



75 Jahre
Demokratie
lebendig



Deutscher Bundestag
Wissenschaftliche Dienste

Dokumentation

Umweltauswirkungen des Batterierecyclings und statistische Daten

Umweltauswirkungen des Batterierecyclings und statistische Daten

Aktenzeichen: WD 5 - 3000 - 077/24
Abschluss der Arbeit: 04.06.2024
Fachbereich: WD 5: Wirtschaft, Energie, Umwelt

Die Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages unterstützen die Mitglieder des Deutschen Bundestages bei ihrer mandatsbezogenen Tätigkeit. Ihre Arbeiten geben nicht die Auffassung des Deutschen Bundestages, eines seiner Organe oder der Bundestagsverwaltung wieder. Vielmehr liegen sie in der fachlichen Verantwortung der Verfasserinnen und Verfasser sowie der Fachbereichsleitung. Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste geben nur den zum Zeitpunkt der Erstellung des Textes aktuellen Stand wieder und stellen eine individuelle Auftragsarbeit für einen Abgeordneten des Bundestages dar. Die Arbeiten können der Geheimschutzordnung des Bundestages unterliegende, geschützte oder andere nicht zur Veröffentlichung geeignete Informationen enthalten. Eine beabsichtigte Weitergabe oder Veröffentlichung ist vorab dem jeweiligen Fachbereich anzuzeigen und nur mit Angabe der Quelle zulässig. Der Fachbereich berät über die dabei zu berücksichtigenden Fragen.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	4
2.	Status quo	5
2.1.	Verordnung (EU) 2023/1542	5
2.2.	Batteriekategorien gem. Verordnung (EU) 2023/1542	6
3.	Recycelte Geräte-, Fahrzeug- und Industriebatterien in Tonnen	8
4.	Prozentsatz der für das Recycling gesammelten Batterien	8
4.1.	Mindestsammelquoten in der EU und Deutschland	9
4.2.	Sammelquoten für Geräte-Alt Batterien in der EU im Jahr 2021	10
4.3.	Sammelquoten für Geräte-Alt Batterien in Deutschland	11
4.4.	Fahrzeug- und Industriebatterien	14
4.5.	Recyclingeffizienz	17
4.6.	Batterietypen für E-Autos	18
4.7.	Multi-Life- bzw. Second-Life-Ansatz für Batterien	22
5.	Umweltwirkung unterschiedlicher Recyclingverfahren	23
6.	CO₂-Fußabdruck recycelter Lithium-Batterien	26
7.	Ausgewählte Studien zu den Auswirkungen des Batterierecyclings auf die Umwelt	28
7.1.	Costa et al. (2021)	29
7.2.	Mrozik et al. (2021)	30
7.3.	Wang et al. (2022)	31
7.4.	Rensmo et al. (2023)	31
7.5.	Guelfo et al. (2023)	32
7.6.	Smical et al. (2023)	32
7.7.	Barbosa et al. (2023)	33
7.8.	Adeel et al. (2023)	33
7.9.	Abdelkareem et al. (2023)	35
7.10.	Gutsch/Leker (2024)	35
8.	Pfandsysteme und weitere Handlungsempfehlungen	36
9.	Recyclingunternehmen für Lithium	38
10.	Podcasts	39

1. Einleitung

Die Verordnung (EU) 2023/1542 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Juli 2023 über Batterien und Altbatterien, zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG und der Verordnung (EU) 2019/1020 und zur Aufhebung der Richtlinie 2006/66/EG¹ bezeichnet Batterien² als die „Schlüsselemente für nachhaltige Entwicklung, grüne Mobilität, saubere Energie und Klimaneutralität“.³ Die weltweite Nachfrage nach Batterien wird voraussichtlich weiter stark ansteigen.⁴ Sie enthalten wertvolle, zum Teil schwer zu gewinnende, aber auch gesundheits- und umweltschädliche Rohstoffe.⁵ Um auf der einen Seite den Bedarf an wichtigen Batterierohstoffen zu decken, aber andererseits auch die Auswirkungen des Rohstoffabbaus auf die Umwelt⁶ sowie geopolitische Abhängigkeiten zu minimieren, wird die stoffliche Verwertung von Batterien (Recycling) stärker forciert. Es werden Mindestwerte für den Einsatz von Rezyklaten in der Produktion neuer Batterien vorgeschrieben. Vekić (2020) zufolge seien sich die meisten Experten einig, dass es ohne Recycling in Zukunft sehr wahrscheinlich zu Engpässen bei wichtigen Batterierohstoffen komme.⁷

Vor diesem Hintergrund geht die vorliegende Arbeit zunächst auf verschiedene Rücknahmekonzepte einzelner Batteriekategorien ein, listet statistische Daten zu Sammel- und Recyclingquoten

1 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32023R1542&qid=1715588836062>.

2 Batterie wird auch als Oberbegriff für Primär- und Sekundärbatterie verwendet. Primärbatterien sind nicht wiederaufladbar. Sekundärbatterien (Akkumulatoren) sind wiederaufladbar.

Art. 3 Abs. 1 Nr. 1 der im Februar 2024 in Kraft getretenen Verordnung (EU) 2023/1542 definiert „Batterie“ als „eine Einrichtung, die durch unmittelbare Umwandlung chemischer Energie erzeugte elektrische Energie liefert, über einen internen oder externen Speicher verfügt, und aus einem oder mehreren nicht wiederaufladbaren oder wiederaufladbaren Batteriezellen, -modulen oder -sätzen besteht, und eine Batterie umfasst, die zur Wiederverwendung oder zur Umnutzung vorbereitet oder umgenutzt oder wiederaufgearbeitet wurde.“, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1542&qid=1715588673634>.

3 Erwägungsgrund 2 VO (EU) 2023/1542.

4 „Die weltweite Nachfrage nach Batterien wird bis 2030 um das 14-fache steigen, und 17 Prozent dieser Nachfrage könnten auf die EU entfallen.“, EP (2022), Neue EU-Vorschriften für nachhaltigere und ethisch bedenkenlose Batterien, letzte Aktualisierung, 15.11.2023, <https://www.europarl.europa.eu/topics/de/article/20220228STO24218/neue-eu-vorschriften-fur-nachhaltigere-und-ethisch-bedenkenlose-batterien>.

5 Batterien enthalten wertvolle Rohstoffe, wie zum Beispiel Zink, Nickel, Aluminium, Eisen/Stahl, Mangan, Lithium oder Kobalt. Vor allem alte Batterien können auch noch umweltgefährliche Schwermetalle wie Blei, Quecksilber und Cadmium enthalten. Vgl. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/kampagne-zur-entsorgung-von-alten-batterien-akkus>.

6 Zu den ökologischen und sozialen Auswirkungen des Abbaus der Rohstoffe für Batterien siehe ausführlich: Bianchetti, Roberto et al. (2023), Grundlagendokument, Batterien für Elektrofahrzeuge, im Auftrag von Energie-Schweiz/Bundesamt für Energie (BFE), April 2023, S. 22ff, <https://www.news.admin.ch/news/message/attachments/77015.pdf>.

7 Vekić, Nicola (2020), Lithium-Ionen-Batterien für die Elektromobilität: Status, Zukunftsperspektiven, Recycling, S. 24, <https://sgt.agw.kit.edu/downloads/Publikationen/Think%20Tank/Lithium-Ionen-Batterie%20f%C3%BCr%20die%20Elektrom.pdf>.

auf und stellt Literaturquellen zu Umweltauswirkungen bei der Entsorgung und dem Recycling von Batterien zusammen.

2. Status quo

2.1. Verordnung (EU) 2023/1542

Ziel der Verordnung (EU) 2023/1542 ist es, Batterien einer „klimaneutralen Kreislaufwirtschaft“ zuzuführen. Die nachteiligen Auswirkungen der Erzeugung und Bewirtschaftung von Altbatterien auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt sollen „vermieden und verringert“ und der Ressourcenverbrauch reduziert und die Ressourceneffizienz verbessert werden.⁸ Für Stoffe, die ein unannehmbares Risiko für die menschliche Gesundheit oder die Umwelt darstellen, sollen Beschränkungen erlassen werden können.⁹

Die Verordnung (EU) 2023/1542 ist in Deutschland seit dem **18.02.2024** unmittelbar geltendes Recht.¹⁰ Die Verordnung enthält jedoch gesonderte Inkrafttretens- oder Übergangsregelungen, so dass die **Richtlinie 2006/66/EG**¹¹ und das der Umsetzung der Richtlinie dienende **nationale Batteriesetz**¹² erst mit Wirkung zum **18.08.2025** aufgehoben werden.¹³

Die Verordnung (EU) 2023/1542 enthält u. a. die Verpflichtung für den Wirtschaftsakteur, der Batterien in Verkehr bringt oder in Betrieb nimmt, „Strategien zur Erfüllung der für Batterien geltenden Sorgfaltspflichten einzurichten und umzusetzen“.¹⁴ Der Wirtschaftsakteur ist ab dem 18.08.2025 verpflichtet, im Rahmen seines Managementplans u. a. das Risiko negativer Auswirkungen auf die Umwelt zu ermitteln und zu bewerten.¹⁵ Die Sorgfaltspflichten umfassen

8 Erwägungsgrund 3 VO (EU) 2023/1542.

9 Art. 6 Abs. 2 VO (EU) 2023/1542.

10 Art. 96 Abs. 2 Unterabs. 1 VO (EU) 2023/1542, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32023R1542&qid=1715588836062>.

11 Richtlinie 2006/66/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 6. September 2006 über Batterien und Akkumulatoren sowie Altbatterien und Altakkumulatoren und zur Aufhebung der Richtlinie 91/157/EWG, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32006L0066&qid=1715932942188>.

12 Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Batterien und Akkumulatoren (Batteriesetz - BattG), <https://www.gesetze-im-internet.de/battg/BJNR158210009.html>.

Um dem nationalen Anpassungsbedarf gerecht zu werden, hat das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) im Mai 2024 den Entwurf eines Gesetzes zur Anpassung des Batterierechts an die Verordnung (EU) 2023/1542 (Batterie-EU-Anpassungsgesetz – Batt-EU-AnpG) vorgelegt. Der **Referentenentwurf** ist abzurufen unter dem folgenden Link: https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Glaeserne_Gesetze/20_Lp/batt_eu_anpg/Entwurf/batt_eu_anpg_refe_bf.pdf.

13 [Hins. RL 2006/66/EG] Art. 95 VO (EU) 2023/1542.

14 Art. 48 Abs.1 VO (EU) 2023/1542.

15 Art. 50 Abs. 1 Buchst. a VO (EU) 2023/1542.

bestimmte in Abs. 2 Buchst. a Anhang X der Verordnung (EU) 2023/1542 aufgeführte Kategorien sozialer und ökologischer Risiken.

Es wird eine „sichere, kreislauforientierte und nachhaltige Wertschöpfungskette für alle Batterien“ angestrebt „einschließlich der Versorgung des wachsenden Marktes für Elektrofahrzeuge.“¹⁶

2.2. Batteriekategorien gem. Verordnung (EU) 2023/1542

Mit der Verordnung (EU) 2023/1542 kommen **zwei neue** Batteriekategorien bzw. -klassen hinzu: die Elektrofahrzeugbatterie und die Batterie für leichte Verkehrsmittel.

