwendung liegt.
- **Fahrzeughersteller**
Der Fahrzeughersteller ist daran interessiert, seine zurückgenommenen Batterien (gegebenenfalls durch Dritte) einer bestmöglichen Aufarbeitung beziehungsweise einem Recycling zuzuführen, um möglichst hohe ökonomische und ökologische Erträge beziehungsweise Gutschriften erzielen zu können. Über die Plattform könnte auch der Anteil an Responsible Sourcing und Responsible Recycling nachgewiesen werden und eine höhere Unabhängigkeit gegenüber Rohstoffpreisschwankungen durch kreislauforientierte Serviceangebote (zum Beispiel Leasingmodelle mit Reuse und Recycling as a Service) erreicht werden. Darüber hinaus kann die Plattform zur Reduktion von Kosten und Risiken durch den Übertrag der End-of-User-Haftungs- und Kapitalaufwände (bezüglich Haftungs-, Rückstellrisiken und Kapitalkosten) auf Second-Life-Anwenderinnen und -Anwender dienen. Die Plattform kann ebenfalls zu Marketingzwecken genutzt werden („Grünes Image“).
- **Nutzer (First und Second Life)**
Der Nutzer einer First- oder Second-Life-Anwendung ist daran interessiert, ein zertifiziertes, hochwertiges und nachhaltiges Produkt zu erhalten und nach dem Gebrauch einen möglichst hohen Verkaufspreis beziehungsweise niedrige Entsorgungskosten zu erzielen. Durch seine Kaufentscheidung und die Bereitstellung von Nutzungsdaten hat er Einfluss auf die Plattform aus.
- **Aufarbeiter**
Der Aufarbeiter ist an Marktentwicklungen zu angebotenen gebrauchten Batterien und nachgefragten Second-Life-Anwendungen interessiert. Ebenfalls interessiert er sich für Qualitätsansprüche und Qualitätsvorhersagen seiner Anwendungen. Durch die Plattform hat er die Möglichkeit, hochwertige gebrauchte Batterien anbieten zu können, während Batterien mit niedrigerer Qualität (zum Beispiel Restkapazität) einer Verwertung zugeführt werden. Durch die Auslegung und Effizienz der Aufarbeitung übt er einen hohen Einfluss auf die Entscheidungen der Plattform aus.
- **Recycler**
Der Recycler ist an Marktentwicklungen zu angebotenen gebrauchten Batterien und der Nachfrage an Sekundärmaterialien interessiert. Durch seine technische Ausstattung und die daraus resultierenden Energie- und Materialeffizienzen sowie Qualitäten hat er einen hohen Einfluss auf die Entscheidungsfindung der Plattform. Mithilfe der Plattform kann der Recycler eine optimale Prozessauslegung realisieren und

243 | Vgl. Ashby 2016.

Produkte mit einem hohen ökonomischen und ökologischen Gewinn erzeugen.

▪ **Plattformbetreiber**

Der Plattformbetreiber ist, soweit abweichend von genannten Akteuren, am Mehrwert seiner Plattform für die anderen Akteure interessiert. Durch die Struktur und die Definition der Entscheidungslogik nimmt er großen Einfluss auf die Plattform.

▪ **Wissenschaft**

Die Wissenschaft besitzt ein hohes Interesse an transparenten und objektiven Entscheidungen hinsichtlich einer optimalen End-of-User- und End-of-Life-Behandlung. Sie legt durch die Entwicklung standardisierter Methoden und Werkzeuge die Grundlage für die Entscheidungslogik und ist an deren Weiterentwicklung interessiert.

▪ **Gesetzgeber, Genehmigungs- und Überwachungsbehörde**

Der Gesetzgeber und die überwachenden Behörden sind daran interessiert, kritische Materialien und End-of-User- und

End-of-Life-Kompetenzen in Deutschland und Europa zu halten und die Wertschöpfung zu erhöhen. Des Weiteren legt der Gesetzgeber Klimaziele fest und ist somit an einer Reduktion der Emissionen durch eine zirkuläre Wertschöpfung interessiert. Durch die genannten Festlegungen sowie Gesetze unter anderem bezüglich Datensicherheit und Governance gibt er den Rahmen für die Plattform vor.

Die beschriebenen Aufgaben fallen dabei teils mehreren Akteuren zu, während mehrere Aufgaben teils nur einem Akteur obliegen. Im nächsten Schritt gilt es die jeweiligen Interessen und Einflussnahmen auf die Entscheidungsplattform offenzulegen. Der Einfluss und das Interesse ausgewählter Akteure auf die Entscheidungsplattform werden in Abbildung 42 visualisiert.²⁴⁴

Die Darstellung der Akteure ist sehr individuell und kann von der Plattform, aber auch von der Art des Akteurs abhängen und muss daher je nach Fall spezifisch ausgearbeitet werden. Beispielsweise verändert sich der Einfluss einzelner Akteure, wenn die Plattform statt privatwirtschaftlich staatlich betrieben wird. Dies kann ebenfalls großen Einfluss auf die Auswahl und das Interesse der Akteure haben.

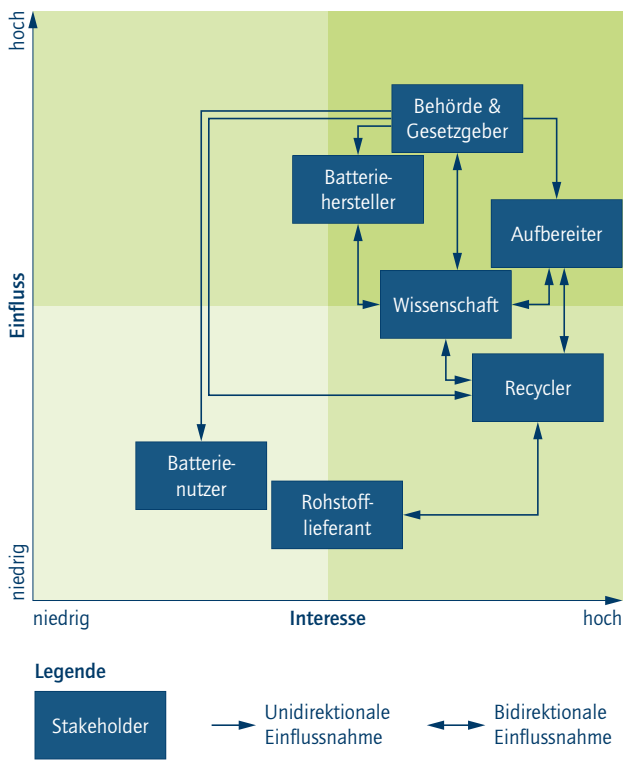


Abbildung 42: Einfluss und Interesse der Akteure in Bezug auf die Ausgestaltung der Entscheidungsplattform (Quelle: eigene Darstellung)

3.3 Erfolgskriterien für die Entscheidungsplattform

Um die Entscheidungsplattform erfolgreich umzusetzen, muss der Aufbau der Logikebene für eine breite Akzeptanz valide und fair sein. Standardisierte Methoden ebenso wie faire Systemgrenzen unter anderem in Bezug auf die Verteilung von Lasten und Gutschriften im Second Life und Recycling²⁴⁵ sind hierfür auszuarbeiten. Der Erfolg der modellbasierten Entscheidungsplattform bemisst sich am steigenden Interesse und Einfluss der einzelnen Akteure an der Plattform und damit einer Unterstützung der Circular Economy (siehe Abbildung 42). Darüber hinaus ergeben sich betreiberspezifische Erfolgskriterien (siehe auch Tabelle 8).

Fahrzeughersteller als Plattformbetreiber

Diverse Fahrzeughersteller könnten parallele Plattformen für ihre Netzwerke entwickeln. Dabei ist sicherzustellen, dass die Plattformen untereinander vergleichbar sind und einer unabhängigen Zertifizierung unterzogen werden sollten. Für einen größtmöglichen Erfolg ist die Einbindung aller relevanten Akteure und deren Daten sowie eine transparente Entscheidungsfindung essenziell. Als Erfolgskriterium ist ebenfalls die Rentabilität der Plattform zu sehen, indem sie über den optimierten Lebenszyklus der Traktionsbatterie zu Einsparungen an Kosten und Umweltauswirkungen beiträgt.

244 | Vgl. DIN EN ISO 14040:2009-11 2009.

245 | Vgl. DIN EN ISO 14040:2009-11 2009.

Behörde und öffentliche Hand als Plattformbetreiber

Für eine erfolgreiche, staatlich betriebene zentrale Plattform sind sowohl der Datenschutz und die Sicherung von Firmeninteressen als auch der Speicherort und die transparente Nutzung und Weitergabe von Daten sicherzustellen. Für ein zentrales Datenmanagement müssen die Daten standardisiert und validiert werden. Für eine erfolgreiche Umsetzung sollten neben nationalen auch multinationale Unternehmen mit Standort in Deutschland berücksichtigt werden. Der Erfolg der Plattform lässt sich an der Sicherung von Wissen, Altgeräten und Sekundärmaterial in Deutschland bemessen.

Privatwirtschaftlicher Plattformbetreiber

Die Erfolgskriterien einer privatwirtschaftlichen Plattform beziehen sich durch die potenziell zentral ausgestaltete Plattform sowohl auf die beschriebenen Kriterien eines Fahrzeugherstellers als auch einer staatlich betriebenen Plattform. Für eine erfolgreiche Umsetzung der Plattform als solche muss sie als Dienstleistung rentabel und einfach anwendbar für die Akteure sein. Ebenfalls muss es Anreize für die Akteure geben, damit diese ihre Daten bereitstellen.

4 Erwartete Impact-Potenziale des Pilotprojekts

- Auf volkswirtschaftlicher und gesamtgesellschaftlicher Ebene kann eine solche datengestützte Modellierung dazu beitragen, politische Handlungsempfehlungen mit klaren Zielvorgaben zu quantifizieren (wie die Festlegung bestimmter Recyclingquoten, zum Beispiel X Prozent des Lithiums aus Batterien müssen recycelt werden).
- Auf betriebswirtschaftlicher Ebene können einzelne Akteure auf Grundlage des entwickelten offenen und modularen Modells unter Einbeziehung interner Daten unternehmensspezifische Szenarien entwickeln und die optimale End-of-Life-Verwendung ermitteln, ohne dabei jedoch vertrauliche Informationen öffentlich machen zu müssen.
- Die entwickelten Szenarien können sodann beispielweise dabei helfen, robuste Entscheidungen hinsichtlich der optimalen Dimensionierung von neuen Recyclinganlagen sowie des richtigen Investitionszeitpunkts zu treffen.

4.1 Einfluss auf das Zielbild 2030

Zur Operationalisierung der Transformation zu einer dekarbonisierten, zirkulären Wirtschaft entwickelten die Teilnehmenden der Arbeitsgruppe Traktionsbatterien ein gemeinsames Zielbild entlang der folgenden fünf Dimensionen. Diese sollen die in ProgRes III definierten Ressourcenproduktivitätsziele 2030²⁴⁶ berücksichtigen.

- Regulatorik
 - Eine (zentrale) Plattform gewährleistet Datenschutz und Sicherheit.
 - Eine kennzahlenbasierte Offenlegung von Potenzialen der Circular Economy fördert und harmonisiert eine hochwertige Weiterverwendung und Responsible Recycling.
 - Ein standardisiertes Verfahren, das die Rezyklatanteile der am Markt verfügbaren Rohmaterialien ermitteln und anrechnen kann, ermöglicht exakte, realitätsgetreue und für Konsumierende transparente Umweltbewertungen von Batterien.
- Stoffströme
 - Die Kenntnis über den regionalen Standort, die Menge und Qualität der Traktionsbatterie durch Tracking- und Tracing-Tools liefert einen wichtigen Baustein für die Kapazitäts- und Logistikplanung.
 - Sichere Datenbanken innerhalb der Plattform mit standardisierten Schnittstellen und Daten sowie transparenten Protokollen stellen Akteuren entlang der Wertschöpfungskette maßgeschneiderte Informationen zur Verfügung und gewährleisten gleichzeitig den Schutz intellektuellen Eigentums und Wettbewerbsvorteile (vergleiche International Data Spaces). Hierbei ergänzen sich privatwirtschaftliche Lösungen mit solchen der öffentlichen Hand.
 - Relevante Forschung und Entwicklung bezüglich Batteriealterung, Testing und sicherer Handhabung hat zu Klarheit geführt, inwieweit Vehicle-to-X(V2X)- und Second-Life-Anwendungen von Traktionsbatterien ökonomisch und ökologisch sinnvoll sind. Innerhalb der Entscheidungsfindung der Plattform gewinnen Second-Life-Anwendungen dadurch an Wichtigkeit.
 - Alle Traktionsbatterien werden am Ende ihrer Nutzung eingesammelt und nach eventueller Wartung und/oder, wo sinnvoll, einem weiteren Leben gegebenenfalls in stationärer Anwendung, letztlich effizientem und hochwertigem Recycling zugeführt. Die Plattform liefert für die Auswahl einer bestmöglichen Behandlung eine wichtige Entscheidungsunterstützung.
- Technische Entwicklung
 - Design for Circularity und Design for Recycling sind zum Industriestandard geworden und ermöglichen zirkuläre Geschäftsmodelle sowie die Steigerung realer Recyclingraten.
 - Die weite Verbreitung von Tracing- und Trackingtechnologien (Battery Passports und Circular Economy Data Spaces) und die vielseitige Integration in



Geschäfts(IT-)systeme stellen die verlässliche Informationsbereitstellung und Informationen über den Verbleib der Batterien unter Gewährleistung von Datenschutz und Sicherheit sicher.