Die Batteriekategorien werden anhand ihrer **Konzeption und Verwendung** und **nicht** anhand ihrer **chemischen** Zusammensetzung **unterschieden**.¹⁷

Die bisher in der Richtlinie 2006/66/EG und im Batteriegesetz vorgenommene Unterteilung in Gerätebatterien, Fahrzeugbatterien¹⁸ (entspricht der Starterbatterie) und Industriebatterien wird nun weiter untergliedert. Batterien für den Antrieb von Elektrofahrzeugen, die bisher der Kategorie „Industriebatterien“ zugeordnet waren, erhalten eine eigene Kategorie „**Elektrofahrzeugbatterien**“ (sog. Traktionsbatterien). Batterien für leichte Verkehrsmittel wie E-Bikes und E-Scooter werden ebenfalls in einer eigenen Kategorie „**Batterie für leichte Verkehrsmittel**“ (LV-Batterien) zusammengefasst.¹⁹ Batterien für den Antrieb von Fahrzeugen z. B. „im Schienenverkehr, in der Schifffahrt und im Flugverkehr oder für mobile Maschinen“ werden weiterhin der Kategorie Industriebatterien zugeordnet.²⁰ Darüber hinaus wird für die Gerätebatterie die Unterform **Allzweck-Gerätebatterie** und für die Industriebatterie die Unterform **stationäres Batterie-Energiespeichersystem** mit internem Speicher eingeführt:

- **Gerätebatterie** (Art. 3 Abs. 1 Nr. 9) „eine Batterie, die gekapselt ist, 5 kg oder weniger wiegt, nicht speziell für die industrielle Verwendung ausgelegt ist und bei der es sich nicht um eine Elektrofahrzeugbatterie, eine LV-Batterie oder eine Starterbatterie handelt“.
- **Allzweck-Gerätebatterie** (Art. 3 Abs. 1 Nr. 10) „sowohl eine wiederaufladbare als auch eine nicht wiederaufladbare Gerätebatterie, die speziell auf Interoperabilität ausgelegt ist, mit den folgenden gängigen Formaten: 4,5 Volt (3R12), Knopfzelle, D, C, AA, AAA, AAAA, A23, 9 Volt (PP3)“.
- **Neu: Batterie für leichte Verkehrsmittel** (LV-Batterien) (Art. 3 Abs. 1 Nr. 11) „eine Batterie, die gekapselt ist, 25 kg oder weniger wiegt, die speziell auf die Lieferung elektrischer Energie

16 Erwägungsgrund 7 VO (EU) 2023/1542.

17 Erwägungsgrund 15 VO (EU) 2023/1542.

18 Art. 3 Nr. 5 RL 2006/66/EG definiert „Fahrzeugbatterien oder -akkumulatoren“ als „Batterien oder Akkumulatoren für den Anlasser, die Beleuchtung oder die Zündung von Fahrzeugen“, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32006L0066&qid=1717062799315>.

19 Erwägungsgrund 15 VO (EU) 2023/1542.

20 Erwägungsgrund 15 VO (EU) 2023/1542.

für die Traktion von Radfahrzeugen ausgelegt ist, die ausschließlich von einem Elektromotor oder durch eine Kombination aus Motor- und Muskelkraft angetrieben werden können, einschließlich typgenehmigter Fahrzeuge der Klasse L im Sinne der Verordnung (EU) Nr. 168/2013 des Europäischen Parlaments und des Rates²¹, und bei der es sich nicht um eine Elektrofahrzeugbatterie handelt“.

- **Starterbatterie** (Art. 3 Abs. 1 Nr. 12) „eine Batterie, die speziell auf die Lieferung elektrischer Energie für den Anlasser, die Beleuchtung oder die Zündung ausgelegt ist und die bei Fahrzeugen, anderen Verkehrsmitteln oder Maschinen auch zu Zusatz- oder Backup-Zwecken eingesetzt werden kann“.
- **Industriebatterie** (Art. 3 Abs. 1 Nr. 13) „eine Batterie, die speziell für die industrielle Verwendung ausgelegt ist, die nach der Vorbereitung zur Wiederverwendung oder der Vorbereitung zur Umnutzung für die industrielle Verwendung bestimmt ist, oder jede andere Batterie, die mehr als 5 kg wiegt und weder eine LV-Batterie, eine Elektrofahrzeugbatterie noch eine Starterbatterie ist“.
- **Neu: Elektrofahrzeugbatterie** (Art. 3 Abs. 1 Nr. 14) „eine Batterie, die speziell auf die Lieferung elektrischer Energie für die Traktion von Hybrid- oder Elektrofahrzeugen der Klasse L im Sinne der Verordnung (EU) Nr. 168/2013 ausgelegt ist und mehr als 25 kg wiegt, oder eine Batterie, die speziell auf die Lieferung elektrischer Energie für die Traktion von Hybrid- oder Elektrofahrzeugen der Klassen M, N oder O im Sinne der Verordnung (EU) 2018/858 ausgelegt ist“.
- **Stationäres Batterie-Energiespeichersystem** (Art. 3 Abs. 1 Nr. 15) „eine Industriebatterie mit internem Speicher, die speziell dafür ausgelegt ist, elektrische Energie aus dem Netz zu speichern und an das Netz abzugeben oder für Endnutzer zu speichern und bereitzustellen, unabhängig davon, wo oder von wem diese Batterie eingesetzt wird“.²²

Starteraltbatterien, Industrialtbatterien und Elektrofahrzeugaltbatterien werden von ihren Herstellern zurückgenommen.²³

Gerätebatterien finden sich vor allem in Smartphones, Laptops, Armbanduhren oder Taschenlampen, **Industriebatterien** vorwiegend in stationären Anwendungen wie unterbrechungsfreien Stromversorgungen, Mobilfunk-Basisstationen oder Gabelstaplern.²⁴ Fahrzeuge mit

21 Verordnung (EU) Nr. 168/2013 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. Januar 2013 über die Genehmigung und Marktüberwachung von zwei- oder dreirädrigen und vierrädrigen Fahrzeugen, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32013R0168&qid=1717405108452>.

22 VO (EU) 2023/1542, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1542>.

23 Art. 61 Abs. 1 Satz 1 VO (EU) 2023/1542. (Geltung ab 18.08.2025, Kapitel VIII aus Art. 96 Abs. 2 Buchst. c).

24 <https://www.zvei.org/themen/wo-liegt-eigentlich-der-unterschied-zwischen-einer-batterie-und-einem-akku>.

Verbrennungsmotor verfügen über eine **Starterbatterie**. **E-Autos** verfügen nach Angaben des ADAC über eine Starter- und eine **Traktionsbatterie**.²⁵

Lithium-Ionen-Batterien, die seit einigen Jahren verstärkt eingesetzt werden, können sowohl in Smartphones, Einweg-E-Zigaretten und Laptops als auch in Elektrofahrrädern, -rollern und -autos oder als stationäre Speicher, z.B. zur Zwischenspeicherung von Strom aus Photovoltaikanlagen, eingesetzt werden.²⁶

3. Recycelte Geräte-, Fahrzeug- und Industriebatterien in Tonnen

Der größte Gewichtsanteil der Altbatterien entfällt auf „Fahrzeuggatterien“. Nach Angaben des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen aus dem Jahr 2008 werden in der EU jährlich „etwa 800.000 t Autobatterien [Fahrzeuggatterien], 190.000 t Industriebatterien und 160.000 t Gerätebatterien in Verkehr gebracht“.²⁷

Im Jahr 2021 wurden in Deutschland **257.113 t Altbatterien** – dazu zählen alle Batteriearten: Gerätebatterien, Fahrzeug- und Industriebatterien – einer Verwertung zugeführt.²⁸

Im Jahr 2022 wurden in Deutschland insgesamt **212.735 t Altbatterien** recycelt, davon **35.123 t Geräte-Altbatterien**.²⁹

4. Prozentsatz der für das Recycling gesammelten Batterien

Der erste Schritt des Batterierecyclings beginnt mit der Sammlung der Altbatterien. Für **Geräte-Altbatterien** erfolgt dies über ausgewiesene Sammelstellen. Das Batteriegesetz sieht die „flächendeckende Rücknahme von Geräte-Altbatterien“ vor.³⁰ Die Rücknahme und das Recycling von Geräte-Altbatterien erfolgt durch **Rücknahmesysteme**. Dabei bedarf die Errichtung und der Betrieb

25 <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/reparatur-pflege-wartung/wartung-inspektion/autobatterie-entsorgen/>.

26 <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/abfall/abfallwegweiser-a-z/batterien.html#:~:text=In%20der%20Schweiz%20besteht%20eine,kann%20%E2%80%93%20unabh%C3%A4ngig%20von%20einem%20Kauf.>

27 <https://www.lanuv.nrw.de/umwelt/abfall/abfallvermeidung-und-recycling/batterien.>

Aktuellere Daten konnten nicht ermittelt werden. Eine Aufteilung nach Gerätebatterien, Fahrzeugbatterien und Industriebatterien findet sich in der Produktionsstatistik von Destatis nicht. (E-Mail-Antwort vom 27.05.2024).

28 https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2023/Mai/Faktenblatt_Recycling/Faktenblatt_Recycling_End.pdf.

29 Vgl. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/altbatterien#im-jahr-2022-hat-deutschland-alle-von-der-eu-geforderten-mindestziele-erreicht>.

30 § 7 Abs. 2 Nr. 2 BattG.

des Rücknahmesystems einer Genehmigung durch die zuständige Behörde, die „stiftung elektroaltgeräte register“ (EAR).³¹ Seit 2022 sind dies die folgenden **neun Rücknahmesysteme**.³²

Eigenrücknahmesystem
DS Entsorgungs GmbH
GRS Consumer
GRS eMobility
GRS Healthcare
GRS Powertools
ÖcoReCell
REBAT
REBAT+
Rücknahmesystem der Stiftung GRS Batterien

Die Rücknahmesysteme berichten „jährlich gegenüber dem Umweltbundesamt über die von den bei ihnen angeschlossenen Gerätebatterieherstellern in Deutschland **in Verkehr** gebrachte **Gerätebatteriemenge**. Für Hersteller von **Fahrzeug- und Industriebatterien** besteht diese Pflicht nicht. Diese berichten nur über **Sammel- und Verwertungsergebnisse** und nicht über in Verkehr gebrachte Mengen.“³³ Hersteller von Fahrzeug- und Industriebatterien sind nicht verpflichtet, einem der Rücknahmesysteme beizutreten, müssen aber dem Käufer eine kostenlose Rückgabemöglichkeit anbieten.³⁴

4.1. Mindestsammelquoten in der EU und Deutschland

Die Mindestsammelquote für **Geräte-Alt Batterien** in der **EU** wurde von 25 Prozent ab 2012 auf 45 Prozent ab 2016 erhöht.³⁵ In **Deutschland** wurde das Sammelziel für die Batterie-Rücknahmesysteme ab 2014 auf 40 Prozent, ab 2016 auf 45 Prozent und auf 50 Prozent ab dem 01.01.2021³⁶ festgelegt.

31 <https://www.stiftung-ear.de/de/startseite>.

32 <https://www.ear-system.de/ear-verzeichnis/battgruecknahmesysteme#no-back>; Siehe hierzu auch <https://www.batteriegesetz.de/geraetebatterie-ruecknahmesysteme-ab-2022/>.

33 Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage, Gefahren von Lithium-Batterien in Haushalten und Entsorgungsbetrieben, 09.04.2019, <https://dserver.bundestag.de/btd/19/092/1909212.pdf>.

34 Vgl. ZVEI (2023), Batterierecycling in Deutschland für 2021, 06/2023, https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2023/Mai/Faktenblatt_Recycling/Faktenblatt_Recycling_End.pdf.

35 Art. 10 Abs. 2 Buchst. a und b Richtlinie 2006/66/EG, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A02006L0066-20180704&qid=1716531089022>.

Vgl. auch The collection of waste portable batteries in Europe in view of the achievability of the collection targets set by Batteries Directive 2006/66/EC, Study on behalf of the European Portable Battery Association (EPBA), 27.06.2022, S. 1, <https://www.epbaeurope.net/assets/Report-on-the-portable-battery-collection-rates---Short-Update-2022.pdf>.

36 § 16 Abs. 1 BattG. § 16 neu gef. mWv 1.1.2021 durch G v. 3.11.2020 (BGBl. I S. 2280).

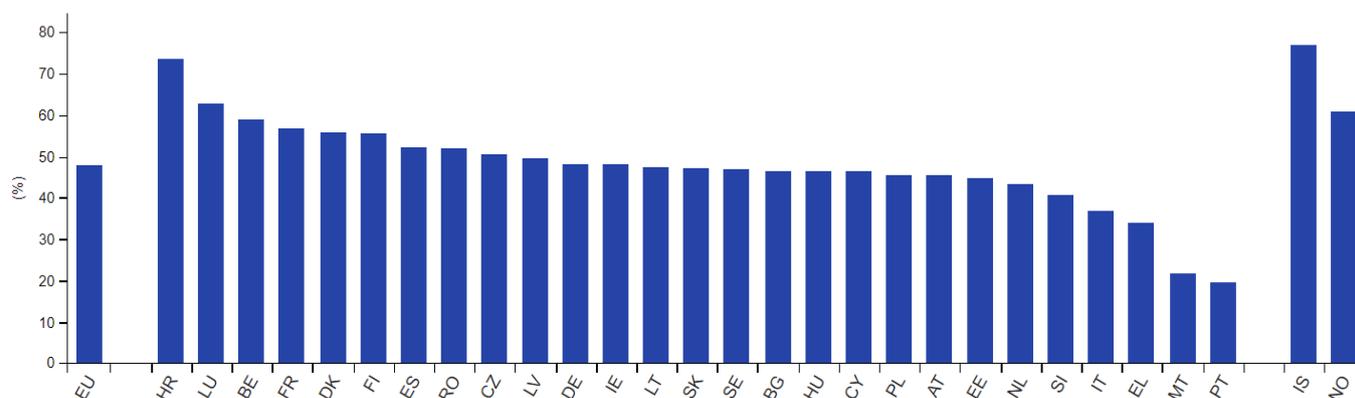
Die Verordnung (EU) 2023/1542 legt in Art. 59 Abs. 3 Unterabs. 1 Buchst. b bis c ab dem 01.01.2024 neue Mindestsammelquoten für Geräte-Alt Batterien fest: **63 Prozent** bis zum 31. Dezember 2027 und **73 Prozent** bis zum 31. Dezember 2030.³⁷

Mit der Verordnung (EU) 2023/1542 sollen nun neben den Rücknahme- und Sammelsystemen für **Geräte-Alt Batterien**³⁸ auch Rücknahme- und Sammelsysteme für **LV-Alt Batterien**³⁹ eingerichtet werden. Art. 60 Abs. 3 Unterabs. 1 Buchst. a und b der Verordnung (EU) 2023/1542 legen nun erstmals eine Mindestsammelzielvorgabe für **LV-Alt Batterien** fest: 51 Prozent bis 31. Dezember 2028 und 61 Prozent bis 31. Dezember 2031.⁴⁰

4.2. Sammelquoten für Geräte-Alt Batterien in der EU im Jahr 2021

Im Jahr 2021 wurde fast die Hälfte (48 Prozent) der in der EU verkauften Gerätebatterien und -akkumulatoren recycelt. Wie die folgende Abbildung zeigt, lag Kroatien (HR) 2021 weit über der durchschnittlichen Sammelrate, gefolgt von Luxemburg und Belgien. Schlusslichter waren Portugal (PT) und Malta (MT):⁴¹

Portable batteries and accumulators collected for recycling, 2021



Romania, Greece, Iceland: 2020 data instead of 2021.

Source: Eurostat (online data code: env_waspb)

eurostat

37 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1542>.

38 Art. 59 Abs. 1 Buchst. a VO (EU) 2023/1542. (gilt ab dem 18.08.2025).

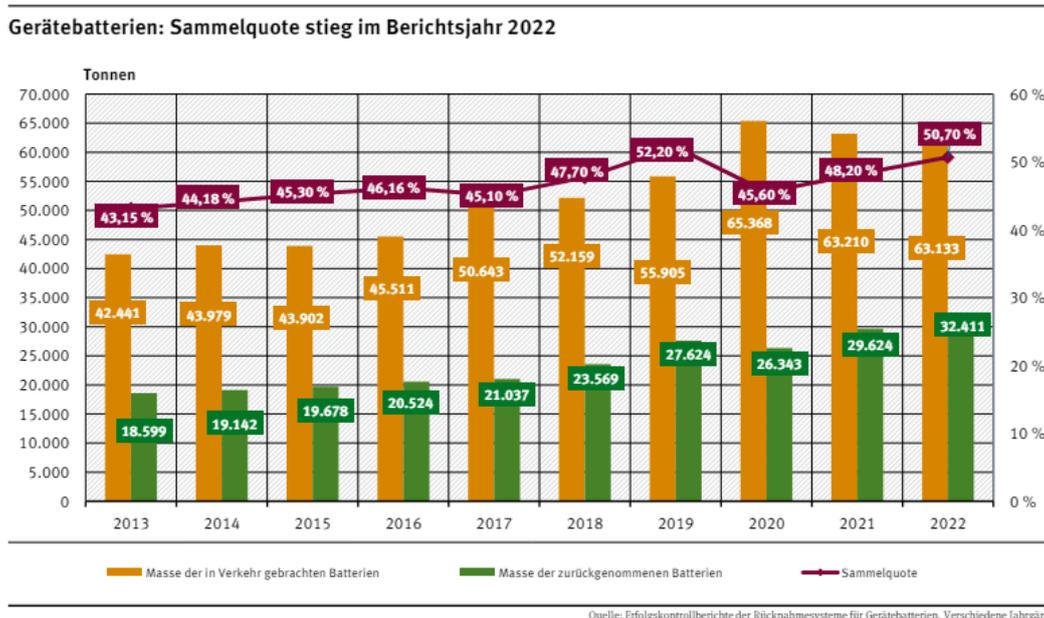
39 Art. 60 Abs. 1 Unterabs. 1 Buchst. a VO (EU) 2023/1542. (gilt ab dem 18.08.2025).

40 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1542>.

41 Waste statistics - recycling of batteries and accumulators, https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics_-_recycling_of_batteries_and_accumulators.

4.3. Sammelquoten für Geräte-Alt Batterien in Deutschland

Die folgende Abbildung gibt Auskunft über die in den Jahren 2013 bis 2022 erreichten Sammelquoten für Geräte-Alt Batterien in Deutschland. Im Jahr 2021 lag die Sammelquote bei 48,20 Prozent und damit unter der Mindestsammelquote des BattG von 50 Prozent. Im Jahr 2022 lag sie mit 50,70 Prozent knapp über der geforderten Mindestsammelquote:⁴²



In der nächsten Tabelle findet sich ein Überblick über die **Gesamtsammelrate** für Geräte-Alt Batterien im Jahr 2021 sowie für **Blei-Säure-, Nickel-Cadmium- und sonstige Batterien** (im Jahr 2021 fallen Lithium-Batterien noch unter die Kategorie „sonstige Batterien“). Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) gibt zur Tabelle folgende Hinweise: „Die Spalten ‘Verkäufe’, ‘Sammlung’ und ‘Sammelquote’ beziehen sich ausschließlich auf Geräte-Alt Batterien. Die Spalten ‘Recyclingeffizienz’ und ‘Recyclingniveau’ beziehen sich auf alle Alt Batterien. Die Sammelquote ist das Verhältnis der Masse der in einem Kalenderjahr zurückgenommenen Alt Batterien zur Masse der Batterien, die im Durchschnitt des betreffenden und der beiden vorangegangenen Kalenderjahre erstmals in Verkehr gebracht wurden und für eine getrennte Erfassung zur Verfügung stehen. [...]. Das Recyclingniveau entspricht der Masse der gesammelten Alt Batterien (in Tonnen), die in einem Jahr recycelt wurden. In Abgrenzung zur Recyclingeffizienz, die sich auf den Output eines Recyclingprozesses bezieht, wird hier [...] die Masse verstanden, die in einem Jahr dem Recycling zugeführt wurde.“⁴³

42 https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/3_abb_gb-sammelquote_2023-10-23.pdf.

43 <https://www.bmuv.de/themen/kreislaufwirtschaft/statistiken/altbatterien>. (Stand: 18.08.2023).

Daten für das Jahr 2021

	Verkäufe (in Tonnen)	Sammlung (in Tonnen)	Sammelquote (in Prozent)	Recycling-effizienz (in Prozent)	Recyclingniveau (in Tonnen)
Gerätebatterien	63.210	29.624	48,17		
Blei-Säure-Batterien	2.325	1.354	36,16	84,54	201.519
Ni-Cd-Batterien	137	1.231	822,49	79,43	1.045
sonstige Batterien	60.749	27.039	45,67	77,85	37.100

Der Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (ZVEI) erklärt, die Sammelquote setze die aktuellen Sammelmengen ins Verhältnis zu den durchschnittlichen Verkaufsmengen der letzten drei Jahre. Batterien könnten sehr langlebig sein und kämen oft erst nach vielen Jahren zurück. In den letzten Jahren hätten der Verkauf und die Verwendungen für Batterien stetig zugenommen. Bei der Sammelquote würden daher die Rückläufe der Vergangenheit mit den hohen Verkaufsmengen der Gegenwart verglichen.⁴⁴

Das Umweltbundesamt (UBA) erläutert zur stofflichen Verwertung der Geräte-Altbatterien:

„Die Masse der Geräte-Altbatterien, die einem Recyclingverfahren zur stofflichen Verwertung zugeführt wurde, betrug im Jahr 2022 35.123 t (2021: 28.652 t). Die Verwertungsquote für Geräte-Altbatterien, die ausdrückt, wieviel von den gesammelten Altbatterien tatsächlich einer stofflichen Verwertung zugeführt wurden, ist von 98,1 % im Jahr 2021 auf nun 108,4 % gestiegen. Dies bedeutet, dass im Jahr 2022 mehr Batterien einer stofflichen Verwertung zugeführt (35.123 t) als gesammelt (32.411 t) wurden.“⁴⁵

Wie sich eine Verwertungsquote von unter oder über 100 Prozent erklären lässt, erläutert das UBA wie folgt:

44 https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2023/Mai/Faktenblatt_Recycling/Faktenblatt_Recycling_End.pdf.

45 <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/altbatterien#im-jahr-2022-hat-deutschland-alle-von-der-eu-geforderten-mindestziele-erreicht>.

„Da sich die Verwertungsquote auf die Sammlung und die Verwertung von Altbatterien eines Kalenderjahres bezieht, resultieren Verwertungsquoten unter oder über 100 % größtenteils aus dem Auf- oder Abbau von Lagerbeständen der Rücknahmesysteme oder der Sortierer.“⁴⁶

Laut Eurostat werde beim **Recycling** von Batterien und Akkumulatoren nicht zwischen Geräte- und Industrie-/Autobatterien unterschieden. Daher sei es nicht möglich, die Art der Batterien zu bestimmen, wenn sie zur Recyclinganlage gebracht würden. Folglich seien die Mengen an Altbatterien und -akkumulatoren, die dem Recyclingprozess zugeführt würden, viel höher als die erfassten **Verkaufs- und Sammelmengen**, die **nur Gerätebatterien** und **-akkumulatoren** umfassten. Aufgrund des breiten Spektrums an Batterien und der unterschiedlichen Metalle und Verbindungen, aus denen sie hergestellt würden, gebe es für jeden Batterietyp (Blei-Säure, Nickel-Cadmium etc.) **spezifische Recyclingverfahren**.⁴⁷

Im Jahr 2022 machten Alkali-Mangan-Batterien mit 56,7 Prozent den größten Anteil der Gerätebatterien aus, gefolgt von Lithium-Ionen-Batterien mit 25,5 Prozent. Blei-Säure-Batterien machten 3,8 Prozent und Nickel-Cadmium-Batterien 0,2 Prozent der in Verkehr gebrachten Batterien aus. Der Anteil der Akkumulatoren an den Gerätebatterien betrug im Jahr 2022 33,8 Prozent, 66,2 Prozent waren Primärbatterien:⁴⁸

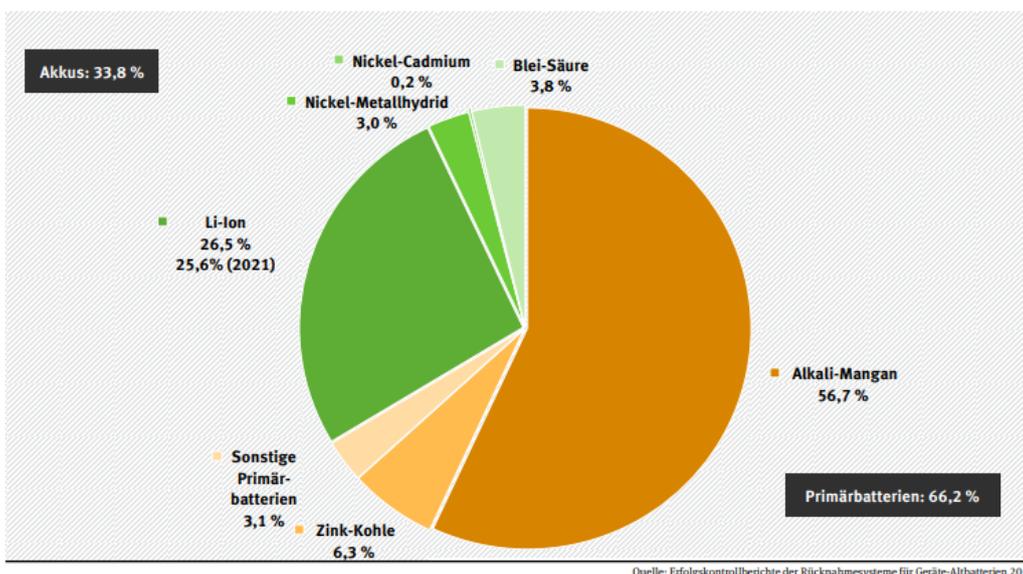
46 <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/altbatterien#im-jahr-2022-hat-deutschland-alle-von-der-eu-geforderten-mindestziele-erreicht>.