- Modularer Aufbau von Batterien – zum Teil auch zwischen verschiedenen Batteriesystemherstellern – hilft, die Reparatur, Weiterverwendung und das Recycling von Batterie(-komponenten) effizient zu gestalten.
 - Die zunehmende Automatisierung von Wartung und Demontage führt zur Skalierung und Kostensenkung von Wiederverwendungs- und End-of-Life-Maßnahmen.
 - Recyclingtechnologien sind im Vergleich zu 2020 durch technische Weiterentwicklung deutlich (energie) effizienter, ökonomischer, sicherer und effektiver (insbesondere bezüglich Ausbeute und Reinheit) in der Erzeugung hochwertiger Rezyklate. Somit kann der Großteil der Materialien hochwertig und ökonomisch wiedergewonnen werden. Eine weitestgehend automatisierte Fließschemasimulation unterstützt bei der Optimierung durch die Offenlegung von Hotspots und dem Vergleich mit anderen Technologien und Prozessen.
- Wertschöpfungsnetzwerke
 - Die Plattform trägt maßgeblich zur Kooperation der Akteure und der übergeordneten Netzwerkoptimierung bei, zum Beispiel durch eine Nutzungsverlängerung und Kaskadenwirtschaft sowie eine hochwertige Kreislaufführung von Batteriematerialien.
 - Batterien werden über Akteure hinweg über den gesamten Lebenszyklus gemanagt und erzeugen dadurch völlig neue Geschäftsmodelle und Konstellationen von Akteuren.
 - Es entwickeln sich neue Rollen für existierende Akteure (kein klassisches Denken in Upstream und Downstream) und völlig neue Betätigungsfelder mit neuen Marktspielern. Durch die faire Verteilung von Aufwendungen und Gutschriften innerhalb der Netzwerke schafft die Plattform eine hohe Akzeptanz bei den Akteuren.
 - Die verbreitete Anwendung von digitalen Plattformen für Batterien und ihre Materialien hat zu einer hohen Transparenz und Markteffizienz geführt, die eine Vielzahl neuer Geschäftsmodelle für neue und alte Marktteilnehmer ermöglicht.
 - Damit einher geht eine strategische und operative Integration des Energie- und Transportsektors im Sinne der Sektorkopplung, unterstützt durch nachhaltige technologisch-gesellschaftliche Trends (insbesondere Elektromobilität, Energiewende und Industrie 4.0).

Dabei berücksichtigt die Entscheidungsplattform die Verzahnung der Mobilitäts- und Energiewende durch die bestmögliche Ausnutzung von Second-Life-Anwendungen, wie zum Beispiel stationäre Speichersysteme.

- Innerbetriebliche Umsetzung
 - Der Aufbau effektiver Demontagenetzwerke (Demontage, Bewertung, Transport) hat zu einer effizienten, sicheren Handhabung der rasch ansteigenden Mengen von End-of-User- und End-of-Life-Batterien geführt. Dabei hat die frühzeitige Steuerung des Markthochlaufs der Demontageanlagen durch die Unterstützung der Plattform eine effiziente Kombination aus dezentralen und zentralen Standorten und Systemen nach sich gezogen.
 - Neue ganzheitliche Kennzahlensysteme (ökonomisch, ökologisch, sozial), die neue zirkuläre Geschäftsmodelle und deren Wertströme auf Organisations- und Produktebene entsprechend abbilden, haben weite Anwendung gefunden und werden gemäß ihrem Beitrag zur Erreichung von (inter)nationalen Zielen für Ressourcenproduktivität und -effizienz veröffentlicht und nachverfolgt.

4.2 Mögliche Austauschbeziehungen (Trade-offs)

Bei der Entscheidungsunterstützung sind Zielkonflikte zu erwarten, da die ökologisch zu bevorzugende Behandlung gebrauchter Batterien nicht auch die betriebswirtschaftlich-ökonomisch sinnvollste darstellen muss. Exemplarisch lässt sich dies anhand der Demontagetiefe in der Aufbereitung erläutern. Umso tiefer demontiert wird, umso potenziell reiner lassen sich Komponenten und enthaltene Materialien trennen, wobei durch oftmals manuelle Prozesse die erzeugten Umweltauswirkungen gering sind. Gleichzeitig bedeuten manuelle Prozesse, insbesondere in Hochlohnländern, hohe Aufbereitungskosten^{247, 248} und mindern folglich die Wirtschaftlichkeit.

Als Grundlage der Entscheidungsplattform ist eine technische Umsetzbarkeit sicherzustellen. Daher sind die übergeordneten Ziele und deren Hierarchie und Gewichtung essenziell für eine nachhaltige und gesellschaftlich akzeptierte Entscheidungsunterstützung. Eine Umsetzung der Circular Economy ist unter der alleinigen Betrachtung von lokalen ökonomischen Faktoren, wie sie in der Regel aktuell genutzt werden, nicht realisierbar. Dem Ziel der Nachhaltigkeit folgend, soll daher neben dem volkswirtschaftlichen auch der ökologische und gesellschaftliche Aspekt in der Entscheidungsunterstützung verstärkt werden. Dabei ist im Sinne einer gesamtgesellschaftlichen

247 | Vgl. Canals Casals et al. 2016.

248 | Vgl. Kwade/Diekmann 2018.

unternehmerischen Verantwortung der ökologische und soziale Aspekt den ökonomischen Interessen gleichberechtigt bei- oder – soweit zumutbar – überzuordnen. Um Transparenz und Objektivität zu wahren, sollen dennoch alle Indikatoren dargestellt werden.

5 Handlungsempfehlungen und Roadmap

Ausgehend von den beschriebenen exemplarisch ausgestalteten Entscheidungsplattformen lassen sich nachfolgend Handlungsempfehlungen aussprechen und eine Roadmap für eine weitere

Ausgestaltung einer Entscheidungsplattform innerhalb der Circular Economy festlegen.

5.1 Handlungsempfehlungen für Politik, Wirtschaft, Wissenschaft, Zivilgesellschaft

Auszusprechende Handlungsempfehlungen lassen sich für vier Zielgruppen (Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft) festlegen, sie sind teilweise plattformbetreiberspezifisch. Nachfolgend sind in Tabelle 10 die Handlungsempfehlungen zusammenfassend aufgelistet.

	Plattformbetreiber		
	Fahrzeughersteller	Behörde/öffentliche Hand	Privatwirtschaft
Politik	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Standardisierung von Berechnungen, Bewertungen und Schnittstellen ▪ Zertifizierung ▪ Anreize für Second-Life-Anwendungen ▪ Datenschutz und Geheimhaltung ▪ (politische) Handlungsempfehlungen mit quantifizierten Zielvorgaben 		
		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Finanzierung und Steuerung der Plattform ▪ Transparenz und einfache Nutzung der Plattform ▪ Entwicklung einer Plattform mit Datenschnittstellen und Datenbeschränkungen 	
Wirtschaft	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schaffung von Nachfragemärkten ▪ Standardisierung von Berechnungen und Datenschnittstellen ▪ Organisation in Netzwerken ▪ Zusammenarbeit mit Wissenschaft 		
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Finanzierung und Steuerung der Plattform ▪ Datenschutz und Geheimhaltung von Dritten ▪ Entwicklung einer Plattform mit Datenschnittstellen und Datenbeschränkungen 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Finanzierung und Steuerung der Plattform ▪ Datenschutz und Geheimhaltung von Dritten ▪ Entwicklung einer Plattform mit Datenschnittstellen und Datenbeschränkungen
Wissenschaft	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Berechnungsgrundlagen und Kennzahlensysteme weiterentwickeln und validieren (zum Beispiel Life Cycle Assessment(LCA)-Methodik) ▪ Flexibilität gegenüber Produkten und Prozessen frühzeitig mitdenken ▪ Methoden für nachhaltige Entscheidungsfindung automatisieren beziehungsweise durch Software unterstützen ▪ Konzeptionelle Entwicklung und fortlaufende Evaluierung einer Entscheidungsplattform ▪ Anwendbarkeit auch ohne gezieltes Expertenwissen sicherstellen ▪ Anwendungsnahe Querschnittsforschung zur ganzheitlichen Entwicklung und Bewertung vorantreiben 		
Zivilgesellschaft	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bedeutung des Nutzers für Lebenszyklus hervorheben ▪ Verbleibendes wirtschaftliches Potenzial der Gebrauchtbatterien betonen ▪ Nutzung von Second-Life-Anwendungen (stationäre Speicher) 		

Tabelle 10: Handlungsempfehlungen in Abhängigkeit des Plattformbetreibers

5.2 Gemeinsame Roadmap für ein Pilotprojekt

Zur Weiterentwicklung des Pilotprojekts sind in Abbildung 43 und Abbildung 44 Umsetzungsschritte festgelegt und drei Zeit-horizonten zugeordnet.

Dabei gliedern sich die Umsetzungsschritte in der Plattform in hinterlegte standardisierte Berechnungsmethoden, komprimierte und einfache Visualisierungsmethoden sowie Prognosen zu Angebot und Nachfrage. Mittelfristig sollen prototypische Entscheidungsplattformen umgesetzt und weiterentwickelt werden, sodass im Anschluss eine valide und robuste Plattform entwickelt werden kann. Hierfür ist es notwendig, zentral Anreizsysteme für die Akteure entlang des Produktlebenszyklus hin zu einer zirkulären Wertschöpfung zu entwickeln.

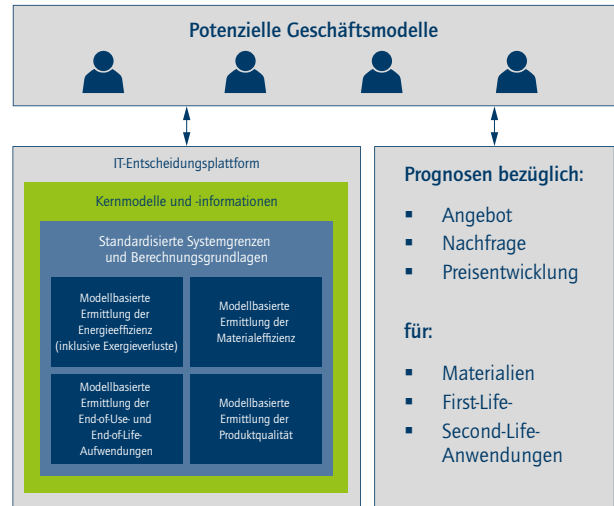


Abbildung 43: Umsetzungsschritte der modellbasierten Entscheidungsplattform (Quelle: eigene Darstellung)

Zeithorizont Arbeitspaket	Horizont 1												Horizont 2	Horizont 3
	2021				2022				2023				bis 2027	bis 2030
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4		
AP1: Entwicklung von Nachfrage- und Preisprognosen für First- und Second-Life-Anwendungen sowie Batteriematerialien in Europa bis 2035													Identifizierung möglicher Geschäftsmodelle und Ausarbeitung eines Plattformbetreibers; gezielte Unterstützung einer Entscheidungsplattform, unter anderem finanziell durch Unterstützung von Prototyping; Entwicklung eines Anreizsystems für zirkuläre Wertschöpfung in Netzwerken	Modelle vervollständigen/weiterentwickeln; Umsetzung der Entscheidungsplattform; Einbindung weiterer Akteure
AP2: Festlegung von internationalen/europäischen Berechnungsstandards, Systemgrenzen und Kennzahlen zur Bewertung von End-of-Use-/End-of-Life-Szenarien														
AP3: Konzeptionelle Entwicklung einer Plattform für verschiedene Betreiber														
AP4: Modellbasierte Ermittlung der Energieeffizienz (inkl. Exergieverlusten) verschiedener Prozessrouten														
AP5: Modellbasierte Ermittlung der Materialeffizienz verschiedener Prozessrouten														
AP6: Modellbasierte Ermittlung notwendiger Aufwendungen und erreichbarer Produktqualitäten verschiedener End-of-Use-/End-of-Life-Behandlungen														
AP7: Entwicklung von anwenderfreundlichen, komprimierten Berechnungs- und Visualisierungsmethoden														
AP8: Ausarbeitung der Roadmap für eine Entscheidungsplattform für Traktionsbatterien in Europa bis 2035														

Abbildung 44: Roadmap der modellbasierten Entscheidungsplattform (Quelle: eigene Darstellung)