47 Waste statistics - recycling of batteries and accumulators, https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics_-_recycling_of_batteries_and_accumulators.

48 Altbatterien, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/altbatterien#geratebatteriemarkt-masse-der-lithium-sekundarbatterien-stieg-wie-im-jahr-zuvor-staerker-als-jedes-andere-batteriesystem-an>.

Gerätebatterien: Anteil der in Verkehr gebrachten Akkus betrug im Jahr 2022 fast 34 Prozent

Das Verhältnis Akkus zu Primärbatterien ist im Jahr 2022 leicht gestiegen



Auch im Auftrag der European Portable Battery Association (EPBA) werden regelmäßig Studien über die Rückgabequote von Geräte-Altbatterien der einzelnen europäischen Staaten im Hinblick auf die Erreichbarkeit der in der Batterierichtlinie 2006/66/EG festgelegten Sammelziele erstellt.⁴⁹

Die Deutsche Umwelthilfe (DUH) kritisiert, dass immer noch ein großer Teil der Batterien fälschlicherweise im Hausmüll, in dafür nicht zugelassenen Verwertungsanlagen, in der Umwelt lande oder illegal exportiert werde, z. B. zusammen mit den entsprechenden Elektroaltgeräten.⁵⁰

4.4. Fahrzeug- und Industriebatterien

ZVEI (2023) konstatiert, für Fahrzeug- und Industriebatterien gebe es **keine gesetzlich festgelegten Sammelquoten**. Der Verband betont jedoch, dass bei der Betrachtung der Bleibatterie-Anwendungssegmente **Fahrzeug- und Industriebatterien die Sammelquote annähernd 100 Prozent** betrage und verweist zudem auf das Pfandsystem.⁵¹

49 The collection of waste portable batteries in Europe in view of the achievability of the collection targets set by Batteries Directive 2006/66/EC, Study on behalf of the European Portable Battery Association (EPBA), 27.06.2022, <https://www.epbaeurope.net/assets/Report-on-the-portable-battery-collection-rates---Short-Update-2022.pdf>.

50 Stellungnahme der Deutschen Umwelthilfe zur Überarbeitung des Batteriegesetzes (Batteriegesetz (BattG) zuletzt geändert am 3.11.2020 und in Kraft getreten am 1.1.2021 wird schrittweise bis zum 18. Februar 2024 von der europäischen EU-Batterieverordnung abgelöst), S. 7, https://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Projektinformation/Kreislaufwirtschaft/Batterien/240311_DUH_Stellungnahme_BattG_2023_FINAL.pdf.

51 ZVEI (2023), Batterierecycling in Deutschland für 2021, 06/2023, https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2023/Mai/Faktenblatt_Recycling/Faktenblatt_Recycling_End.pdf.

Für **Fahrzeugg Batterien** (Starterbatterien) besteht gemäß **BattG** eine Pfandpflicht:

„Vertreiber, die Fahrzeugbatterien an Endnutzer abgeben, sind verpflichtet, je Fahrzeugbatterie ein Pfand in Höhe von 7,50 Euro einschließlich Umsatzsteuer zu erheben, wenn der Endnutzer zum Zeitpunkt des Kaufs einer neuen Fahrzeugbatterie keine Fahrzeug-Alt Batterie zurückgibt.“⁵²

Thielmann et al. (2020) vom Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI erläutern zu kleinen Lithium-Ionen-Batterien (LIB) und zu großen LIB aus Altfahrzeugen:

„Die Verwertung von Lithium-Ionen-Batterien (LIB) aus Altfahrzeugen wird innerhalb der Europäischen Union durch die Richtlinien 2000/53/EC^[53] und 2006/66/EC^[54] geregelt. Erstere befasst sich mit der Verwertung von Fahrzeugen am Ende ihres Lebenszyklus. Für Teile mit erhöhtem Gefährdungspotenzial wie die Batterie eines E-Fahrzeugs ist der Ausbau und eine getrennte Handhabung vorgeschrieben. Diese wird in der Batterierichtlinie 2006/66/ EC reglementiert, welche eine erweiterte Herstellerhaftung für Batterieproduzenten vorsieht. Diese müssen für alle Kosten des Sammel-, Aufbereitungs- und Recyclingsystems aufkommen. [...].

Das Recycling von kleinen Lithium-Ionen-Batterien hat sich in Europa bereits etabliert. LIB aus Fahrzeugen sind jedoch wesentlich größer und schwerer und haben viel mehr Energie gespeichert als Gerätebatterien. Dies erzeugt zusätzlichen Aufwand für das sichere und umweltschonende Recycling. Verfahrensalternativen hierfür wurden bereits in verschiedenen öffentlich geförderten FuE-Projekten erforscht bzw. werden kommerziell angeboten (zum Beispiel Umicore, Batrec, Duesenfeld, Retriev Technologies etc.. Das Recycling gilt prinzipiell als technisch machbar. Es gibt jedoch weiteren Optimierungsbedarf, unter anderem vor dem Hintergrund sich ändernder Zellchemien^[55] und Batteriedesigns. Unabhängig vom Recyclingverfahren sind verschiedene sicherheitstechnische Aspekte beim Zerlegen, Lagern und Transportieren zu beachten. Wesentliche Wertträger sind die Metalle Kobalt und Nickel, gefolgt von Kupfer. Für das Erreichen der vorgeschriebenen massenbezogenen Recyclingquote für

52 § 10 Abs. 1 Satz 1 BattG, <https://www.gesetze-im-internet.de/battg/BJNR158210009.html>.

53 Richtlinie 2000/53/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. September 2000 über Altfahrzeuge - Erklärung der Kommission, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32000L0053&qid=1716970534993>.

54 Richtlinie 2006/66/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 6. September 2006 über Batterien und Akkumulatoren sowie Altbatterien und Altakkumulatoren und zur Aufhebung der Richtlinie 91/157/EWG, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32006L0066&qid=1716970622443>.

55 Unterschiedliche Arten von Lithium-Ionen-Batterien enthalten unterschiedliche chemische Zusammensetzungen. Wesentliche Zellchemien sind z. B. NCA, NCM, LMO, LFP., https://www.batterien.fraunhofer.de/content/dam/batterien/de/documents/Allianz_Batterie_Zellformate_Studie.pdf.

Batterien ist auch die Wiedergewinnung von Eisen/Stahl und Aluminium von großer Bedeutung.“⁵⁶

Ab dem **18.08.2025**⁵⁷ gelten die Regelungen des Art. 61 der Verordnung (EU) 2023/1542 für die Sammlung von Starteralt-, Industrialt- und Elektrofahrzeugaltbatterien. Art. 61 Abs. 1 der Verordnung (EU) 2023/1542 lautet wie folgt:

„(1) Die Hersteller von Starterbatterien, Industriebatterien und Elektrofahrzeugbatterien bzw. die Organisationen für Herstellerverantwortung, [...], nehmen alle Starteraltbatterien, Industriebatterien und Elektrofahrzeugaltbatterien unabhängig von Art, chemischer Zusammensetzung, Zustand, Marke oder Herkunft der betreffenden Batteriekategorie, die sie im Hoheitsgebiet des betreffenden Mitgliedstaats erstmals auf dem Markt bereitgestellt haben, unentgeltlich und ohne den Endnutzer zu verpflichten, eine neue Batterie zu kaufen oder die Altbatterie bei ihnen gekauft zu haben, zurück und stellen sicher, dass diese getrennt gesammelt werden. Zu diesem Zweck akzeptieren sie, Starteraltbatterien, Industriebatterien und Elektrofahrzeugaltbatterien von Endnutzern oder von Rücknahme- und Sammelsystemen zurückzunehmen, einschließlich Sammelstellen, die von ihnen in Zusammenarbeit mit folgenden Personen oder Stellen eingerichtet werden: [...].“⁵⁸

Erwägungsgrund 104 der Verordnung (EU) 2023/1542 weist zudem auf Folgendes hin:

„Altbatterien sollten im Rahmen der auf der Grundlage der Richtlinie 2012/19/EU^[59] eingerichteten nationalen Sammelsysteme zusammen mit Elektro- und Elektronik-Altgeräten und im Einklang mit der Richtlinie 2000/53/EG^[60] zusammen mit Altfahrzeugen gesammelt werden können. In solchen Fällen sollte die vorgeschriebene Mindestbehandlung darin bestehen, dass die Batterien aus den gesammelten Elektro- und Elektronik-Altgeräten und Altfahrzeugen entfernt werden. Batterien sollten nach ihrer Entfernung aus den gesammelten Altgeräten und Altfahrzeugen den Anforderungen dieser Verordnung unterliegen. Insbesondere sollten solche Altbatterien auf die für die betreffende Batteriekategorie geltenden Zielvorgaben für

56 Thielmann, Axel et al. (2020), Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungsbedarf Sind Batterien für Elektroautos der Schlüssel für eine nachhaltige Mobilität der Zukunft?, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, S. 21f, <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2020/Faktencheck-Batterien-fuer-E-Autos.pdf>.

57 Kapitel VIII der der VO (EU) 2023/1542 „Bewirtschaftung von Altbatterien“ umfasst die Artikel 54 bis Artikel 76. Kapitel VIII gilt ab dem 18.08.2025.

58 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1542>.

59 Richtlinie 2012/19/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Juli 2012 über Elektro- und Elektronik-Altgeräte, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32012L0019&qid=1716970290122>.

60 Richtlinie 2000/53/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. September 2000 über Altfahrzeuge - Erklärung der Kommission, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32000L0053&qid=1716970534993>.

die Sammlung angerechnet werden und den in dieser Verordnung festgelegten Behandlungs- und Recyclinganforderungen unterliegen.“⁶¹

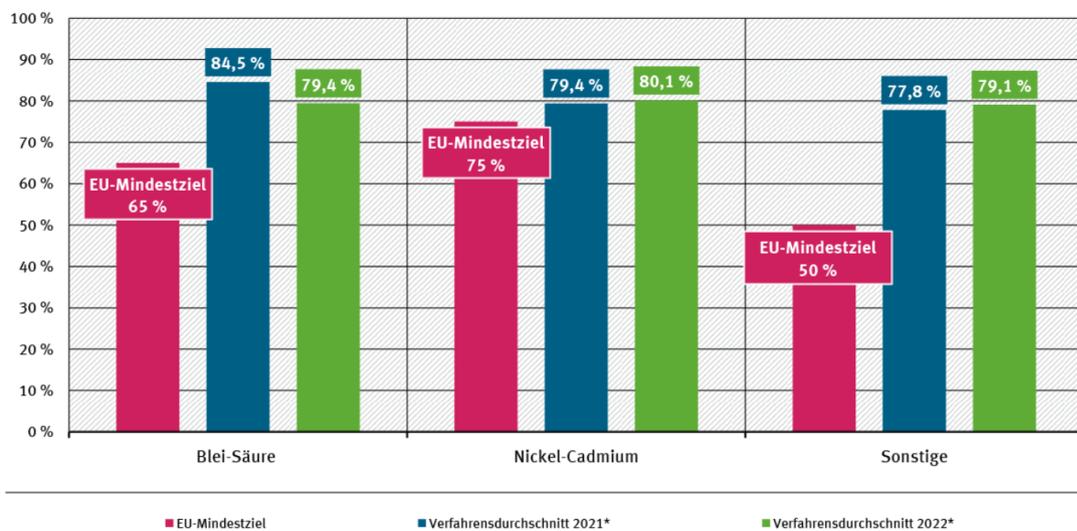
4.5. Recyclingeffizienz

Die vorgegebene **Recyclingeffizienz** nach den Vorgaben des BattG beträgt für

- Blei-Säure-Altballerrien 65 Prozent
- Nickel-Cadmium-Altballerrien 75 Prozent
- sonstige Altballerrien 50 Prozent.⁶²

Effizienzen der Recyclingverfahren für Altballerrien 2021 und 2022

EU-Mindestziele werden auch 2022 erreicht



63

ZVEI zufolge haben **Blei-Säure-Batterien** die höchste Recyclingeffizienz:

„Die Recyclingeffizienz, also das Verhältnis der Menge der wiedergewonnenen Rohstoffe zu der Menge, die dem Recyclingprozess zugeführt wird, ist bei Blei-Säure-Batterien mit rund 85 Prozent weit über der gesetzlich geforderten Effizienzquote von 65 Prozent. Ein Grund für die hohe Verwertungsquote ist sicherlich die Tatsache, dass die Wiederverwertung oft ohne

61 Erwägungsgrund 104 der VO (EU) 2023/1542.

62 § 14 Abs. 1 Satz 3 Nr. 1 - 3 BattG.

Siehe auch Verordnung (EU) Nr. 493/2012 der Kommission vom 11. Juni 2012 mit Durchführungsbestimmungen zur Berechnung der Recyclingeffizienzen von Recyclingverfahren für Altballerrien und Altkumulatoren gemäß der Richtlinie 2006/66/EG des Europäischen Parlaments und des Rates, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?qid=1539943366156&uri=CELEX:32012R0493>.

63 <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/altballerrien#im-jahr-2022-hat-deutschland-alle-von-der-eu-geforderten-mindestziele-erreicht>.

Qualitätseinbußen möglich ist. Bei Betrachtung der Bleibatterie-Anwendungssegmente Fahrzeug- und Industriebatterien geht man von [...] einer Recyclingeffizienz von rund 90 Prozent aus [...]. Bei den anderen chemischen Batteriesystemen liegt die Recyclingeffizienz bei knapp unter 80 Prozent und somit ebenfalls über den Vorgaben.“⁶⁴

Anhang XII Teil B Abs. 1 und 2 der Verordnung (EU) 2023/1542 enthalten **höhere Zielvorgaben** für die **Recyclingeffizienz** von Blei-Säure-, Nickel-Cadmium-Batterien sowie sonstige Altbatterien und legen erstmals Zielvorgaben für **Lithium-Batterien** fest.⁶⁵

4.6. Batterietypen für E-Autos

Der ADAC weist darauf hin, dass die in Elektroautos neben den **Traktionsbatterien**⁶⁶ (meist 400 Volt) verbauten 12 Volt **Starterbatterien** Blei und weitere umweltschädliche Zusätze sowie ätzende Säure enthalten.⁶⁷ Laut BMUV würden die große Mengen Blei enthaltenen **Fahrzeugbatterien** (Starterbatterien) aber **zu nahezu 100 Prozent** verwertet.⁶⁸

64 https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2023/Mai/Faktenblatt_Recycling/Faktenblatt_Recycling_End.pdf.

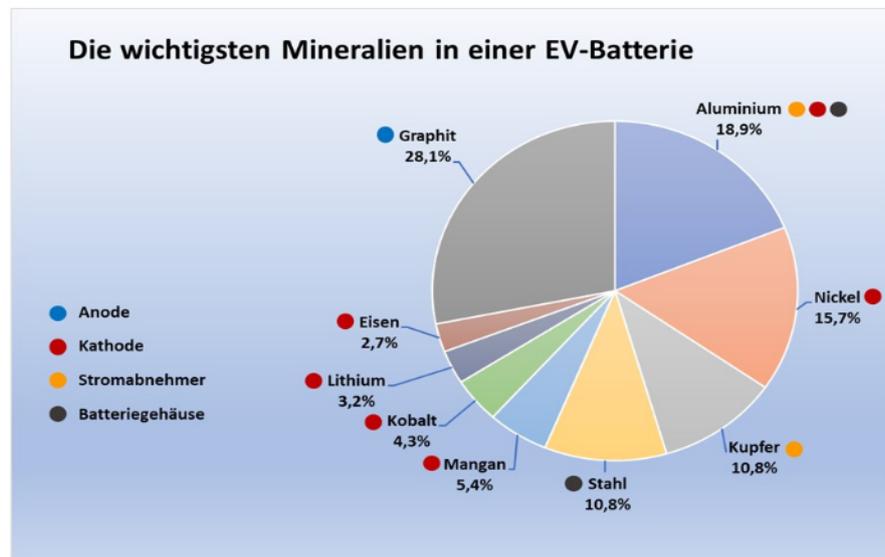
65 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1542>.

66 Auch als Antriebsbatterie bezeichnet.

67 <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/reparatur-pflege-wartung/wartung-inspektion/autobatterie-entsorgen/>

68 BMUV, Altbatterien, 07.07.2022, <https://www.bmuv.de/themen/kreislaufwirtschaft/abfallarten-und-abfallstroeme/altbatterien>.

Das folgende Diagramm zeigt die wichtigsten in einer **Traktionsbatterie** enthalten Mineralien:⁶⁹



© KIT

Traktionsbatterien von Elektro- und Hybridfahrzeugen sind die Batterien, die mit Strom „betankt“ werden. Sie basieren in der Regel auf der Lithium-Ionen-Technologie. Lithium-Ionen-Batterien fallen gemäß der Verordnung (EU) Nr. 493/2012⁷⁰ unter die Kategorie der „**sonstigen Batterien**“. Für diese Batterien gilt bis zum 18.08.2025 beim Recycling eine Mindesteffizienz von **50 Prozent** des durchschnittlichen Gewichts.⁷¹

Im Jahr 2021 lag die Recyclingeffizienz für **sonstige Batterien** über der Mindestverwertungsvorgabe von 50 Prozent und erreichte **77,85 Prozent**.⁷²

69 CHEManager (2023), Batterie-Recycling-Technologien – Verfahren, Trends und Marktchancen, Wie weit ist das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien entwickelt, 05.03.2023, <https://www.chemanager-online.com/news/batterie-recycling-technologien-verfahren-trends-und-marktchancen>.

70 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, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32012R0493&qid=1716542234596>.

71 Anhang III Teil B der Richtlinie 2006/66/EG, <https://eur-lex.europa.eu/search.html?scope=EUR-LEX&text=493%2F2012&lang=de&type=quick&qid=1716897402116>; siehe auch Erwägungsgrund der Verordnung (EU) Nr. 493/2012 der Kommission vom 11. Juni 2012; vgl. Antwort auf die Frage 37, 27.05.2020, <https://dserver.bundestag.de/btp/19/19162.pdf#P.20220>.

72 <https://www.bmuv.de/themen/kreislaufwirtschaft/statistiken/altbatterien>. (Stand: 18.08.2023).

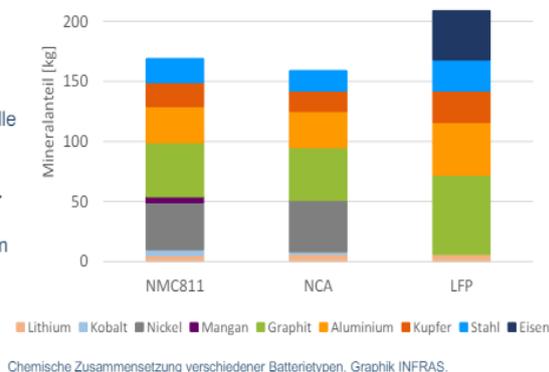
Die Verordnung (EU) 2023/1542 sieht für **Lithium-Batterien** eine eigene Zielvorgabe für die Recyclingeffizienz von **65 Prozent** des durchschnittlichen Gewichts vor.⁷³ Die Zielvorgabe für die Recyclingeffizienz soll spätestens bis zum 31. Dezember 2025 erreicht werden.⁷⁴ Spätestens bis zum 31. Dezember 2030 soll eine Recyclingeffizienz von **70 Prozent** erreicht werden.⁷⁵

Laut Bianchetti et al. (2023) dominieren Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid (NMC), Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminiumoxid (NCA) und Lithium-Eisenphosphat (LFP)-Batterien den Markt für Traktionsbatterien.⁷⁶ Siehe hierzu die folgende Abbildung und die Erläuterungen zu den einzelnen Lithium-Ionen-Batterien:⁷⁷

1. Aufbau von Lithium-Ionen-Batterien

Chemische Zusammensetzung

Die Materialpaarung von Anode und Kathode bestimmen massgebend die Eigenschaften der Zelle und damit der Batterie. Aktuell werden mehrheitlich **NMC-, NCA- und LFP-Batterien** mit jeweils Graphit-Anoden im Bereich der Batterien für Elektrofahrzeuge verwendet.



Batterietyp	Chemie Kathode	Stärke	Schwäche
NMC	Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid	<ul style="list-style-type: none"> Hohe Energiedichte Schnell ladbar 	<ul style="list-style-type: none"> Erhöhte Überhitzungsgefahr Abhängigkeit von Kobalt
NCA	Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid	<ul style="list-style-type: none"> Hohe Energiedichte Schnell ladbar 	<ul style="list-style-type: none"> Erhöhte Überhitzungsgefahr Abhängigkeit von Kobalt
LFP	Lithiumeisenphosphat	<ul style="list-style-type: none"> Höhere Packungsdichte Kein Kobalt 	<ul style="list-style-type: none"> Weniger hohe Energiedichte Leistungsreduktion bei tiefen Temperaturen

Alternative Batterietypen

Im Folgenden werden weitere Typen und alternative Technologien zu Lithium-Ionen-Batterien kurz erläutert. Aktuell werden diese jedoch noch nicht im industriellen Massstab produziert und verwendet.

LMNO-Batterien (Lithium-Mangan-Nickel-Oxid-Kathode) weisen eine hohe Energiedichte auf und sind frei von Kobalt. Allerdings muss die Zyklenfestigkeit verbessert werden, bevor sie in Batteriefahrzeugen zum Einsatz kommen können.

LTO-Batterien (NMC-Kathode mit Lithium-Titanium-Oxid Anode) können zwar schnell geladen werden, weisen jedoch ein schlechtes Preis-Leistungsverhältnis auf und werden in Serienfahrzeugen praktisch nicht eingesetzt.

Silizium-Anoden-Batterien weisen eine bis zu 50% höhere Energiedichte auf als Batterien mit einer Graphit-Anode, jedoch dehnt sich das Silizium aus, wenn es Lithium-Ionen aufnimmt, was die Lebensdauer der Batterie negativ beeinflusst.

Natrium-Ionen-Batterien sind nicht entflammbar und funktionieren auch bei kalten Temperaturen zuverlässig. Jedoch weisen sie eine begrenzte Lebensdauer und eine geringere Energiedichte auf als die häufig verwendeten Batterietypen.

Feststoffbatterien mit metallischem Lithium als Anode weisen ein geringeres Risiko für Kurzschlüsse auf. Feststoffbatterien gelten als sehr vielversprechend bezüglich Energiedichte, die rund 70% höher sein kann, als die Lithium-Ionen-Batterien.

73 Anhang XII Teil B Abs. 1 Buchst. b der VO (EU) 2023/1542.

74 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1542>.

75 Anhang XII Teil B Abs. 2 Buchst. b der VO (EU) 2023/1542,

76 Bianchetti, Roberto et al. (2023), Grundlegendokument, Batterien für Elektrofahrzeuge, im Auftrag von Energie-Schweiz/Bundesamt für Energie (BFE), April 2023, S. 8f, <https://www.news.admin.ch/news/message/attachments/77015.pdf>.