6 Ausblick

Zur weiteren Ausgestaltung und Abstimmung des Pilotprojekts wird auf das Dachkonzept „Forschungsfabrik Batterie“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) verwiesen. Das BMBF verfolgt mit dem Konzept einen themenorientierten, kohärenten, nationalen Ansatz zur Förderung und Weiterentwicklung der Batterieforschung in Deutschland. Die Initiativen sind eng mit denen des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) mit Blick auf die Errichtung einer großskaligen Batteriezellproduktion sowie die Abdeckung der gesamten Wertschöpfungskette verzahnt. Insbesondere mit der Querschnittsinitiative Batterie-Lebenszyklus und dem Aufbau von zwei neuen Kompetenzclustern soll die Umsetzung einer Circular Economy für mobile Energiespeicher in Deutschland gestärkt werden:

- **Kompetenzcluster „Recycling/Green Battery“:** Im Fokus des Kompetenzclusters steht die nachhaltige Batteriezellproduktion unter der Prämisse eines effizienten Ressourceneinsatzes. Ziel dieses Schwerpunkts ist die Erarbeitung von Konzepten für ein recyclinggerechtes Batteriedesign. Das Design soll hierbei auf den verschiedenen Ebenen einer Batterie (Material-, Zellkomponenten- und Zellebene) realisiert werden. Auch soll mit der (Weiter-)Entwicklung von Recyclingverfahren die funktionserhaltende Materialrückgewinnung aus dem Recyclingstrom und aus Rückständen des Produktionsprozesses adressiert werden.
- **Kompetenzcluster „Batterienutzungskonzepte“:** Im Kompetenzcluster soll Know-how zur Modul- beziehungsweise Zelldiagnose inklusive einer End-of-Life-Schnellcharakterisierung sowie Zustandsbestimmung erarbeitet werden. Zusätzlich werden beschleunigte Alterungsverfahren und Sicherheitskonzepte adressiert. Die gesammelten Daten sollen zurück in die Zellentwicklung und die Fertigungsprozesse fließen. Durch diesen iterativen Prozess tragen sie damit zum Ressourcenschutz bei. Zur erfolgreichen Implementierung des Moduls wird eine ergänzende System- und Anwendungsanalyse vorgeschlagen. Neben der Beobachtung von Trends im Bereich

Energiespeicherung gilt es, die wirtschaftlichen, energetischen und umweltrelevanten Daten zu erfassen und zu analysieren.

Clusterübergreifend werden Kosten und potenzielle Umweltwirkungen entlang des Lebenswegs von Batterien untersucht. Mit dem Ziel einer (Batterie-)Systembewertung werden darüber hinaus auch potenzielle künftige Batteriesysteme auf ihre Wirtschaftlichkeit, Anwendungsrelevanz und Ökobilanz hin analysiert.

6.1 Erwartete Herausforderungen

- Zentral für die angestrebte Modellierung ist eine Spezifizierung des benötigten Dateninputs (zum Beispiel bezüglich des Zustands der Batterie, zukünftiger Hochlaufquoten, Marktdurchdringungsraten). Um eine entsprechende Szenario-bewertung vornehmen zu können, bedarf es einer Einigung und Festlegung auf bestimmte Standards und Zielsysteme, zum Beispiel hinsichtlich verschiedener Second-Use-Anwendungsfälle.
- Auch eine Harmonisierung von Industriestandards an der Schnittstelle zwischen den Anwendungsfällen „mobiler Stromspeicher“ und „stationärer Stromspeicher“ scheint hier relevant.

6.2 Offene Fragen und mögliche nächste Schritte

- Zertifikatehandel für Sekundärrohstoffe als mögliches Anreizsystem
- Einfluss von Stoffverboten auf Stoffströme
- Lernen von der Primärindustrie: Berücksichtigung von Treatment und Refining Charges (Recycling als Dienstleistungsgeschäft, Metalleigentum verbleibt beim Fahrzeughersteller beziehungsweise Anlieferer der Recyclingbatterien)
- Fokussierung des Recyclings auf (zertifizierte) Outputqualität
- Definition von Richtlinien zur Zuordnung, Verteilung und Dokumentation von Gutschriften durch Wiederverwendung und Recycling

Pilotsteckbrief III: „Demontagenetzwerk für Traktionsbatterien“

1 Motivation und Zielsetzung

Der Pilotsteckbrief III „Demontagenetzwerk für Traktionsbatterien“ ist im Zuge der Arbeiten der Arbeitsgruppe „Traktionsbatterien“ der *Circular Economy Initiative Deutschland* mit Fachleuten aus Wirtschaft und Wissenschaft (siehe Mitglieder der Unterarbeitsgruppe im Kapitel Projekt im Gesamtbericht) abgestimmt und formuliert worden. Der Pilotsteckbrief ist als fachlich begründeter Vorschlag an die zuständigen Ministerien der Bundesregierung aus der Sicht der Fachexpertise zu verstehen, da bezüglich des adressierten Themas hier ein wichtiger und notwendiger Beitrag für die essenzielle Optimierung der Kreislaufwirtschaft identifiziert worden ist.

1.1 Momentane Herausforderungen im System

Für die Verwertung von Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen sind Demontageanlagen zum Testen, Entladen und

Zerlegen der großen Lithium-Ionen-Batterien (im Falle von voll-elektrischen PKW handelt es sich hier um Batteriegehäusete von mehreren hundert Kilogramm) eine wichtige und entscheidende Schnittstelle. Zum einen können hier größere Stückzahlen an Batterien zunächst auf ihre Eignung für eine Zweitnutzung (zum Beispiel als Fahrzeug-Ersatzbatterie oder als stationäre Energiespeicher) untersucht werden (Abbildung 45). Zum anderen werden in entsprechenden Anlagen die Lithium-Ionen-Batterien, die nicht für eine Zweitnutzung geeignet sind, mit hierfür geeigneter Infrastruktur wie Hebevorrichtungen, Rolltischen, Akkuschraubern, „Robotern“ etc. auf Modul-, gegebenenfalls bis auf Zellebene zerlegt.

Die separierten Peripheriekomponenten (Batteriegehäuse, Schrauben, Kabel, Batteriemanagementsystem etc.) sind wichtige Wertkomponenten, die nach ihrer Separierung direkt in bestehende Verwertungskreisläufe eingespeist werden können. Aus einer Reihe von Ökobilanzen zum Recycling entsprechender

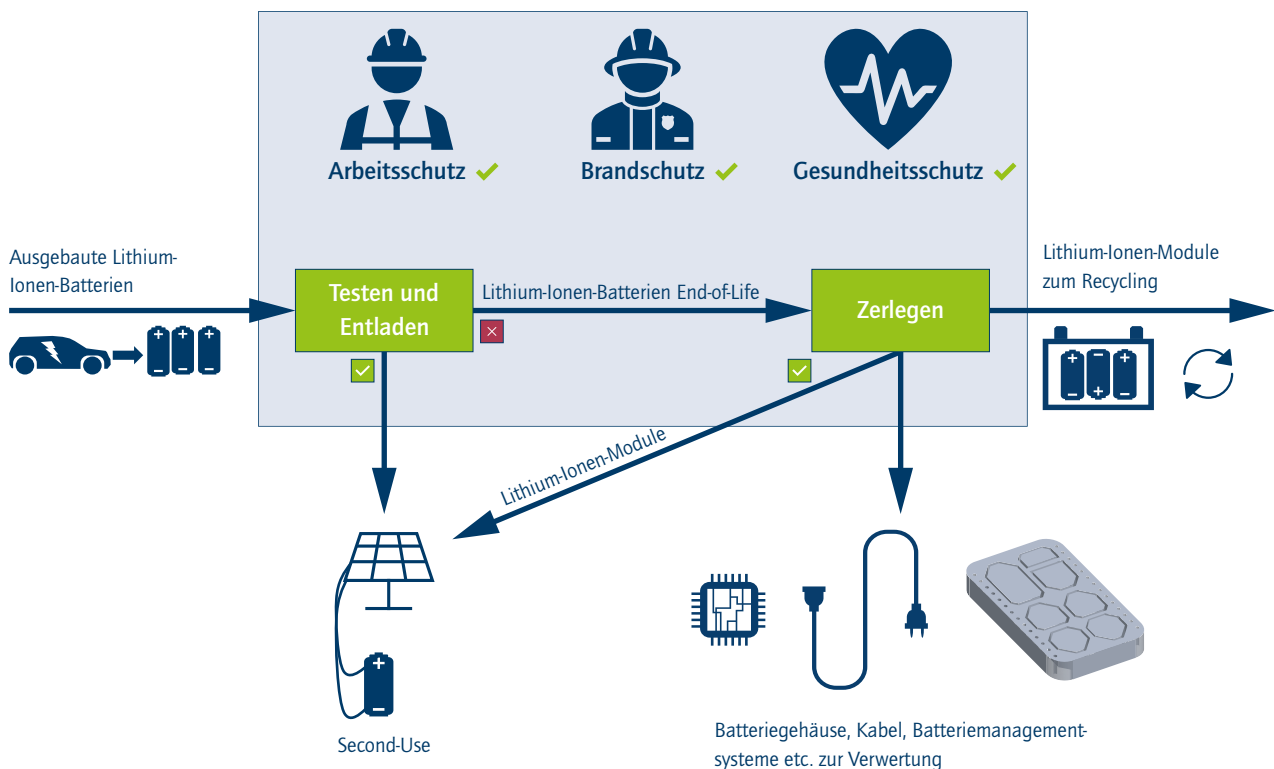


Abbildung 45: Konzept einer Demontageanlage für Traktionsbatterien (Quelle: eigene Darstellung)



Lithium-Ionen-Batterien^{249, 250, 251, 252} ist bekannt, dass die Verwertung dieser Komponenten sehr wichtige Beiträge für eine positive Gesamtbilanz des Recyclings beisteuern. Die ausgebauten Batteriemodule selbst werden je nach Lokalisierung der nachfolgenden Verwertung entweder am Ort der Demontageanlage weiter behandelt oder sie werden vorschriftsmäßig für den Transport zu einer externen Recyclinganlage verpackt. Durch das nachfolgende Recycling der Batteriemodule sollen Schlüsselmaterialien wie Lithium-, Nickel- und Kobaltsalze in batteriefähiger Qualität erneut der europäischen Wertschöpfungskette für Lithium-Ionen-Batterien bereitgestellt werden.

Notwendige Standards von Demontageanlagen

Die Mitglieder des Pilotprojekts III „Demontagenetzwerk für Traktionsbatterien“ stimmen überein, dass bezüglich des Brandschutzes, Arbeitsschutzes etc. übergreifende einheitliche Standards selbst innerhalb Deutschlands (geschweige denn EU-weit) für entsprechende Demontageanlagen noch weitgehend fehlen. Dies gilt auch für die notwendigen Qualifikationen der dort Beschäftigten. Notwendig ist demnach eine EU-weite Abstimmung von Mindeststandards zum Brandschutz, Gesundheits- und Arbeitsschutz für Demontageanlagen sowie zur notwendigen professionellen Qualifikation der dort beschäftigten Arbeitskräfte (unter anderem sind entsprechende Kurse zum sicheren Umgang mit Hochvoltssystemen wichtig).

Definition der räumlichen Dimension zur Betrachtung und Lösung von Problemen

Neben Herausforderungen bezüglich einheitlicher Standards und Anforderungen an die Demontageanlagen selbst besteht in der räumlich-logistischen Dimension in mehrfacher Hinsicht eine weitere Herausforderung innerhalb der europäischen Union:

- Der Hochlauf der Elektromobilität wird in den diversen Ländern Europas unterschiedlich steil verlaufen, wodurch auch der Anfall von End-of-Life-Batterien sehr unterschiedlich verteilt sein wird.
- Die Recyclinganlagen für Module aus Hochvoltbatterien werden bis auf Weiteres als große, zentralisierte Anlagen auf wenige EU-Länder konzentriert sein.
- Geringe Stückzahlen von End-of-Life-Batterien und hohe Transportdistanzen werden die Kosten für Logistik bis auf Weiteres hochhalten. Daher wird die zukünftige intelligente und optimale Lokalisierung und Dimensionierung von Demontageanlagen in Europa einen entscheidenden Schritt

für die Professionalisierung der Verwertungskette und die Senkung der Logistikkosten darstellen.

Es besteht Übereinstimmung innerhalb der Mitwirkenden dieses Pilotprojekts, dass für eine möglichst optimale logistische Lösung des Recyclings oder der Zweitnutzung (Second Life) von Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen europaweite Lösungen zielführend sind, das heißt:

- Es ist nicht sinnvoll, innerhalb nationalstaatlicher Grenzen zu agieren, es ist auch vor dem Hintergrund von Lösungsansätzen für die deutsche Wirtschaft in EU-Dimensionen zu planen.
- Daraus ergeben sich entsprechende Probleme nationaler Besonderheiten sowohl im Hinblick auf Sicherheitsstandards und weitere Vorgaben als auch bezüglich Notifizierungsverfahren für länderübergreifenden Transport und länderübergreifende Logistik etc.

Definition der zeitlichen Dimension zur Betrachtung und Lösung von Problemen

Unter den Mitwirkenden im Pilotprojekt „Demontagenetzwerk für Traktionsbatterien“ besteht Einigkeit, dass es sich bezüglich des notwendigen Aufbaus eines Netzes von Demontageanlagen in Europa um ein klassisches „Henne-Ei“-Problem handelt. Solange noch wenige End-of-Life-Batterien von Elektrofahrzeugen anfallen, ist der Anreiz für potenzielle Betreiber gering, Demontageanlagen zu errichten und zu betreiben. Andererseits bedeutet eine geringe Zahl von Demontageanlagen in Europa, dass allein aufgrund großer Transportentfernungen (von der Entnahme der Batterien aus den Fahrzeugen in Werkstätten, bis zur Demontageanlage) die spezifischen Logistikkosten und damit CO₂-Emissionen des Transports sehr hoch sind. Da mit dem Markthochlauf der Elektromobilität entsprechend zeitversetzt – ausgehend von einem gegenwärtig sehr niedrigen Ausgangsniveau – in den nächsten 10 bis 15 Jahren ein erheblicher Anstieg an End-of-Life-Batterien aus der Elektromobilität in Europa zu erwarten ist, besteht die große Herausforderung darin, diese Übergangszeit (bis circa 2030/2035) möglichst optimal zu gestalten. Investitionsentscheidungen für neue Demontageanlagen müssen hinsichtlich Zeitpunkt, Wahl des Anlagenstandorts und Dimensionierung der Anlagengröße entsprechend den künftig wachsenden Rücklaufmengen und der Konkretisierung der Anlagenausstattung (Grad und Anpassungsfähigkeit der Automatisierung hinsichtlich wechselnder Batterieformate und -chemien) auf einer validen

249 | Vgl. Buchert et al. 2011.

250 | Vgl. EcoBatRec 2016.

251 | Vgl. LithoREC I 2012.

252 | Vgl. LithoREC II 2016.

Datengrundlage getroffen werden. So kann die Recyclinginfrastruktur passgenau verbessert und im europäischen Maßstab skalierbar gemacht werden.

Demontagedesign als Voraussetzung für eine stark automatisierte Zerlegung

Eine weitere Herausforderung für den Betrieb von Recyclinganlagen besteht schließlich in einem forcierten Demontagedesign (Design for Disassembly) als essenzieller Voraussetzung für eine zukünftig stark automatisierte Zerlegung. Derzeit müssen – nicht zuletzt aufgrund der sehr hohen Vielfalt im Design und vor allem der Art der Gehäuseverbindungen der Hochvoltbatterien – in den Demontageanlagen zeit- und arbeitskraftintensive, überwiegend manuelle Prozessschritte durchgeführt werden, um die Zerlegung auf Modul-, gegebenenfalls bis auf Zellebene zu realisieren.

Mit einem forcierten Design for Disassembly sollen bei zukünftig größeren Mengenströmen an End-of-Life-Batterien folgende Vorteile erschlossen werden:

- höhere Arbeitssicherheit und Effektivität
- Kostensenkungen
- Kapazitätserhöhungen bei drastisch ansteigenden Mengen anfallender End-of-Life-Batterien
- Zusatznutzen durch Weiterentwicklungen der Industrie 4.0²⁵³

Definition des gemeinsam zu organisierenden vorwettbewerblichen Bereichs, Notwendigkeit von Informationstransfer und -vereinheitlichung

- Sinnvoll ist eine Bündelung von Stoffströmen (Batterien und/oder deren Komponenten), um Transport, Lagerung und Behandlung ökonomisch effizient zu gestalten. Hierzu sind Abgrenzungen zwischen Einzel- und kooperativen Vorgehen abzustecken. Eine wesentliche Rahmenbedingung wäre dann im Hinblick auf freigegebene Informationen die Schaffung einer Art IDIS²⁵⁴ for Batteries (International Dismantling Information System).
- Entnahme, Zustandsbewertung, Lagerung, Transport, Zerlegung, Sicherung etc. müssen einheitlich definiert werden sowie glaubhaft und vertretbar auch gegenüber Versicherungen (Brandschutzstandards) durchgesetzt werden können, um die Nebenkosten der Prozesse einzudämmen

und allen Behandlern entlang der Kette die notwendigen Informationen und Sicherheitsaspekte mitgeben zu können.

- Im Sinne eines Demontagedesigns (Design for Disassembly) müssen Voraussetzungen für eine stark automatisierte Zerlegung bei größeren zukünftigen Mengenströmen geschaffen werden.

1.2 Fokus und Definitionen des Pilotthemas

Im Rahmen des vorgesehenen Pilotvorhabens „Demontagenetzwerk für Traktionsbatterien“ sollen konkrete Lösungsvorschläge zu folgenden Zielen erarbeitet werden, um den oben aufgeführten Herausforderungen zu begegnen:

- detaillierte Ausformulierung der notwendigen – europaweit gültigen Standards für Demontageanlagen für Lithium-Ionen-Batterien (Zerlegung auf Modul-, gegebenenfalls bis auf Zellebene) aus Elektrofahrzeugen: angemessene Sicherheitsstandards (Brandvermeidung- und -bekämpfung etc.), Arbeitsschutzstandards (angemessene Schutzausrüstung, Hilfsaggregate etc.), Gesundheitsstandards (angemessener Luftaustausch, guter Luftabzug an den Arbeitsplätzen etc.), angemessene Qualifikationen der Beschäftigten (Entwicklung der Inhalte geeigneter Zusatzausbildungen speziell für den Umgang mit Hochvoltbatterien aus dem Elektromobilitätsbereich)
- Ausformulierung der konkreten Anforderungen für ein Demontagedesign (Design for Disassembly) aus der Sicht der Demontagepraxis, um zukünftig stärker automatisierte Zerlegeverfahren zu ermöglichen
- Entwicklung konkreter Vorschläge für einen angemessenen europaweiten Hochlauf der Anzahl der Demontageanlagen und Logistikzentren bis 2035 (Definition von Mindestkapazitäten, optimaler Verortung, Zusammenarbeit mit Vertragswerkstätten und freien Werkstätten usw., Prüfung, ob Investitionsbeihilfen (European Investment Bank etc.) zielführend sind, um Investitionszurückhaltungen zu lockern etc.)

2 Erfolgskriterien für die Implementierung

Die folgenden aufgeführten Punkte sind Erfolgskriterien für die Realisierung des umfangreichen Pilotvorhabens „Demontagenetzwerk für Traktionsbatterien“.

253 | So können sich durch eine umfassende Digitalisierung vielfältige Vorteile ergeben, wie zum Beispiel eine Steigerung der Transparenz bei der Produktnachverfolgung (siehe auch Pilotsteckbrief I „Kenntnis des Batterielebens“), Effizienzsteigerungen bei inner- und außerbetrieblichen Prozessen oder eine Steigerung der Anschlussfähigkeit im Hinblick auf nachgelagerte Wertschöpfungspfade (siehe auch Pilotsteckbrief II „Modellbasierte Entscheidungsplattform“).

254 | Vgl. IDIS 2020.



2.1 Übersicht über einzubindende Akteure aus der Praxis

Akteure aus den folgenden Bereichen sind für die Realisierung des Pilotvorhabens einzubinden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass einzelne Akteure auch mehrere Funktionen abdecken können.

1. Akteure im Materialfluss
 - Fahrzeug(teile)hersteller
 - Vertragswerkstätten der Fahrzeughersteller
 - Freie Werkstätten
 - Batteriekomponentenhersteller
 - Batterie- beziehungsweise Zellhersteller
 - Autoverwerter
 - Logistiker
 - Demontagebetriebe
 - Refurbisher
 - Metallurgische Recycler
2. Stakeholder in der Peripherie
 - Service (IT, Tracing und Tracking, Monitoring, Reporting)
 - Maschinenbauer, die Vorrichtungen der Demontage bereitstellen. Diese unterstützt die Arbeiter bei der Demontage (zum Beispiel beim Heben der Batterie, Schrauben, Öffnen des Systems etc.)
 - Prüfinstanz, die mittels bestimmter Kriterien über die End-of-Life-Verwendung der Batterien entscheidet (siehe auch Pilotsteckbrief II „Modellbasierte Entscheidungsplattform“), Versicherer (insbesondere hinsichtlich der Gestaltung von Lager- und Brandschutzstandards)
 - Wissenschaftliche Institutionen mit einschlägigen Erfahrungen im Bereich Recycling von Lithium-Ionen-Batterien
 - Transportboxenhersteller
3. Regulatorik:
 - Behörden für die Überwachung
 - Behörden für die Gesetzgebung
 - Behörden für die Grenzüberwachung (Zoll)

Für ein umfassendes Pilotvorhaben „Demontagenetzwerk für Traktionsbatterien“ sollte sich ein Konsortium aus dem Kreis der

oben genannten Akteure zusammensetzen. Der Umfang sowie die Art und Intensität der Beteiligung (als Mitglied des Projektkonsortiums, Unterauftragnehmer, Mitglied des europäischen Begleitkreises) wären vor einer Einreichung einer konkreten Projektskizze abzustimmen.

2.2 Berücksichtigung des relevanten Handlungsbedarfs bezüglich regulatorischer Rahmenbedingungen

Innerhalb dieses Pilotprojekts wurden folgende relevante Handlungsbedarfe bezüglich regulatorischer Rahmenbedingungen für ein Demontagenetzwerk für Traktionsbatterien identifiziert. Diese umfassen die Bereiche Abfallrecht, Gefahrgutrecht, die Bereiche Brandschutz, Arbeitsschutz, Gesundheitsschutz sowie Demontagedesign (Design for Disassembly):

- Harmonisierung nationaler (und sub- beziehungsweise supranationaler) Regulierungen zur Einstufung der Lithium-Ionen-Batterien als „gefährlicher“ Abfall^{255, 256}
- Harmonisierung nationaler (und sub- beziehungsweise supranationaler) Behördenauslegungen zur grenzüberschreitenden Verbringung von Lithium-Ionen-Batterien als (unter Umständen gefährlicher) Abfall (via sogenannte „Gelbe Liste/Notifizierung“ versus „Grüne Liste“ gemäß Basel-Konvention)^{257, 258}
- praxisnahe und umsetzbare gefahrgutrechtliche Vorgaben für den Transport von sogenannten kritischen („nicht transportsicheren“) Lithium-Ionen-Batterien durch die national zuständigen Behörden (beispielsweise durch die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) in Deutschland)^{259, 260}
- technische und administrative Lösungen für das Fast Tracking bei grenzüberschreitenden Transporten zertifizierter Akteure
- Standards und Richtlinien für die Handhabung und das Demontageverfahren, die das Design beeinflussen (Design for Disassembly)
- Arbeitssicherheitsstandards für das Handling der Batterie sowie Standards für hochwertige Demontageprozesse (Arbeitsschutz, Gesundheitsschutz, Brandschutz)
- gesetzliche Regelungen zur Evaluation des Batteriezustands (zum Beispiel verunfallt, entladen)

255 | Siehe auf EU-Ebene: Index der Entscheidung der EU-Kommission Nr. 2000/532/EG, sogenannter „European Waste Code“. | Vgl. Europäische Union 2000.

256 | Siehe auf DE-Ebene: Index der Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (AVV). Vgl. Bundesanzeiger 2001.

257 | Siehe auf EU-Ebene: Ratsbeschluss über die Kontrolle der grenzüberschreitenden Verbringung von gefährlichen Abfällen und ihrer Entsorgung (Basler Übereinkommen) (93/98/EWG). | Vgl. EWG/EU 1993.

258 | Siehe Basel Convention on the control of transboundary movements of hazardous wastes and their disposal. | Vgl. United Nations Environment Programme 1989.

259 | Siehe Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR). Vgl. UNECE 1957.

260 | Vgl. Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung 2019.