77 Bianchetti, Roberto et al. (2023a), S. 4, <https://www.news.admin.ch/news/message/attachments/77017.pdf>.

Laut IW Consult GmbH (2024), die sich auf Expertenangaben berufen, werden vor allem zwei Batterietypen den spezifischen Rohstoffbedarf zukünftig minimieren: **Lithium-Eisen-Phosphat-Batterien**⁷⁸ und **Natrium-Ionen-Batterien**⁷⁹. Letztere verzichten auf Lithium.⁸⁰

Zu den Batterietypen, die von der industriellen Reife noch entfernt sind, zählen laut IW Consult GmbH (2024) **Feststoffbatterien**, **Magnesium-Ionen-Batterien** sowie weitere Zellchemien wie **Lithium-Schwefel**, **Lithium-Luft**:

- **„Feststoffbatterien**: sie stellen eine Querschnittstechnologie für verschiedene Varianten von Zellchemien dar. Sie unterscheiden sich generell von anderen Batterietypen dadurch, dass der Elektrolyt aus einem Feststoff besteht. Dadurch soll in der Konstruktion die Energiedichte erhöht und der sonstige Rohstoffeinsatz verringert werden. In den Expertengesprächen wurde dieser Option keine große Marktnähe zugeschrieben.
- Von den weiteren Zellchemien wurde der **Magnesium-Ionen-Batterie** die größte Marktnähe zugeordnet. Auch sie befindet sich aber noch im Forschungsstadium. Vorteilhaft ist, dass sie ein Potenzial zur Verringerung des Lithiumbedarfs bietet.
- Eine ganze Reihe weiterer Zellchemien (z.B. **Lithium-Schwefel**, **Lithium-Luft**) befindet sich im Forschungsstadium. Sie zeichnen sich in der Regel durch höhere Energiedichten und einen reduzierten Bedarf kritischer Rohstoffe im Vergleich zu den heute dominierenden Batterietypen aus. Meistens basieren aber auch diese Zellchemien auf dem Einsatz von Lithium. Allerdings liegen noch keine Erfahrungen für eine industrielle Produktion

78 Lithium-Eisen-Phosphat (LFP): „Charakteristisch für diesen Batterietypen ist eine hohe strukturelle und zyklische Stabilität, was in einer hohen Lebensdauer und Sicherheit resultiert. Außerdem setzt sich die Kathode aus deutlich günstigeren Materialien zusammen als das bei NMC oder NCA Kathoden der Fall ist, wodurch sich der Produktionspreis deutlich senken lässt. [...]. Allerdings weist LFP eine begrenzte spezifische und volumetrische Energiedichte von ca. 120 Wh kg⁻¹ und 220 Wh l⁻¹ auf Zellniveau auf, was deutlich unterhalb der notwendigen Energiedichte von über 350 Wh kg⁻¹ und 750 Wh l⁻¹ für Reichweiten über 500 km liegt. Der geringen volumetrischen Energiedichte geschuldet, wird die Technologie in Zukunft vermutlich ausschließlich in Bussen, LKWs und stationären Energiespeichern Anwendung finden, während OEMs [Original Equipment Manufacturer] ihren Fokus auf NMC und NCA ausrichten werden.“, S. 6f, <https://sgt.agw.kit.edu/downloads/Publikationen/Think%20Tank/Lithium-Ionen-Batterien%20f%C3%BCr%20die%20Elektrom.pdf>.

79 „Natrium-Ionen-Batterien gelten als marktnah. Sie werden schon jetzt in der Hybridisierung von Lithium-Ionen-Batterien eingesetzt. Der Einsatz in zwei- und dreirädrigen Fahrzeugen sowie in kleinen Automobilen wird in naher Zukunft erwartet [...]. Die Innovation dieser Zellchemie besteht – gerade im Unterschied zu Verbesserungen der NMC- oder LFP-Batterien – im Verzicht auf Lithium. Positiv ist zudem anzumerken, dass die Technologie von den Experten als „Drop-in“-Technologie eingestuft wird. Das bedeutet, dass nur geringfügige Prozessänderungen im Vergleich zur Lithium-Ionen-Technologie nötig sind.“, S. 15, <https://expertenkreis-automobilwirtschaft.de/media/pages/home/7e1470189a-1706104367/studie-zur-begleitforschung-resilienz-der-automobil-wertschöpfungs-und-liefernetzwerke-thema-innovationen.pdf>.

80 IW Consult GmbH (2024), Begleitforschung des Expertenkreises Transformation der Automobilwirtschaft zum Thema Resilienz der automobilen Wertschöpfungs- und Liefernetzwerke Thema „Innovationen“, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), 14f, <https://expertenkreis-automobilwirtschaft.de/media/pages/home/7e1470189a-1706104367/studie-zur-begleitforschung-resilienz-der-automobil-wertschöpfungs-und-liefernetzwerke-thema-innovationen.pdf>. Hervorhebung durch Verfasser der Dokumentation.

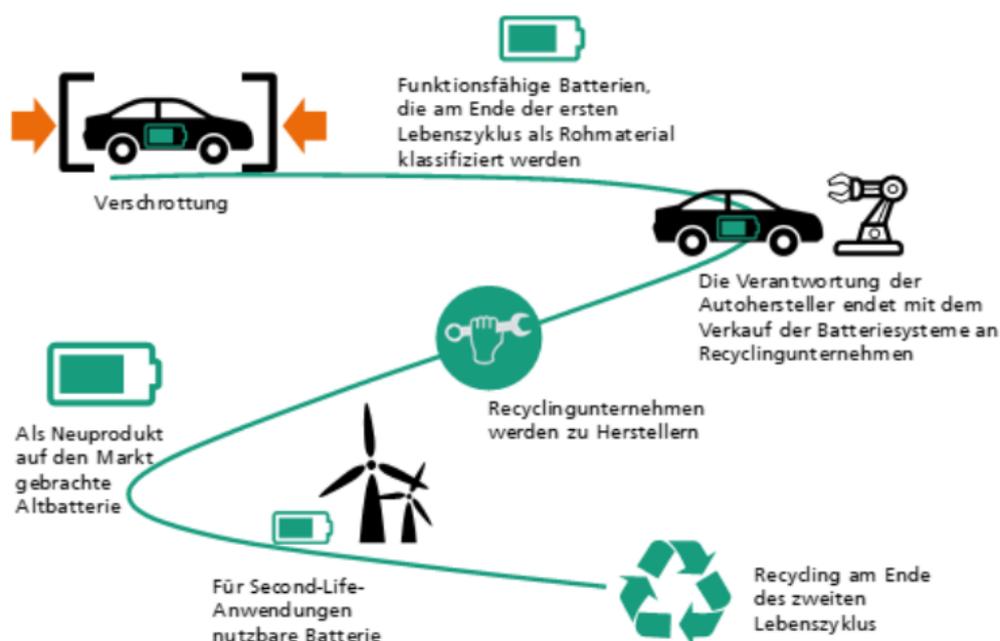
vor. Ihr Einsatz wird in der Regel in anderen Bereichen als dem Automotive-Sektor und nicht in naher Zukunft erwartet [...].“⁸¹

Nach Angaben von Bianchetti et al. (2023) sei eine Halbierung der Umweltbelastung pro kWh Batterie in den nächsten ein bis zwei Jahrzehnten durch die Wahl anderer Materialien oder durch Prozessverbesserungen durchaus realisierbar.⁸²

4.7. Multi-Life- bzw. Second-Life-Ansatz für Batterien

Bianchetti et al. (2023) erklären, beim sog. „Multilife“-Ansatz erhielten Batterien nach dem ersten Lebenszyklus im Elektroauto („1st life“), einen zweiten Lebenszyklus, in einer „Zweitnutzung“. Dieser „Multilife“-Ansatz reduziere die Nachfrage nach kritischen Materialien und ermögliche Marktlösungen für Altbatterien aus Fahrzeugen, die wirtschaftliches Potenzial hätten. Somit ersetzen gebrauchte Batterien potenzielle neue Batterien und verringerten somit deren Nachfrage. Allerdings alterten die Batterien im ersten und auch im zweiten Lebenszyklus, daher werde der Kapazitätsverlust gegenüber neuen Batterien immer drastischer. Deshalb müssten schlussendlich alle Batterien irgendwann recycelt werden. Außerdem seien neuere Batterien aufgrund des raschen Fortschritts in der Batterietechnologie, bei gleichem kritischem Materialverbrauch, leistungsfähiger als ältere Modelle. Daher könne es aus ökologischer Sicht interessanter sein, die Rohstoffe durch effizientes Recycling wiederzugewinnen, um neue Batterien herzustellen, anstatt ihre Lebensdauer zu verlängern. Die Kunst liege also darin, den optimalen Zeitpunkt und das optimale Verfahren für das Recycling zu finden.“⁸³ Die Grafik zeigt den „Multilife“-bzw. Second-Life-Ansatz einer Traktionsbatterie.⁸⁴

-
- 81 IW Consult GmbH (2024), Begleitforschung des Expertenkreises Transformation der Automobilwirtschaft zum Thema Resilienz der automobilen Wertschöpfungs- und Liefernetzwerke Thema „Innovationen“, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), S. 15, <https://expertenkreis-automobilwirtschaft.de/media/pages/home/7e1470189a-1706104367/studie-zur-begleitforschung-resilienz-der-automobil-wertschopfung-und-liefernetzwerke-thema-innovationen.pdf>.
- 82 Bianchetti, Roberto et al. (2023), Grundlagendokument, Batterien für Elektrofahrzeuge, im Auftrag von Energieschweiz/Bundesamt für Energie (BFE), April 2023, S. 18.
- 83 Bianchetti, Roberto et al. (2023), Grundlagendokument, Batterien für Elektrofahrzeuge, im Auftrag von Energieschweiz/Bundesamt für Energie (BFE), April 2023, S. 57.
- 84 DLR/ Fraunhofer IPA (2020), Untersuchung: Kreislaufstrategien für Batteriesysteme in Baden-Württemberg, KSBS BW, ENDBERICHT, Bearbeitungszeitraum: 01.10.2019 – 31.05.2020, https://www.ipa.fraunhofer.de/content/dam/ipa/de/documents/Kompetenzen/Nachhaltige-Produktion-und-Qualitaet/Endbericht_KSBS_offen.pdf.



5. Umweltwirkung unterschiedlicher Recyclingverfahren

Laut IW Consult GmbH (2024) lassen sich die derzeitigen Recyclingverfahren für Lithium-Ionen-Batterien in drei Kategorien einteilen: Pyrometallurgie, Hydrometallurgie und direktes Recycling:

- „Bei der **Pyrometallurgie** handelt es sich um ein Hochtemperaturverfahren, bei dem durch das ‘Schmelzen’ der Batterie im Hochofen die in der Batterie enthaltenen Metalloxide zu einer Legierung aus Kobalt, Kupfer, Eisen und Nickel reduziert werden [...].
- Beim **hydrometallurgischen** Recyclingverfahren werden wässrige Lösungen (meist anorganische Säuren) eingesetzt, um die Metalle aus den Batterien zu extrahieren und abzutrennen [...].
- Das Hauptziel des **direkten Recyclings** ist die Rückgewinnung der aktiven Batteriebestandteile, ohne deren chemische Struktur zu zerstören [...]. Zur Trennung der Batteriebestandteile kommen hauptsächlich physikalische Trennungsmethoden, magnetische Trennungungsverfahren oder moderate thermische Trennungungsverfahren zum Einsatz [...]. Im Gegensatz zu den metallurgischen Verfahren handelt es sich daher um ein nichtdestruktives Recyclingverfahren, das weder auf das Schmelzen noch auf die Auslaugung der Batterie angewiesen ist. Das durch das direkte Recycling zurückgewonnene aktive Batteriematerial kann direkt wieder in neue Batterien eingesetzt werden.