- Entwicklung von gesetzlich verankerten Definitionen, die klären, wann eine Batterie „beschädigt“ ist
 - Hierzu gibt es bereits Standards je nach Zulieferer, aber keine eindeutige Unterscheidung (sondern nur eine Unterscheidung in Grün, Gelb, Rot für die Sicherheit der Handhabe)
- Regelungen zur professionellen Feststellung des Batteriezustands
 - Stichwort Batterie-Testing
- Regelungen zur Restladung (Remaining of Charge) und zum Batteriezustand (State of Health, SoH) für die Entscheidungsfindung für die Zweitnutzung oder das Recycling (siehe auch den Pilotsteckbrief II „Modellbasierte Entscheidungsplattform“)
- verpflichtende Regelungen zur Verfügbarkeit der Demontageanleitung (in digitaler Struktur)

2.3 Benötigte Qualifikationen zur Realisierung des Pilotprojekts

Ein Projektkonsortium „Demontagenetzwerk für Traktionsbatterien“ sollte durch seine Mitglieder folgende Qualifikationen abdecken:

- umfassende Erfahrungen und Kenntnisse bezüglich professioneller Recyclingkreisläufe für Lithium-Ionen-Batterien zur Rückgewinnung hochwertiger Batteriematerialien
- praktische Erfahrungen bezüglich Entladen, Testen, Bewerten im Hinblick auf Second Life und Zerlegen von Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen (möglichst bereits vorhandene Infrastruktur hierzu)
- umfassende Erfahrungen und Kompetenzen hinsichtlich Arbeits- und Gesundheitsschutzanforderungen bei der Demontage von Traktionsbatterien sowie hinsichtlich Brandvermeidungs- und Brandbekämpfungsinfrastrukturen bei der Behandlung von Lithium-Ionen-Batterien
- umfassender Überblick über alle relevanten regulatorischen Rahmenbedingungen sowie erfahrungsgestützte Impulse für die Optimierung der Regulierungen
- Erfahrungen und Kompetenzen zur Erstellung von differenzierten Szenarien (Berücksichtigung von wesentlichen Unterschieden der einzelnen EU-Mitgliedstaaten) zu dem Markteintritt und dem Anfall von Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen (gesamte Mengenstrompotenziale der Batterien, zusätzliche Schlüsselmaterialien wie Lithium, Nickel, Kobalt, Kupfer etc.)

3 Erwartete Potenziale des Pilotprojekts

3.1 Einfluss auf das Zielbild 2030

Zu folgenden Aspekten des Zielbilds 2030 (siehe Kapitel 3.3 im Gesamtbericht) soll das Pilotprojekt „Demontagenetzwerk für Traktionsbatterien“ einen substantziellen Beitrag leisten:

- Regulatorik: Einheitliche internationale Standards hinsichtlich der End-of-Life-Behandlung und -Logistik von Traktionsbatterien haben unlauteren Wettbewerb und Dumping weitestgehend unterbunden.
- Stoffströme: Bis 2030 wird ein kleiner (etwa zehn Prozent), aber steigender Anteil des Bedarfs für Schlüsselmaterialien für Lithium-Ionen-Batterien durch Rezyklate gedeckt²⁶¹ und der CO₂- und Umweltfußabdruck der Batterien wird dadurch verbessert.
- Technische Entwicklung: Design for Circularity/ Design for Recycling sind zum Industriestandard geworden und ermöglichen Wertschöpfungsnetzwerk-Teilnehmenden über den Lebenszyklus der Batterie hinweg eine sichere und effiziente Handhabe von Batterien für zirkuläre Geschäftsmodelle.
- Technische Entwicklung: Die zunehmende Automatisierung von Wartung und Demontage ermöglicht die Skalierung und Kostensenkung von Wiederverwendungs- und End-of-Life-Maßnahmen. Dennoch bleibt die Circular Economy für Traktionsbatterien ein Jobmotor, da auch in nahezu vollautomatischen Prozessen viel Fachwissen und menschliche Intervention notwendig bleiben.
- Innerbetriebliche Umsetzung: Der Aufbau effektiver Demontagenetzwerke (Demontage, Bewertung, Transport) hat eine effiziente, sichere Handhabe der rasch ansteigenden Mengen von End-of-Life-Batterien bewirkt. Dabei hat die frühzeitige Steuerung zu einer effizienten Kombination aus dezentralisierten Standorten für optimierte Reverse-Logistik und aus zentralen Anlagen für Skaleneffekte geführt.

Der Aufbau eines europaweiten Netzwerks von leistungsfähigen Demontageanlagen für Traktionsbatterien ist essenziell für den Erfolg der gesamten Recycling- beziehungsweise Wiederverwendungskette, da es das wichtige Zwischenglied zwischen Erfassung und Sammlung (Vertragswerkstätten etc.) und der Weiterbehandlung sowie Recycling (oder Second Life) der Batteriemodule darstellt. Die moderne, möglichst automatisierte Zerlegung der Hochvoltbatterien in Anlagen, die hohen Brand-, Arbeits- und Gesundheitsschutzanforderungen Rechnung tragen und von hoch qualifiziertem Personal betrieben werden, muss ein wichtiger Markenkern der Recyclingwirtschaft in Europa werden.

261 | Vgl. Buchert et al. 2019.



3.2 Ökologische, soziale und wirtschaftliche Potenziale

Das Pilotprojekt „Demontagenetzwerk für Traktionsbatterien“ soll maßgeblich den Boden dafür bereiten, dass zukünftig europaweit folgende Potenziale aus der Verwertung der Lithium-Ionen-Batterien von Elektrofahrzeugen erschlossen werden:

- **Ökologisch:** Ein effizientes Netzwerk professionell ausgestatteter und betriebener Demontagezentren sorgt europaweit für eine optimale Zuordnung der Batteriespeicher für ein Second Life oder für eine an Zielfractionen orientierte Demontage und ein nachfolgendes hochwertiges Recycling der Komponenten. Die gesamte Ökobilanz der Traktionsbatterien und der Elektrofahrzeuge insgesamt wird dadurch weiter verbessert und eine nachhaltige Rohstoffquelle von Schlüsselmaterialien für die Elektromobilität in Europa selbst erschlossen.
- **Sozial:** Durch die Optimierung dieses wichtigen Moduls einer Kreislaufwirtschaft von Traktionsbatterien werden zukunftsfähige Arbeitsplätze mit unterschiedlichen Anforderungsprofilen europaweit geschaffen.
- **Wirtschaftlich:** Das Pilotprojekt „Demontagenetzwerk für Traktionsbatterien“ soll einen maßgeblichen Beitrag zur optimalen Erschließung der Wertschöpfungsketten in diesem Bereich der Kreislaufwirtschaft leisten. Aufgrund optimierter Testverfahren werden Effizienzpotenziale einerseits für Erlöse erschlossen (Entscheidung Second-Life versus End-of-Life je Batteriesystem) und andererseits Kosten durch optimierte Demontageverfahren (unter anderem durch Design for Disassembly, automatisierte Zerlegung), die Vermeidung von Brandereignissen etc. und eine optimierte Logistik (Kombination aus dezentralen und zentralen Anlagen in am besten geeigneten Standorten) reduziert.

4 Roadmap für das Pilotprojekt Demontagenetzwerk für Traktionsbatterien

Im Rahmen eines umfassenden Pilotprojekts „Demontagenetzwerk für Traktionsbatterien“ soll kurzfristig in einem dreijährigen Prozess eine detaillierte Roadmap für ein entsprechendes Demontagenetzwerk in Europa erarbeitet werden. Die Roadmap wird durch mittelfristige Maßnahmen mit einem zeitlichen Horizont bis 2030 ergänzt. In Abbildung 46 ist ein Vorschlag für die wesentlichen Arbeitspakete und ihre Bearbeitung visualisiert.

Arbeitspaket 1: Erarbeitung und Auswertung eines szenariengestützten Hochlaufmodells für Demontageanlagen in Europa bis 2035

In diesem Arbeitspaket werden differenzierte Szenarien zu dem Markteintritt und zu dem Anfall von Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen in Europa bis 2035 erstellt. Hierbei müssen sowohl die unterschiedlichen Charakteristika des Markthochlaufs und des Anfalls von Lithium-Ionen-Batterien in den einzelnen EU-Mitgliedstaaten für die Mengenströme Berücksichtigung finden als auch andere wichtige Größen wie etwa Trends in der

Arbeitspaket	Zeithorizont				Horizont 1												Horizont 2	Horizont 3		
					2021				2022				2023				bis 2027	bis 2030		
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4				
AP1: Szenariengestütztes Hochlaufmodell für Demontageanlagen in Europa																			Aufbauend auf den Standards und Roadmaps: Mitgliedstaaten und EU-Kommission (sowie gegebenenfalls Europäische Investitionsbank) unterstützen gezielt Demontagenetzwerke, unter anderem finanziell, durch Unterstützung von Prototyping, regionaler Differenzierung etc.	Demontagenetzwerk vervollständigen bis zu hohem Reifegrad, um auf Rücklaufmengen 2030/2035 vorbereitet zu sein. Hierbei insbesondere strukturelle Unterstützung der südlichen und östlichen EU-Mitgliedsstaaten basierend auf Bedarfen aus Modellierungen
AP2: Arbeits- und Gesundheitsschutzstandards für Demontageanlagen																				
AP3: Brandvermeidungsstandards und Brandbekämpfungsstandards für Demontageanlagen																				
AP4: Ausarbeitung passgenauer Zusatzqualifikationen von Beschäftigten in Demontageanlagen																				
AP5: Design for Disassembly für eine automatisierte Zerlegung																				
AP6: Abstimmung aller Arbeiten mit einem europäisch besetzten Begleitkreis																				
AP7: Ausarbeitung der Roadmap für ein Demontagenetzwerk für mobile Stromspeicher in Europa bis 2035																				

Abbildung 46: Mögliche Implementierungsschritte für die Etablierung eines europaweiten Demontagenetzwerks (Quelle: eigene Darstellung)



Zellenzusammensetzung (Lithium, Nickel, Kobalt etc.). Für die Frage der notwendigen Verortung und Dimensionierung der Demontageanlagen in Europa bis 2035 („Demontagenetzwerk“) werden Interviews mit ausgewählten Akteuren aus der Automobilindustrie, dem Logistikgewerbe und der Recyclingwirtschaft geführt, um die aus den Szenarien errechneten Mengenströme an End-of-Life-Batterien in ein Hochlaufmodell für Demontageanlagen in Europa zu überführen. Diese Arbeiten sollen in einem frühen Stadium des Gesamtvorhabens durchgeführt werden, um den Verbundpartnern wichtige Impulse für die anderen Arbeitspakete zu liefern. Am Ende des Projektzeitraums soll eine kurze Überprüfungs- und Validierungsschleife der Szenarien erfolgen, um neueste Trends und Dynamiken bei Bedarf aufzunehmen.

Arbeitspaket 2: Erarbeitung und Abstimmung angemessener Arbeits- und Gesundheitsschutzstandards für Demontageanlagen

Die Erarbeitung und Abstimmung angemessener Arbeitssicherheitsstandards (Arbeits- und Gesundheitsschutz) ist ein wesentlicher Baustein für moderne Demontageanlagen. Da in vielen Regionen und Mitgliedstaaten der Europäischen Union mit der Errichtung derartiger Anlagen industrielles Neuland betreten wird und das Gefährdungspotenzial bei der Testung, Entladung und Zerlegung der Batterien (Hochvoltssysteme, mögliche Fluorwasserstoffemissionen etc.) nicht unterschätzt werden darf, sollen europaweit einheitliche Standards erarbeitet und vorgeschlagen werden. Auch für die Ergebnisse dieses Arbeitspaketes soll gegen Ende des Vorhabens eine Validierungsschleife sicherstellen, dass die neuesten Erkenntnisse in die Arbeiten eingeflossen sind.

Arbeitspaket 3: Erarbeitung und Abstimmung angemessener Brandvermeidungs- und Brandbekämpfungsstandards für Demontageanlagen

Brandereignisse mit zum Teil erheblichem Schadensausmaß sind im Zusammenhang mit dem Umgang mit Lithium-Ionen-Batterien ein zunehmendes Phänomen und eine drängende Herausforderung in der Recyclingwirtschaft. Die Auflagen und Policen der Versicherungswirtschaft für die Betreiber steigen entsprechend und müssen in den Gesamtkosten des Batterie-recyclings berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wird nicht zuletzt aufbauend auf den Erfahrungen und Lernkurven von Praxisakteuren ein Manual für Brandvermeidungs- und Brandbekämpfungsstandards für Demontageanlagen ausgearbeitet. Eine europaweite Harmonisierung der Standards ist hier sehr wichtig, um Marktverzerrungen innerhalb Europas zu vermeiden.

Arbeitspaket 4: Ausarbeitung und Abstimmung für passgenaue Zusatzqualifikationen von Beschäftigten in Demontageanlagen

Demontageanlagen für Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen können nur sicher und effizient betrieben werden, wenn das Personal dieser Anlagen entsprechend optimal aus- und weitergebildet wird. In diesem Bericht haben mitwirkende Fachleute aus der Praxis hierzu bereits auf eine Reihe von bestehenden gravierenden Defiziten hingewiesen (zum Beispiel fehlende maßgeschneiderte Fortbildungsangebote), welchen in diesem Arbeitspaket qualifiziert entgegengearbeitet werden soll. Als Ergebnis dieses Arbeitspakets steht ein dezidiertes Anforderungskatalog für die notwendige berufliche Grundqualifikation und für wichtige Zusatzausbildungen, die das Personal entsprechender Anlagen je nach Funktion (Betriebsleiter, Zerlegearbeiter etc.) erfüllen muss, um den relevanten Anforderungen zu genügen.

Arbeitspaket 5: Design for Disassembly und automatisierte Zerlegung

Vor dem Hintergrund deutlich steigender Anfallmengen von Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen in den nächsten 10 bis 15 Jahren in Europa besitzt eine stärker automatisierte Zerlegung ein hohes Potenzial für Effizienzsteigerungen und Kostensenkungen. Eine wichtige Voraussetzung hierfür ist, dass die Erfahrungen und Anforderungen der Praxisakteure für die optimale Zerlegung in Impulse für ein optimiertes Design for Disassembly übersetzt werden. Ergebnis dieses Arbeitspakets ist ein Anforderungskatalog mit Prioritäten für ein Batteriedesign, welches ein späteres automatisiertes Zerlegen der Batterien nachdrücklich unterstützt – ohne die Funktionsfähigkeit der Lithium-Ionen-Batterien während der Nutzungsphase einzuschränken.

Arbeitspaket 6: Abstimmung aller Arbeiten mit einem europäisch besetzten Begleitkreis

Der Aufbau eines effizienten Demontagenetzwerks ist eine Aufgabe mit europäischer Dimension, da bereits heute – trotz noch geringerer Mengenströme – die Recyclingströme von Hochvoltbatterien transnational in der Europäischen Union organisiert sind. Aus diesem Grund sollen alle Arbeiten in diesem vorgeschlagenen Vorhaben von einem Begleitkreis beraten werden, der sich aus Fachleuten diverser Disziplinen (Fahrzeug(teile) hersteller, Recyclingunternehmen, Regulatorik, Normung, Service Provider etc.) von Vertretern der Europäischen Kommission und aus unterschiedlichen Mitgliedstaaten zusammensetzt. Wichtig ist hier eine gute Repräsentativität der unterschiedlichen regionalen Cluster innerhalb der EU. Dieser europäische Begleitkreis soll nahezu über die gesamte Projektlaufzeit arbeiten, regelmäßig

Zwischenergebnisse aus den unterschiedlichen Arbeitspaketen vorgestellt bekommen und darauf Empfehlungen für notwendige Anpassungen zwecks optimaler europäischer Harmonisierung von Standards und Regularien an das Projektteam geben.

Arbeitspaket 7: Ausarbeitung der Roadmap für ein Demontage- netzwerk für Traktionsbatterien in Europa bis 2035

Abschließend erarbeitet der Projektverbund aus den Ergebnissen aller Arbeitspakete gemeinsam einen Implementierungsplan für die Entwicklung eines effizienten Demontagenetzwerks für Traktionsbatterien in Europa mit der Zeitschiene bis 2035. Dadurch soll der Hochlauf der Elektromobilität mit einer angemessenen Roadmap für ein Demontagenetzwerk flankiert werden. Entsprechend den erwarteten Rücklaufmengen an Hochvoltbatterien wird ein zeitlich gestaffelter Stufenplan für den Ausbau des Demontagenetzwerks aufgestellt, der alle Elemente der zuvor skizzierten Arbeitspakete umfasst. Die Roadmap soll klare Hinweise geben, wann, wo und mit welchen Kapazitäten bis 2035 in Europa Demontageanlagen errichtet werden müssen, welche Investitionen dafür benötigt werden und welche Finanzierungsmethoden zur Realisierung empfohlen werden können. Die

Roadmap soll nicht zuletzt über die Kontakte des europäischen Begleitkreises sowohl auf Ebene der Mitgliedstaaten als auch der EU (Kommission, Europäisches Parlament, Industrieverbände) vorgestellt und für ihre Umsetzung im Kontext des European Green Deal nachdrücklich geworben werden.

5 Ausblick

Nach den übergreifenden Zielen des European Green Deal der Europäischen Union und den entsprechenden Zielen der Bundesregierung stellt die Optimierung der Kreislaufwirtschaft eine wichtige Stellschraube zur Schonung von Ressourcen und für einen forcierten Klimaschutz dar. Speziell eine optimierte Verwertung (auch Wiederverwendung) von Lithium-Ionen-Batterien in Europa verspricht mittel- und langfristig ein erhebliches Potenzial zur Minderung der Abhängigkeit von außereuropäischen Rohstoffquellen sowie einen wichtigen Beitrag zum Ressourcen- und Klimaschutz. Das Aufgreifen dieses Vorschlags für ein umfassendes Pilotprojekt „Demontagenetzwerk für Traktionsbatterien“ obliegt der Prüfung und Entscheidung durch die zuständigen Bundesressorts.



Literatur

Abadías Llamas et al. 2020

Abadías Llamas, A./Bartie, N. J./Heibeck, M./Stelzer, M./Reuter, M. A.: „Simulation-Based Exergy Analysis of Large Circular Economy Systems: Zinc Production Coupled to CdTe Photovoltaic Module Life Cycle“. In: Journal of Sustainable Metallurgy, 6: 1, 2020, S. 34-67.

acatech 2020

acatech: EIBA. *Sensorische Erfassung, automatisierte Identifikation und Bewertung von Altteilen anhand von Produktdaten sowie Informationen über bisherige Lieferungen*, 2020. URL: <https://www.acatech.de/projekt/eiba-sensorische-erfassung-automatisierte-identifikation-und-bewertung-von-altteilen-anhand-von-produktdaten-sowie-informationen-ueber-bisherige-lieferungen/> [Stand: 30.06.2020].

Agora Verkehrswende 2017

Agora Verkehrswende: *Mit der Verkehrswende die Mobilität von morgen sichern. 12 Thesen zur Verkehrswende*, 2017. URL: https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/12_Thesen/Agora-Verkehrswende-12-Thesen_WEB.pdf [Stand: 22.06.2020].

Agora Verkehrswende 2018

Agora Verkehrswende: *Klimaschutz 2030 im Verkehr: Maßnahmen zur Erreichung des Sektorziels*, 2018. URL: https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/Klimaschutzszenarien/Agora_Verkehrswende_Klimaschutz_im_Verkehr_Massnahmen_zur_Erreichung_des_Sektorziels_2030.pdf [Stand: 22.06.2020].

Agora Verkehrswende 2019

Agora Verkehrswende: *Klimabilanz von Elektroautos. Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial*, 2019. URL: https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2018/Klimabilanz_von_Elektroautos/Agora-Verkehrswende_22_Klimabilanz-von-Elektroautos_WEB.pdf [Stand: 22.06.2020].

Agora Verkehrswende/Agora Energiewende 2018

Agora Verkehrswende/Agora Energiewende: *Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe*, 2018. URL: https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/Die_Kosten_synthetischer_Brenn_und_Kraftstoffe_bis_2050/Agora_SynCost-Studie_WEB.pdf [Stand: 30.06.2020].

Ahmadi et al. 2014

Ahmadi, L./Yip, A./Fowler, M./Young, S. B./Fraser, R. A.: „Environmental feasibility of re-use of electric vehicle batteries“. In: Sustainable Energy Technologies and Assessments, 6, 2014, S. 64-74.

Arbib/Seba 2017

Arbib, J./Seba, T.: *Rethinking Transportation 2020-2030*, 2017.

Ardente et al. 2018

Ardente, F./Talens Peiró, L./Mathieux, F./Polverini, D.: „Accounting for the environmental benefits of remanufactured products: Method and application“. In: Journal of Cleaner Production, 198, 2018, S. 1545-1558.

Ashby 2016

Ashby, M. F.: *Materials and Sustainable Development*: Butterworth-Heinemann 2016.

Bartie et al. 2020

Bartie, N. J./Abadías Llamas, A./Heibeck, M./Fröhling, M./Volkova, O./Reuter, M. A.: „The simulation-based analysis of the resource efficiency of the circular economy – the enabling role of metallurgical infrastructure“. In: Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 129: 2, 2020, S. 229-249.

Bloomberg 2020

Bloomberg: *China Embraces Battery-Swapping System for Electric Vehicles*, 2020. URL: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2020-01-17/china-embraces-ev-battery-swap-technology-tesla-has-cooled-on> [Stand: 30.06.2020].

Bobba et al. 2018

Bobba, S./Mathieux, F./Ardente, F./Blengini, G. A./Cusenza, M. A./Podias, A./Pfrang, A.: „Life Cycle Assessment of repurposed electric vehicle batteries: an adapted method based on modelling energy flows“. In: Journal of Energy Storage, 19, 2018, S. 213-225.

Bobba et al. 2019

Bobba, S./Mathieux, F./Blengini, G. A.: „How will second-use of batteries affect stocks and flows in the EU? A model for traction Li-ion batteries“. In: Resources, conservation, and recycling, 145, 2019, S. 279-291.

Boston Consulting Group/Prognos 2019

Boston Consulting Group/Prognos: *Analyse Klimapfade 2030*, 2019. URL: https://image-src.bcg.com/Images/BCG-Prognos-Analyse-Klimapfade-Verkehr-2030_tcm58-212550.pdf [Stand: 22.06.2020].

Buchert et al. 2019

Buchert, M./Dolega, P./Degreif, S.: *Gigafactories für Lithium-Ionen-Zellen – Rohstoffbedarfe für die globale Elektromobilität bis 2050*, Darmstadt, 2019.

Buchert et al. 2011

Buchert, M./Jenseit, W./Merz, C./Schüler, D.: *Entwicklung eines realisierbaren Recyclingkonzepts für die Hochleistungsbatterien zukünftiger Elektrofahrzeuge – LiBRi*, Darmstadt, 2011.

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung 2019

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung: *Damit Lithium-Batterien sicher unterwegs sind*, 2019. URL: <https://www.bam.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Energie/damit-lithium-batterien-sicher-unterwegs-sind.html> [Stand: 30.06.2020].

Bundesanzeiger 2001

Bundesanzeiger: Verordnung zur Umsetzung des Europäischen Abfallverzeichnisses 10.12.2001.

Bundesministerium für Bildung und Forschung 2020

Bundesministerium für Bildung und Forschung: *ReziProK. Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Innovative Produktkreisläufe*, 2020. URL: <https://innovative-produktkreislaeufe.de/Verbundprojekte/%C3%9Cbersicht.html> [Stand: 30.06.2020].

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit 2019

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit: *Referentenentwurf für die Fortschreibung des Deutschen Ressourceneffizienzprogramms ProgRess III*, Berlin, 2019.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2017

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: *„Tag der Verwaltungsschale: Gelungener Auftakt für den Industrie 4.0-Praxistest“* (Pressemitteilung vom 26.10.2017). URL: https://www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/DE/Kurz-meldungen/2017/2017-09-22_verwaltungsschale.html [Stand: 30.06.2020].

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie et al. 2011

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie/Bundesministerium für Verkehr/Bau und Stadtentwicklung/Bundesministerium für Umwelt/Naturschutz und Reaktorsicherheit/Bundesministerium für Bildung und Forschung: *Regierungsprogramm Elektromobilität*, Berlin, 2011.

Büscher et al. 2017

Büscher, J./Hussy, C./Kessels, K./Koper, M./Munzel, B.: *Support to R&D Strategy for battery based energy storage* (N° ENER C2/2015-410), 2017.

Bustamante et al. 2020

Bustamante, X./Orfanos, A./Tedesco, R./Zill, M.: *The Positive Side of Batteries*, Brüssel, 2020.

Canals Casals et al. 2016

Canals Casals, L./Amante García, B./González Benítez, M. M.: *„A Cost Analysis of Electric Vehicle Batteries Second Life Businesses“*. In: Ayuso Muñoz, J. L./Yagüe Blanco, J. L./Capuz-Rizo, S. F. (Hrsg.): *Project Management and Engineering Research*, 2014, Cham: Springer International Publishing 2016 (Lecture Notes in Management and Industrial Engineering), S. 129–141.

Cerdas et al. 2018

Cerdas, F./Titscher, P./Bognar, N./Schmich, R./Winter, M./Kwade, A./Herrmann, C.: *„Exploring the Effect of Increased Energy Density on the Environmental Impacts of Traction Batteries: A Comparison of Energy Optimized Lithium-Ion and Lithium-Sulfur Batteries for Mobility Applications“*. In: *Energies*, 11: 1, 2018, S. 150.

Ciez/Whitacre 2019

Ciez, R. E./Whitacre, J. F.: *„Examining different recycling processes for lithium-ion batteries“*. In: *Nature Sustainability*, 2: 2, 2019, S. 148–156.

CoreManNEt

CoreManNEt: Gutschrift. URL: <https://www.coremannet.com/so-funktioniert-coremannet/gutschrift/> [Stand: 22.06.2020].

Daimler AG 2014

Daimler AG: *Nachhaltigkeit bei Mercedes Benz PKW*, Stuttgart (unveröffentlicht), 2014.

DIN EN ISO 14040:2009-11 2009

DIN EN ISO 14040:2009-11: *„Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006)“* 2009.



Drabik/Rizos 2018

Drabik, E./Rizos, V.: *Prospects for electric vehicle batteries in a circular economy* (2018/05), 2018.

EcoBatRec 2016

EcoBatRec: *Demonstrationsanlage für ein kostenneutrales, ressourceneffizientes Processing ausgedienter Li-Ion-Batterien der Elektromobilität*, 2016. URL: <http://www.ecobatrec.de/index.html> [Stand: 30.06.2020].