Pyro- und hydrometallurgische Recyclingverfahren werden bereits heute auf **industrieller** Ebene angewendet, während **direkte** Recyclingverfahren bisher hingegen nur in **Pilotprojekten** oder im Labor Anwendung finden.“⁸⁵

Neef et al. (2021) vom Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI konstatieren, die **pyrometallurgischen** Prozessschritte seien aus ökologischer Sicht als eher kritisch anzusehen. Die hohen benötigten Temperaturen und die vollständige Verbrennung aller organischen Bestandteile, sowie des Graphits führten zu einem hohen CO₂-Fußabdruck. Darüber hinaus gehe auch das Aluminium, ein in der Herstellung sehr energieaufwändiges Metall, in die Schlacke über. Die Emission weiterer kritischer Stoffe könne durch entsprechende Abluftfilter unterbunden werden. Hier seien die gesetzlichen Anforderungen in der EU hoch, in anderen Teilen der Welt sei dies aber nicht zwingend der Fall, so dass im Falle schlechter oder fehlender Abgasreinigung die pyrometallurgische Prozessroute als noch deutlich kritischer eingestuft werden müsse.⁸⁶ Das **hydrometallurgische** Verfahren sei aus ökologischer Sicht als unkritischer einzuschätzen als pyrometallurgische Prozesse. Dies liege unter anderem daran, dass keine hohen Temperaturen benötigt würden. Nicht unkritisch bei hydrometallurgischen Verfahren sei hingegen die Aufbereitung des Abwassers.⁸⁷ Laut Neef et al. sei die Weiterentwicklung neuer Technologien wie z. B. das **Direkt-Recycling** oder elektrohydraulische Verfahren sehr wahrscheinlich. Inwieweit diese das Potenzial hätten die aktuellen und aufkommenden Technologien zu verdrängen, sei aktuell nicht absehbar.⁸⁸

Vekić (2020) sieht die **Vorteile** des **direkten Recyclings** im geringen Energieaufwand und einer hohen Rückgewinnungsrate nahezu aller Batteriekomponenten. Da bei dem Prozess keine Säuren verwendet würden, sei es darüber hinaus höchst **umweltfreundlich**. Allerdings sei bisher weitgehend ungeklärt, ob das recycelte Material den **Leistungsanforderungen** einer LIB in der Elektromobilität entspreche. Eine Studie habe ein vergleichsweise schlechtes elektrochemisches

85 IW Consult GmbH (2024), Begleitforschung des Expertenkreises Transformation der Automobilwirtschaft zum Thema Resilienz der automobilen Wertschöpfungs- und Liefernetzwerke Thema „Innovationen“, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), <https://expertenkreis-automobilwirtschaft.de/media/pages/home/7e1470189a-1706104367/studie-zur-begleitforschung-resilienz-der-automobilen-wertschopfung-und-liefernetzwerke-thema-innovationen.pdf>.

86 Neef, Christoph et al. (2021), Recycling von Lithium-Ionen-Batterien: Chancen und Herausforderungen für den Maschinen- und Anlagenbau, Kurzstudie im Auftrag der IMPULS-Stiftung (Stiftung für den Maschinenbau, den Anlagenbau und die Informationstechnik), Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, November 2021, S. 31, <https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/6bdb1c34-a6a9-40dd-a9f9-33f4527c10ca/content>.

87 Neef, Christoph et al. (2021), S. 32, <https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/6bdb1c34-a6a9-40dd-a9f9-33f4527c10ca/content>.

88 Neef, Christoph et al. (2021), S. 45, <https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/6bdb1c34-a6a9-40dd-a9f9-33f4527c10ca/content>.

Verhalten der recycelten Schwarzmasse⁸⁹ festgestellt, das allerdings durch eine Hitzebehandlung deutlich aufgebessert werden konnte.⁹⁰ Die **hydrometallurgische Aufbereitungsmethoden** setzten voraus, dass die zurückzugewinnenden Metalle vorab über aufwendige **mechanische Prozesse** von den übrigen Materialien getrennt und zerkleinert würden, um die gewünschte Reinheit im Endprodukt zu erreichen. Darüber hinaus müssten die technischen Rahmenbedingungen für die Verwendung verschiedener Chemikalien gewährleistet sein, um Sicherheit und Umweltverträglichkeit garantieren zu können. Hierin lasse sich gut erkennen, dass die Einführung einer Kreislaufwirtschaft mit einer steigenden Prozesskomplexität einhergehe. Die **Pyrometallurgie** dagegen überzeuge durch Ihre Schlichtheit Metalle in wenigen Schritten und ohne den Aufwand einer mechanischen Aufbereitung ökonomisch wiederzugewinnen, wenn auch nicht in der erforderlichen Zusammensetzung. Obwohl laut Umicore die recycelte Metallverbindung in Batterien eingesetzt werden könne, gehe doch ein Großteil des dem Prozess zugeführten **Materials verloren**. Hinzukomme, dass pyrometallurgische Recyclingmethoden trotz der effizienten Nutzung von Wärmeenergie durch die Rückführung heißer Gase höchst **energieintensiv** seien. Um dem entgegenzuwirken, plane Umicore zukünftig in seiner Anlage in Hoboken (Belgien) zu 100 Prozent erneuerbare Energien zu nutzen. **Neuartige Recyclingprozesse**, wie beispielsweise das der Firma Duesenfeld, seien auf die Verarbeitung einer **bestimmten Zellchemie** (i.d.R. NMC) zugeschnitten. Dies mache sie relativ unflexibel hinsichtlich anderer Batterietypen und neuartiger Zellchemien, die in Zukunft entwickelt werden könnten.⁹¹ Das **hydrometallurgische Recycling** zeige aus kreislaufwirtschaftlicher Sicht deutliche **Vorteile gegenüber der Pyrometallurgie** auf, da beim Ersteren ein größerer Anteil der Batteriematerialien ohne Downcycling zurückgewonnen werde. Obwohl neuartige Prozesse mit vielen einzelnen Prozessschritten deutlich komplexer seien, zeichneten sie sich dennoch durch einen klar geringeren Energieverbrauch aus als altbewährte pyrometallurgische Methoden. Dies habe gegenwärtig auch erhebliche **Auswirkungen auf die Umweltbilanz** der Verfahren.⁹²

-
- 89 „Schwarzmasse ist das, was übrig bleibt, wenn eine Batterie für das Recycling behandelt wurde. Batterien bestehen aus Metallen wie Lithium, Mangan, Cobalt und Nickel. Wenn die Batterie ihr Lebensende erreicht hat, wird sie gesammelt, zerlegt und geschreddert. Das geschredderte Material wird behandelt, um Schwarzmasse zu produzieren, das eine Menge dieser Metalle enthält. Diese kritischen Materialien können aus der Schwarzmasse extrahiert und bei der Herstellung neuer Batterien oder neuer Produkten und/oder Anwendungen wiederverwendet werden. [...]. Die Zusammensetzung von Schwarzmasse ist sehr vielschichtig, da der Aufbau einer Lithium-Ionen-Batterie sich von Hersteller zu Hersteller und von einer Anwendung zur nächsten signifikant unterscheidet. Unterschiedliche Chemien wie beispielsweise von Primärbatterien und Ni-HM-Batterien produzieren ebenso Schwarzmasse. Deren Zusammensetzung kann signifikant von Original-Hersteller zu Original-Hersteller variieren.“, Keineswegs dunkle Magie: Schwarzmasse, <https://eu-recycling.com/Archive/33421#:~:text=Schwarzmasse%20ist%20das%2C%20was%20%C3%BCbrig,sie%20gesam-melt%2C%20zerlegt%20und%20geschreddert>.
- 90 Vekić, Nicola (2020), Lithium-Ionen-Batterien für die Elektromobilität: Status, Zukunftsperspektiven, Recycling, S. 29, <https://sgt.agw.kit.edu/downloads/Publikationen/Think%20Tank/Lithium-Ionen-Batterien%20f%C3%BCr%20die%20Elektrom.pdf>.
- 91 Vekić, Nicola (2020), S. 38f, <https://sgt.agw.kit.edu/downloads/Publikationen/Think%20Tank/Lithium-Ionen-Batterien%20f%C3%BCr%20die%20Elektrom.pdf>.
- 92 Vekić, Nicola (2020), S. 41, <https://sgt.agw.kit.edu/downloads/Publikationen/Think%20Tank/Lithium-Ionen-Batterien%20f%C3%BCr%20die%20Elektrom.pdf>.

Der Expertenkreis Transformation der Automobilwirtschaft (2024) führt zum „direkten Recycling“ Folgendes aus:

„Die klassischen Recyclingprozesse, die bereits in Anwendung sind, weisen nach wie vor hohes Innovationspotenzial auf. Großes Innovationspotenzial zeichnet sich jedoch auch beim noch nicht marktreifen Verfahren des „Direkten Recyclings“ ab: Bei direktem Recycling kommen in erster Linie physikalische Trennungsmethoden zum Einsatz, wenn auch bei einigen Komponenten weiterhin chemische Wiederaufbereitungsverfahren notwendig sind. Außer den Separatoren können nahezu alle Batteriekomponenten zurückgewonnen werden und direkt wieder in neuen Batterien verwendet werden. Anders als im pyrometallurgischen Verfahren kann so vor allem Lithium in höchstmöglichem Maß recycelt werden, doch auch für Kobalt, Nickel und Mangan ist eine beinahe verlustfreie Rückgewinnung denkbar. Direktes Recycling ist vor allem dann geboten, wenn die jeweilige Batterietechnologie ausgereift und keine signifikante Steigerung der spezifischen Speicherkapazität des jeweiligen Materials durch neue Synthese mehr möglich ist. Momentan ist direktes Recycling von alten Aktivmaterialien (insbesondere bei hohem Kobalt-Anteil) noch wenig sinnvoll, da mit diesem kritischen Rohstoff in Batterien einer neuen Generation deutlich mehr Speicherleistung erzielt werden kann. Ein Nachteil des direkten Recyclings ist die Anfälligkeit für Verunreinigungen und die aufwendige Vorsortierung. Recyclinganlagen des direkten Recyclings sind auf eine artgenaue Zulieferung von Batterien angewiesen oder müssen viele verschiedene Verarbeitungsmethoden in einer Anlage vereinen. Das erschwert die Automatisierung und Skalierung. Durch den digitalen Produktpass könnte zumindest die Vorsortierung der verschiedenen Batterietypen erleichtert werden. Insgesamt sorgen die Vorteile des direkten Recyclings für eine potenziell hohe Wirtschaftlichkeit, geringen Energieeinsatz sowie potenziell höhere Lithiumrückgewinnung, gerade bei ausgereiften Batterietechnologien und in Kombination mit klassischen Recyclingverfahren.“⁹³

6. CO₂-Fußabdruck recycelter Lithium-Batterien

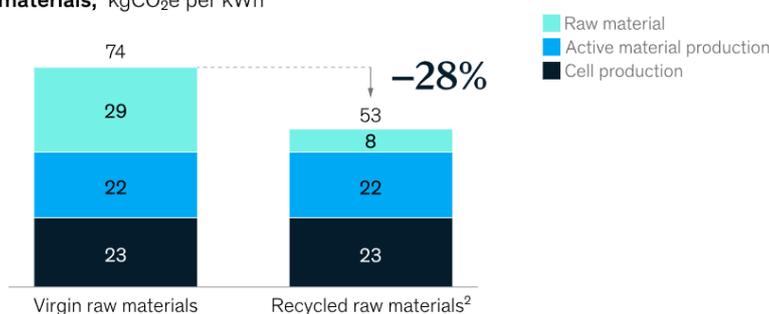
Breiter et al. (2023) stellen fest, dass die CO₂-Emissionen von recycelten Rohstoffen viermal geringer sind als die CO₂-Emissionen von Primärrohstoffen (virgin):⁹⁴

93 ETA (2024), S. 2f, https://expertenkreis-automobilwirtschaft.de/media/pages/home/a934fbc55f-1706107043/expertenkreis-transformation-automobilwirtschaft_kurzpapier_innovationen_bei_rohstoffen_final_20240119.pdf.

94 Breiter, Andreas et al. (2023), Battery recycling takes the driver's seat, 13.03.2023, <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/battery-recycling-takes-the-drivers-seat>.

With about four times lower emissions than virgin materials, recycled materials reduce the carbon footprint.

Total CO₂e battery cell production emissions from a nickel-based lithium-ion battery with virgin versus recycled materials,¹ kgCO₂e per kWh



¹United States, 2023 Q1.