Elektroauto-News 2018

Elektroauto-News: *Fab4Lib – Projekt zum Aufbau einer Großserienfertigung für Lithium-Ionen Batteriezellen gestartet*, 2018. URL: <https://www.elektroauto-news.net/2018/fab4lib-projekt-aufbau-grossserienfertigung-lithium-ionen-batteriezellen> [Stand: 30.06.2020].

elementenergy 2019

elementenergy: *Batteries on wheels: the role of battery electric cars in the EU power system and beyond*, 2019. URL: https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2019_06_Element_Energy_Batteries_on_wheels_Public_report.pdf [Stand: 22.06.2020].

Ellen MacArthur Foundation 2020

Ellen MacArthur Foundation: Publications, 2020. URL: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications> [Stand: 23.06.2020].

Energy Transitions Commission 2020

Energy Transitions Commission: *7 Priorities to Help the Global Economy Recover. While Building a Healthier, more Resilient, Net-zero Emissions Economy*, 2020.

Europäische Kommission 2019a

Europäische Kommission: *Batteries & Accumulators. Evaluation of the EU Directive 2006/66/EC on batteries and accumulators (the Batteries Directive)*, 2019. URL: <https://ec.europa.eu/environment/waste/batteries/evaluation.html> [Stand: 22.06.2020].

Europäische Kommission 2019b

Europäische Kommission: *Der europäische Grüne Deal*, 2019.

Europäische Kommission 2020

Europäische Kommission: *Eine europäische Datenstrategie*, Brüssel, 2020.

Europäische Union 2000

Europäische Union: 2000/532/EG: *Entscheidung der Kommission vom 3. Mai 2000 zur Ersetzung der Entscheidung 94/3/EG über ein Abfallverzeichnis gemäß Artikel 1 Buchstabe a) der Richtlinie 75/442/EWG des Rates über Abfälle und der Entscheidung 94/904/EG des Rates über ein Verzeichnis gefährlicher Abfälle im Sinne von Artikel 1 Absatz 4 der Richtlinie 91/689/EWG über gefährliche Abfälle* (Bekannt gegeben unter Aktenzeichen K(2000) 1147). Entscheidung 2000/532/EG 06.09.2000.

Europäische Union 2008

Europäische Union: *Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien*. Richtlinie 2008/98/EG 22.11.2008.

Europäische Union 2009

Europäische Union: *Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte*. Richtlinie 2009/125/EG 31.10.2009.

Europäische Union 2012

Europäische Union: *Verordnung (EU) Nr. 493/2012 der Kommission vom 11. Juni 2012 mit Durchführungsbestimmungen zur Berechnung der Recyclingeffizienzen von Recyclingverfahren für Altbatterien und Altakkumulatoren gemäß der Richtlinie 2006/66/EG des Europäischen Parlaments und des Rates*. Verordnung (EU) 493/2012 11.06.2012.

Europäische Union 2019

Europäische Union: *Verordnung (EU) Nr. 631/2019 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. April 2019 zur Festsetzung von CO₂-Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen und für neue leichte Nutzfahrzeuge und zur Aufhebung der Verordnungen (EG) Nr. 443/2009 und (EU) Nr. 510/2011*. Verordnung (EU) 631/2019 25.04.2019.

Europäisches Parlament 2020

Europäisches Parlament: *„EU COVID-19 recovery plan must be green and ambitious, say MEPs“* (Pressemitteilung vom 21.04.2020). URL: <https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20200419IPR77407/eu-covid-19-recovery-plan-must-be-green-and-ambitious-say-meps> [Stand: 22.06.2020].

European Investment Bank 2020

European Investment Bank: *The EIB Circular Economy Guide – Supporting the circular transition*, 2020. URL: https://www.eib.org/attachments/thematic/circular_economy_guide_en.pdf [Stand: 23.06.2020].

EWG/EU 1993

EWG/EU: *Basler Übereinkommen über die Kontrolle der grenzüberschreitenden Verbringung gefährlicher Abfälle und ihrer Entsorgung*. Beschluss 93/98/EWG 1993.

Fritz et al. 2016

Fritz, D./Heinfellner, H./Lichtblau, G./Pözl, W./Schodl, B.: *Ökobilanz alternativer Antriebe. Fokus Elektrofahrzeuge*, Wien: Umweltbundesamt GmbH 2016.

Goldie-Scot 2019

Goldie-Scot, L.: *A Behind the Scenes Take on Lithium-ion Battery Prices*, 2019. URL: <https://about.bnef.com/blog/behind-scenes-take-lithium-ion-battery-prices> [Stand: 07.07.2020].

Gsell/Marscheider-Weidemann 2020

Gsell, M./Marscheider-Weidemann, F.: *Second Life von E-Batterien: Potenziale und Marktbarrieren*, 2020.

Hagelücken 2020

Hagelücken, C.: „*Business as Unusual*“. *Anforderungen an eine Kreislaufwirtschaft von Lithium-Ionen-Batterien*. In: Müll und Abfall: 5, 2020, S. 62–80.

Hall et al. 2018

Hall, D./Pavlenko, N./Lutsey, N.: *Beyond road vehicles: Survey of zero-emission technology options across the transport sector*, 2018.

Hill et al. 2020

Hill, N./Amaral, S./Morgan-Price, S./Nokes, T./Bates, J./Helms, H./Fehrenbach, H./Biemann, K./Abdalla, N./Jöhrens, J./Cotton, E./German, L./Harris, A./Haye, S./Sim, C./Bauen, A.: *Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fuelled vehicles through LCA*, 2020. URL: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/1f494180-bc0e-11ea-811c-01aa75ed71a1> [Stand: 15.08.2020].

Hoekstra/Steinbuch

Hoekstra, A./Steinbuch, M.: *Comparing the lifetime green house gas emissions of electric cars with the emissions of cars using gasoline or diesel*. URL: https://www.oliver-krischer.eu/wp-content/uploads/2020/08/English_Studie.pdf [Stand: 31.08.2020].

Hoyer 2015

Hoyer, C.: *Strategische Planung des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen in Deutschland*, Wiesbaden-s.l.: Springer Fachmedien Wiesbaden 2015.

Hüer et al. 2018

Hüer, L./Hagen, S./Thomas, O./Pfisterer, H.-J.: „*Impacts of Product-Service Systems on Sustainability – A structured Literature Review*“. In: *Procedia CIRP*, 73, 2018, S. 228–234.

IDIS 2020

IDIS: *International Dismantling Information System*, 2020. URL: <https://www.idis2.com> [Stand: 23.06.2020].

International Energy Agency 2019a

International Energy Agency: *Global EV Outlook 2019. Scaling up the transition to electric mobility*, 2019. URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2019> [Stand: 23.06.2020].

International Energy Agency 2019b

International Energy Agency: *Tracking Transport 2019*, 2019. URL: <https://www.iea.org/reports/tracking-transport-2019> [Stand: 22.06.2020].

International Resource Panel 2019

International Resource Panel: *Global Resources Outlook. 2019: Natural Resources for the Future We Want*, 2019. URL: <https://www.resourcepanel.org/reports/global-resources-outlook> [Stand: 22.06.2020].

International Resource Panel 2020

International Resource Panel: *Building Resilient Societies After the COVID-19 pandemic. Key messages from the International Resource Panel*, 2020. URL: https://www.resourcepanel.org/sites/default/files/documents/document/media/building_resilient_societies_after_the_covid-19_pandemic_-_key_messages_from_the_irp_-_12_may_2020.pdf [Stand: 22.06.2020].



IRENA 2019

IRENA: Innovation outlook: *Smart charging for electric vehicles*, International Renewable Energy Agency, 2019. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/May/IRENA_Innovation_Outlook_EV_smart_charging_2019.pdf [Stand: 22.06.2020].

Kampker et al. 2016

Kampker, A./Kreisköther, K./Hollah, A. M./Lienemann, C.: „*Electromobile Remanufacturing - Nutzenpotenziale für batterieelektrische Fahrzeuge*“.

Kraftfahrt-Bundesamt 2019a

Kraftfahrt-Bundesamt: *Jahresbilanz des Fahrzeugbestandes am 1. Januar 2019*, 2019. URL: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/b_jahresbilanz.html [Stand: 23.06.2020].

Kraftfahrt-Bundesamt 2019b

Kraftfahrt-Bundesamt: *Verkehr in Kilometern – Inländerfahrleistung*, 2019. URL: https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/VerkehrKilometer/vk_inlaenderfahrleistung/vk_inlaenderfahrleistung_inhalt.html?nn=2351536 [Stand: 01.07.2020].

Kurdve et al. 2019

Kurdve, M./Zackrisson, M./Johansson, M. I./Ebin, B./Harlin, U.: „*Considerations when Modelling EV Battery Circularity Systems*“. In: *Batteries*, 5: 2, 2019, S. 40.

Kwade/Diekmann 2018

Kwade, A./Diekmann, J.: *Recycling of Lithium-Ion Batteries*, Cham: Springer International Publishing 2018.

Lambert 2017

Lambert, F.: *Tesla is working on a new mobile battery-swap technology to deploy out of a trailer*, 2017. URL: <https://electrek.co/2017/09/15/tesla-new-battery-swap-technology-to-deploy-trailer/> [Stand: 30.06.2020].

Lambert 2020

Lambert, F.: *Nio might have figured out battery swap for electric cars as it completes 500,000 swaps*, 2020. URL: <https://electrek.co/2020/06/02/nio-battery-swap-electric-cars-completes-500000-swaps/> [Stand: 30.06.2020].

Lebedeva et al. 2018

Lebedeva, N./Tarvydas, D./Tsiropoulos, I.: *Li-ion batteries for mobility and stationary storage applications. Scenarios for costs and market growth*, Luxembourg: Publications Office of the European Union 2018.

LithoREC I 2012

LithoREC I: *Recycling von Lithium-Ionen-Batterien*, Braunschweig, 2012.

LithoREC II 2016

LithoREC II: *Recycling von Lithium-Ionen-Batterien – LithoRec II*, Braunschweig, 2016.

Marklines 2017

Marklines: *China's technology roadmap: Targets for energy-saving and new energy vehicles in 2030. EVs, PHVs to account for up to 50% of vehicle sales; focusing on lightweight material development*, 2017. URL: https://www.marklines.com/en/report/rep1558_201612 [Stand: 22.06.2020].

Melin 2019a

Melin, H. E.: *Analysis of the climate impact of lithium-ion batteries and how to measure it*, 2019. URL: https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2019_11_Analysis_CO2_footprint_lithium-ion_batteries.pdf [Stand: 05.08.2020].

Melin 2019b

Melin, H. E.: *State-of-the-art in reuse and recycling of lithium-ion batteries*, 2019. URL: <https://www.energimyndigheten.se/globalassets/forskning-innovation/overgripande/state-of-the-art-in-reuse-and-recycling-of-lithium-ion-batteries-2019.pdf> [Stand: 30.06.2020].

Miedema/Moll 2013

Miedema, J. H./Moll, H. C.: „*Lithium availability in the EU27 for battery-driven vehicles: The impact of recycling and substitution on the confrontation between supply and demand until 2050*“. In: *Resources Policy*, 38: 2, 2013, S. 204–211.

Mohr et al. 2020

Mohr, M./Peters, J. F./Baumann, M./Weil, M.: „*Toward a cell-chemistry specific life cycle assessment of lithium-ion battery recycling processes*“. In: *Journal of Industrial Ecology*, 2020.

Nationale Plattform Zukunft der Mobilität 2020

Nationale Plattform Zukunft der Mobilität: *Zwischenbericht zur strategischen Personalplanung und -entwicklung im Mobilitätssektor*, Berlin, 2020.

Nienaber/Wacket 2020

Nienaber, M./Wacket, M.: „*Germany's Merkel wants green recovery from coronavirus crisis*“. In: Reuters, 28.04.2020.

OECD 2017

OECD: *Best Available Techniques (BAT) for Preventing and Controlling Industrial Pollution (OECD Environment, Health and Safety Publications Series on Risk Management 40)*, 2017.

Ohlendorf 2006

Ohlendorf, M.: *Simulationsgestützte Planung und Bewertung von Demontagesystemen*, Essen: Vulkan-Verl. 2006.

Öko-Institut 2011

Öko-Institut: *Ökobilanz zum „Recycling von Lithium-Ionen-Batterien“ (LithoRec)*, Darmstadt, 2011.

Öko-Institut 2014

Öko-Institut: *eMobil2050. Szenarien zum möglichen Beitrag des elektrischen Verkehrs zum langfristigen Klimaschutz*, 2014. URL: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Forschungsdatenbank/fkz_um_11_96_106_elektromobilitaet_bf.pdf [Stand: 30.06.2020].

Öko-Institut 2017

Öko-Institut: *Strategien für die nachhaltige Rohstoffversorgung der Elektromobilität. Synthesepapier zum Rohstoffbedarf für Batterien und Brennstoffzellen. Studie im Auftrag von Agora Verkehrswende*, 2017. URL: https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/Nachhaltige_Rohstoffversorgung_Elektromobilitaet/Agora_Verkehrswende_Synthesepapier_WEB.pdf_WEB.pdf [Stand: 22.06.2020].

Organisation for Economic Co-operation and Development 2016

Organisation for Economic Co-operation and Development: *OECD Due Diligence Guidance for Responsible Supply Chains of Minerals from Conflict-Affected and High-Risk Areas*. Third Edition, Paris: OECD Publishing 2016.

Outotec

Outotec: *Outotec HSC Chemistry Software*. URL: <https://www.outotec.com/products-and-services/technologies/digital-solutions/hsc-chemistry/> [Stand: 23.06.2020].

Peters et al. 2017

Peters, J. F./Baumann, M./Zimmermann, B./Braun, J./Weil, M.: „*The environmental impact of Li-Ion batteries and the role of key parameters – A review*“. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 2017, S. 491-506.

Presse- und Informationsamt der Bundesregierung 2019

Presse- und Informationsamt der Bundesregierung: *Digitalisierung gestalten*, Berlin, 2019.

Rauwald 2019

Rauwald, C.: „*VW Challenges Rivals With \$66 Billion for Electric Car Era*“. In: Bloomberg, 15.11.2019.

Regett 2019

Regett, A.: *Klima- und Ressourcenwirkung von Elektrofahrzeugbatterien: Begleitdokument zum Artikel „Klimabilanz von Elektrofahrzeugen - Ein Plädoyer für mehr Sachlichkeit“*, 2019.

Regett et al. 2019

Regett, A./Mauch, W./Wagner, U.: *Klimabilanz von Elektrofahrzeugen – Ein Plädoyer für mehr Sachlichkeit*, 2019. URL: https://www.ffe.de/attachments/article/856/Klimabilanz_Elektrofahrzeugbatterien_FFE.pdf [Stand: 22.06.2020].

Rehme et al. 2016

Rehme, M./Richter, S./Aniko Temmler/Götze, U.: *Second-Life Battery Applications - Market potentials and contribution to the cost effectiveness of electric vehicles*, 2016.

Reuter 2016

Reuter, M. A.: „*Digitalizing the Circular Economy*“. In: *Metallurgical and Materials Transactions B*, 47: 6, 2016, S. 3194-3220.

Reuter et al. 2015

Reuter, M. A./van Schaik, A./Gediga, J.: „*Simulation-based design for resource efficiency of metal production and recycling systems: Cases – copper production and recycling, e-waste (LED lamps) and nickel pig iron*“. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20: 5, 2015, S. 671-693.



Reuter et al. 2019

Reuter, M. A./van Schaik, A./Gutzmer, J./Bartie, N./Abadías-Llamas, A.: „Challenges of the Circular Economy: A Material, Metallurgical, and Product Design Perspective“. In: Annual Review of Materials Research, 49: 1, 2019, S. 253–274.

Richa et al. 2017a

Richa, K./Babbitt, C. W./Gaustad, G.: „Eco-Efficiency Analysis of a Lithium-Ion Battery Waste Hierarchy Inspired by Circular Economy“. In: Journal of Industrial Ecology, 21: 3, 2017, S. 715–730.

Richa et al. 2017b

Richa, K./Babbitt, C. W./Nenadic, N. G./Gaustad, G.: „Environmental trade-offs across cascading lithium-ion battery life cycles“. In: The International Journal of Life Cycle Assessment, 22: 1, 2017, S. 66–81.

Rohr et al. 2017

Rohr, S./Müller, S./Baumann, M./Kerler, M./Ebert, F./Kaden, D./Lienkamp, M.: „Quantifying uncertainties in reusing lithium-ion batteries from electric vehicles“. In: Procedia Manufacturing, 8, 2017, S. 603–610.

Sachverständigenrat für Umweltfragen 2020

Sachverständigenrat für Umweltfragen: *Umweltgutachten 2020: Für eine entschlossene Umweltpolitik in Deutschland und Europa*, 2020.

Sander et al. 2017a

Sander, K./Göbbling-Reisemann, S./Zimmermann, T./Marscheider-Weidemann, F./Wilts, H./Schebeck, L./Wagner, J./Heegn, H./Pehlken, A.: *Recyclingpotenzial strategischer Metalle (ReStra)* (68), 2017.

Sander et al. 2017b

Sander, K./Sanden, J./Wilts, H.: *Entwicklung von Lösungsvorschlägen, einschließlich rechtlicher Instrumente, zur Verbesserung der Datenlage beim Verbleib von Altfahrzeugen (50)*, Dessau-Roßlau, 2017.

Simon 2019

Simon, F.: „Circular economy erected as number one priority of European Green Deal“. In: Euractiv, 13.09.2019.

Steinborn et al. 2010

Steinborn, J./Schmidt, K./Walther, G./Spengler, T. S.: „Integrierte Produktions- und Aufarbeitungsplanung in Unternehmensnetzwerken“. In: uwf UmweltWirtschaftsForum, 18: 2, 2010, S. 83–89.

Technical Expert Group on Sustainable Finance 2020

Technical Expert Group on Sustainable Finance: *Taxonomy: Final report of the Technical Expert Group on Sustainable Finance*, 2020. URL: https://ec.europa.eu/knowledge4policy/publication/sustainable-finance-teg-final-report-eu-taxonomy_en [Stand: 23.06.2020].

Thielmann et al. 2018

Thielmann, A./Neef, C./Fenske, C./Wietschel, M.: *Energiespeicher Monitoring 2018*, 2018.

Thompson 2018

Thompson, A. W.: „Economic implications of lithium ion battery degradation for Vehicle-to-Grid (V2X) services“. In: Journal of Power Sources, 396, 2018, S. 691–709.

Transport & Environment 2020

Transport & Environment: *How clean are electric cars? T&E's analysis of electric car lifecycle CO₂ emissions*, 2020. URL: https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/downloads/T%26E%E2%80%99s%20EV%20life%20cycle%20analysis%20LCA_0.pdf [Stand: 15.08.2020].

Umweltbundesamt 2016

Umweltbundesamt: *Altauto, Altautoverwertung*, 2016. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/umwelttipps-fuer-den-alltag/mobilitaet/altauto-altautoverwertung#unsere-tipps> [Stand: 10.07.2020].

Umweltbundesamt 2019

Umweltbundesamt: *Verbleib von endgültig außer Betrieb gesetzten Fahrzeugen. Endgültige Außerbetriebsetzungen*, 2019. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehelter-abfallarten/altfahrzeugverwertung-fahrzeugverbleib#verwertung-der-schredderleichtfraktion> [Stand: 23.06.2020].

Umweltbundesamt 2020a

Umweltbundesamt: *Energiebedingte Emissionen*, 2020. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energiebedingte-emissionen#energiebedingte-treibhausgas-emissionen> [Stand: 23.06.2020].

Umweltbundesamt 2020b

Umweltbundesamt: *Emissionsquellen*, 2020. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/treibhausgas-emissionen/emissionsquellen#energie-stationar> [Stand: 22.06.2020].

UNECE 1957

UNECE: *Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße*. EDR 1957.

United Nations Environment Programme 1989

United Nations Environment Programme: *Basel Convention*, 1989.

United Nations Human Rights 2011

United Nations Human Rights: *Guiding Principles on Business and Human Rights. Implementing the United Nations "Protect, Respect and Remedy" Framework*, 2011. URL: https://www.ohchr.org/documents/publications/guidingprinciplesbusinesshr_en.pdf [Stand: 23.06.2020].

VDI/VDE 2019

VDI/VDE: *Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeuge*, 2019.

Verband der Automobilindustrie 2020

Verband der Automobilindustrie: *Export. Jahreszahlen*, 2020. URL: <https://www.vda.de/de/services/zahlen-und-daten/jahreszahlen/export.html>; <https://www.vda.de/de/services/zahlen-und-daten/jahreszahlen/automobilproduktion.html> [Stand: 23.06.2020].

Weber/Stuchtey 2019

Weber, T./Stuchtey, M.: *Deutschland auf dem Weg zur Circular Economy – Erkenntnisse aus europäischen Strategien (Vorstudie)*, München, 2019.

Wernet et al. 2016

Wernet, G./Bauer, C./Steubing, B./Reinhard, J./Moreno-Ruiz, E./Weidema, B.: „*The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology*“. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21: 9, 2016, S. 1218-1230.

World Economic Forum 2019

Global Battery Alliance: *A Vision for a Sustainable Battery Value Chain in 2030*, 2019.

World Economic Forum 2020

Global Battery Alliance: *The Alliance brings together leading businesses along the entire battery value chain with governments, international organizations, NGOs and academics to actively shape a battery value chain that powers sustainable development*, 2020. URL: <https://www.weforum.org/global-battery-alliance/action> [Stand: 22.06.2020].

Worrell/Reuter 2014

Worrell, E./Reuter, M.: *Handbook of Recycling*: Elsevier 2014.





acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften

acatech berät Politik und Gesellschaft, unterstützt die innovationspolitische Willensbildung und vertritt die Technikwissenschaften international. Ihren von Bund und Ländern erteilten Beratungsauftrag erfüllt die Akademie unabhängig, wissenschaftsbasiert und gemeinwohlorientiert. acatech verdeutlicht Chancen und Risiken technologischer Entwicklungen und setzt sich dafür ein, dass aus Ideen Innovationen und aus Innovationen Wohlstand, Wohlfahrt und Lebensqualität erwachsen. acatech bringt Wissenschaft und Wirtschaft zusammen. Die Mitglieder der Akademie sind herausragende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus den Ingenieur- und den Naturwissenschaften, der Medizin sowie aus den Geistes- und Sozialwissenschaften. Die Senatorinnen und Senatoren sind Persönlichkeiten aus technologieorientierten Unternehmen und Vereinigungen sowie den großen Wissenschaftsorganisationen. Neben dem acatech FORUM in München als Hauptsitz unterhält acatech Büros in Berlin und Brüssel.

Weitere Informationen unter www.acatech.de.



Herausgeber:

**acatech – Deutsche Akademie der
Technikwissenschaften**
Karolinenplatz 4
80333 München

**Geschäftsstelle Circular Economy
Initiative Deutschland**
Karolinenplatz 4
80333 München

SYSTEMIQ Ltd
69 Carter Lane
London EC4V
United Kingdom

Reihenherausgeber:

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, 2020

Geschäftsstelle
Karolinenplatz 4
80333 München

Hauptstadtbüro
Pariser Platz 4a
10117 Berlin

Brüssel-Büro
Rue d'Egmont/Egmontstraat 13
1000 Brüssel (Belgien)

T +49 (0)89/52 03 09-0
F +49 (0)89/52 03 09-900

T +49 (0)30/2 06 30 96-0
F +49 (0)30/2 06 30 96-11

T +32 (0)2/2 13 81-80
F +32 (0)2/2 13 81-89

info@acatech.de
www.acatech.de

Vorstand i.S.v. § 26 BGB: Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath, Karl-Heinz Streibich, Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier, Prof. Dr. Reinhard F. Hüttl, Dr. Stefan Oschmann, Prof. Dr.-Ing. Thomas Weber, Manfred Rauhmeier, Prof. Dr. Martina Schraudner

Empfohlene Zitierweise:

Circular Economy Initiative Deutschland (Hrsg.): *Ressourcenschonende Batteriekreisläufe – mit Circular Economy die Elektromobilität antreiben*, *Kwade, A., Hagelüken, C., Kohl, H., Buchert, M., Herrmann, C., Vahle, T., von Wittken, R., Carrara, M., Daelemans, S., Ehrenberg, H., Fluchs, S., Goldmann, D., Henneboel, G., Hobohm, J., Krausa, M., Lettgen, J., Meyer, K., Michel, M., Rakowski, M., Reuter, M., Sauer, D.U., Schnell, M., Schulz, M., Spurk, P., Weber, W., Zefferer, H., Blömeke, S., Bussar, C., Cerdas, J., Gottschalk, L., Hahn, A., Reker-Gluhić, E., Kobus, J., Muschard, B., Schliephack, W., Sigel, F., Stöcker, P., Teuber, M. und Kadner, S., acatech/SYSTEMIQ, München/London 2020.

* Alle Mitglieder außer AK, CH, HK, MB und CH sowie alle inhaltlichen Unterstützer/innen außer TV, RvW und SK werden in alphabetischer Reihenfolge gelistet.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften • 2020

Koordination und Text: Geschäftsstelle Circular Economy Initiative Deutschland und SYSTEMIQ

Redaktion: Alrun Straudi

Lektorat: Lektorat Berlin

Logo und Covergestaltung: Lisa Metzger

Titelfoto: Daimler AG

Konvertierung und Satz: Fraunhofer IAIS, Sankt Augustin

Die Originalfassung der Publikation ist verfügbar auf www.circular-economy-initiative.de und www.acatech.de.