²Assuming mechanical pre-treatment and hydrometallurgical recycling.
Source: McKinsey Battery Insights

Nach Angaben von Breiter et al. (2023) ermöglichte der technologische Fortschritt der Recyclingverfahren höhere Rückgewinnungsraten, geringere Treibhausgasemissionen und eine bessere Wirtschaftlichkeit. Darüber hinaus förderten staatliche Forschungs- und Innovationsprojekte wie z. B. die European Battery Alliance den Fortschritt der Recyclingtechnologie und sähen die Profitabilität in Sichtweite.⁹⁵ In der Schweiz sei laut Bianchetti et al. (2023a) das Recycling derzeit nicht profitabel. Hohe Anforderungen im Bereich Sicherheit, Überwachung und Umwelt- und Gesundheitsvorschriften führten zu hohen Kosten. Diese überstiegen die Erträge und fielen meist höher aus als die Kosten für die Primärrohstoffe.⁹⁶

Dai (2023) zufolge trägt Recycling von Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid (NCM)-Batterien dazu bei, die Umweltauswirkungen im Vergleich zur Virginproduktion zu reduzieren, unabhängig von der Technologie, wobei die Grafik deutlich zeigt, dass direktes Recycling mit 29 Prozent gefolgt von pyrometallurgischem Recycling mit 70 Prozent und hydrometallurgisches Recycling mit 75 Prozent geringere Umweltauswirkungen hat als Primärproduktion (100 Prozent):⁹⁷

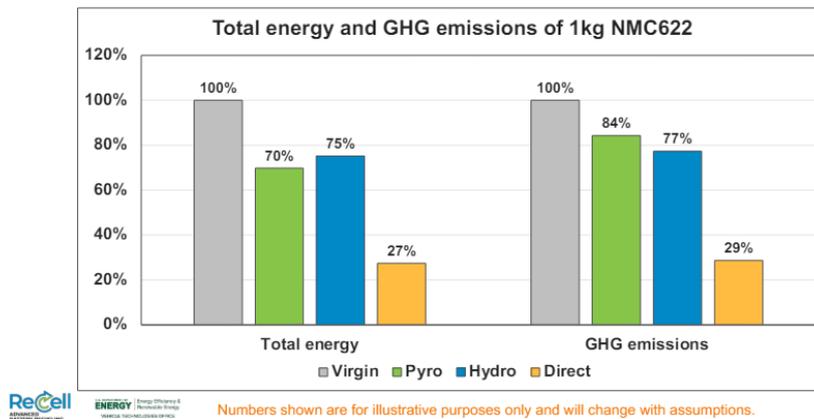
95 Breiter, Andreas et al. (2023), Battery recycling takes the driver's seat, 13.03.2023, <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/battery-recycling-takes-the-drivers-seat>.

96 Bianchetti, Roberto et al. (2023a), S. 13, <https://www.news.admin.ch/newsd/message/attachments/77017.pdf>.

97 Dai, Qiang (2023), EverBatt: Cost and Environmental Impacts of Battery Recycling, ARPA-E Workshop: Circular Economic Materials, Design, and Manufacturing of Rechargeable Batteries, 13.06.2023, https://arpa-e.energy.gov/sites/default/files/12_DAY2-DAI-FIRESIDE-2_Granted.pdf.

Comparison of Environmental Impacts

Recycling helps reduce environmental impacts compared with virgin production, regardless of technology.



Vekić, Nicola (2020) befasst sich mit dem CO₂-Fußabdruck des Recyclings:

Vekić, Nicola (2020), Lithium-Ionen-Batterien für die Elektromobilität: Status, Zukunftsperspektiven, Recycling, S. 41 bis 44, <https://sgt.agw.kit.edu/downloads/Publikationen/Think%20Tank/Lithium-Ionen-Batterien%20f%C3%BCr%20die%20Elektrom.pdf>.

Neef et al. (2021) betonen, dass der Einsatz von Sekundärrohstoffen aus dem Recycling den ökologischen Fußabdruck der Batterieherstellung insgesamt verringern könne, u. a. weil die Konzentration der zu gewinnenden Metalle in der Batterierecyclingmasse im Vergleich zu Erzen an Energie- und Materialeffizienz deutlich höher sei und die Umweltauswirkungen in den Abbaugebieten reduziert würden.⁹⁸

7. Ausgewählte Studien zu den Auswirkungen des Batterierecyclings auf die Umwelt

Laut Fraunhofer ISI (2020) sei die **Datenlage** zur **Umweltbewertung der Recyclingprozesse** von E-Autobatterien **sehr begrenzt**.⁹⁹

98 S. 11, <https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/6bdb1c34-a6a9-40dd-a9f9-33f4527c10ca/content>.

99 Thielmann, Axel et al. (2020), Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungsbedarf Sind Batterien für Elektroautos der Schlüssel für eine nachhaltige Mobilität der Zukunft?, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, S. 22, <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2020/Faktencheck-Batterien-fuer-E-Autos.pdf>.

7.1. Costa et al. (2021)

Costa et al. (2021)¹⁰⁰ weisen darauf hin, dass Lithium (Li) in Gewässern in Abhängigkeit von der lokalen Geologie und Topographie in unterschiedlichen Konzentrationen natürlich vorkomme und es das vierzehnthäufigste Element im Meerwasser sei. Auch im Boden komme es in Spuren vor – in Abhängigkeit von der lokalen Geologie und Topographie.

Lithium-Ionen-Batterien (LIBs) seien durch Mobiltelefone, Tablets, Laptops und viele andere elektronische Geräte allgegenwärtig. Ihre steigende Nachfrage, die vor allem auf die Einführung von Elektrofahrzeugen zurückzuführen sei, bringe verschiedene Umweltprobleme mit sich, die mit dem Abbau, der Gewinnung und der Reinigung von knappen Materialien wie Kobalt, Nickel und Lithium zusammenhängen.

Die meisten Batteriezellen enthielten zum Zeitpunkt ihrer Entsorgung noch mehr als 80 Prozent ihrer ursprünglichen Kapazität und seien daher keineswegs unbrauchbar. Am Ende ihrer Lebensdauer könnten sie aber zerlegt werden, um die wertvollen Komponenten zurückzugewinnen. In dieser Phase werde der Zustand der Batterien neu bewertet, um über das am besten geeignete Recyclingverfahren zu entscheiden. Die wichtigsten Optionen seien die so genannten pyro- und hydrometallurgischen Verfahren und das direkte Recycling. Pyro- und hydrometallurgische Verfahren zielten darauf ab, die in den Batterien verwendeten Rohstoffe, insbesondere die Metalle, zurückzugewinnen, um sie für die Herstellung neuer Batteriezellen oder sogar für andere Anwendungen, die dieselben Metalle benötigten, wiederzuverwenden. Dieser Weg ermögliche hohe Metallrückgewinnungsraten (über 90 Prozent), erfordere jedoch einen hohen Energie- und Gefahrstoffverbrauch sowie mehrere Verfahrensschritte. Direktes Recycling sei die umweltfreundlichere Methode, da der Verbrauch gefährlicher Stoffe und der Gesamtenergieverbrauch geringer sei. Dieser Ansatz führe jedoch zu einer geringeren Batterieleistung. Im Hinblick auf den Umweltschutz müsse das Hauptziel darin bestehen, die Deponierung zu reduzieren, indem Anreize für die Zweitverwendung von Batterien geschaffen und Recyclingstrategien für die Zeit nach dem Ende der Batterielebensdauer (EoL) angewendet würden.

Die am gründlichsten untersuchte Recyclingmethode sei die **hydrometallurgische**, insbesondere mit Säurelaugungsverfahren. Sie führten zwar zu hohen Rückgewinnungsraten, könnten aber aufgrund der am Prozess beteiligten **Chemikalien umweltschädlich** sein. Im Gegensatz dazu arbeiteten **pyrometallurgische** Verfahren mit hohen Temperaturen und seien in der Regel mit hohen **Emissionen in die Atmosphäre** verbunden. In einigen Fällen sei es am effizientesten, pyro- und hydrometallurgische Verfahren zu kombinieren, was hohe Rückgewinnungsraten für die verschiedenen Materialien ermögliche und die Recyclingeffizienz des gesamten Prozesses maximiere.

Zu den künftigen Trends gehöre die **Erforschung von Rückgewinnungsverfahren** bei Raumtemperatur, die wahrscheinlich die energieintensiveren pyrometallurgischen Verfahren ersetzen. Hydrometallurgische Verfahren zielten darauf ab, weniger gefährliche Stoffe, wie organische und biologisch abbaubare Säuren, zu verwenden, um die Umweltbelastung zu verringern. In jüngster

100 Gekürzt und mit Unterstützung von KI übersetzt. Costa, C. M. et al. (2021), Recycling and environmental issues of lithium-ion batteries: Advances, challenges and opportunities, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405829721000829>.

Zeit sei über bedeutende Fortschritte in diesem Bereich berichtet worden. Hauptziele sollten vorrangig die Wiederverwendung von Batterien, dann die Refunktionalisierung der verbrauchten Materialien und erst danach die Rückgewinnung von Rohstoffen sein. Dieser Ansatz werde es ermöglichen, das volle Potenzial jeder Batteriekomponente vor ihrer Wiederverwandlung auszuschöpfen, was eine Verringerung der kostspieligeren Verarbeitungsschritte ermögliche.

Eines der Probleme beim Recycling von LIBs sei die große **Vielfalt der Zellkonzepte** in Bezug auf Materialien und Konstruktion. Diese Vielfalt erschwere die Entwicklung eines gültigen „**universellen**“ **Recyclingverfahrens**. Vielleicht sei dies einer der Bereiche, in denen die Gesetzgebung die angemessene Entsorgung und das Recycling von LIBs unterstützen und fördern könne. Es sei wichtig, einen einheitlichen Weg für die Vereinheitlichung der Produktion und Verarbeitung von LIBs zu schaffen, was die späteren Phasen des Recyclings und der Wiederverwendung vereinfachen könne, wenn die **Struktur und Form** der Batterien in allen Fällen **ähnlich** seien.

Wirtschaftsakteure müssten in der Lage sein, die richtigen Anreize zu finden, um die Batterielieferkette zu einem geschlossenen Kreislauf umzugestalten oder umzubauen. Es könnten umweltfreundlichere Materialien und Verfahren eingesetzt werden. In diesem Sinne seien die Methoden der Lebenszyklusanalyse ein hervorragendes Bewertungsinstrument.

Der Abbau und die Reinigung von knappen Metallen wie Kobalt, Nickel und Lithium seien auch weiterhin notwendig. Das Recycling könne jedoch die Umwelt schützen, indem es als Puffer für die Nachfrage nach Rohstoffen natürlichen Ursprungs diene. Daher werde das Recycling von LIBs in den kommenden Jahren eine entscheidende Rolle bei der Deckung eines erheblichen Teils des Lithiumbedarfs spielen.

7.2. Mrozik et al. (2021)

Mrozik et al. (2021)¹⁰¹ ermittelten die derzeitigen, möglichen und wahrscheinlichen Abfallentsorgungspraktiken für LIBs – von der Sammlung und Wiederverwertung bis zur Deponierung und zur illegalen Entsorgung. Laut Mrozik et al. sei derzeit die Deponierung die gängigste Praxis, aber der Anteil des Recyclings nehme zu. Bei den einzelnen End-of-Life (EoL)-Verfahren seien Brand- und Explosionsereignisse derzeit die häufigsten Ereignisse, die durch reale Vorfälle belegt seien. Auslaugung sei ein weiterer Verschmutzungspfad, der in Zukunft mit dominieren werde. Zu weiteren identifizierten Gefahren gehörten Dämpfe und Gase, die aus LIBs freigesetzt wurden (z. B. Flusssäure (HF) oder Cyanwasserstoff (HCN)), Metallnanooxide (z. B. LMO, NMC), Abbauprodukte des Elektrolyten (Alkylfluorophosphate) und mögliche Spuren von Zusatzstoffen. Diese Schadstoffe könnten in den Boden, das Wasser (Grundwasser) und die Luft freigesetzt werden, je nach Recyclingverfahren. Freigesetzte Schadstoffe könnten eine ernsthafte Bedrohung für Wildtiere und Menschen darstellen und hätten oft unmittelbare Auswirkungen, wie z. B. bei Kontakt mit HF während eines Fahrzeugbrandes. Die Zersetzung des Batterieinhalts (insbesondere des Elektrolyts) könne in einigen Fällen zur Entstehung von Chemikalien führen, die strukturell chemischen Kampfstoffen ähnelten. Die ersten Studien zur (Öko-)Toxizität der Kathoden-Nanomaterialien zeigten, dass LIBs eine Gefahr für lebende Organismen und die menschliche Gesundheit

101 Gekürzt und mit Unterstützung von KI übersetzt. Mrozik, Wojciech et al. (2021), Environmental impacts, pollution sources and pathways of spent lithium-ion batteries, <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2021/ee/d1ee00691f>.

darstellen könnten. Der Ersatz toxischer Metalle (Kobalt und Nickel) durch weniger toxische Stoffe könnte jedoch die Umweltverträglichkeit und Nachhaltigkeit der nächsten Generation von Lithiumbatteriematerialien verbessern. Die Autoren identifizierten mehrere dringende Wissenslücken, die geschlossen werden müssten, um die negativen Auswirkungen von LIBs auf die Umwelt zu verringern, und empfahlen einige Maßnahmen zur Lösung dieser Probleme.

7.3. Wang et al. (2022)

Laut Wang et al.¹⁰² gebe es eine **Wissenslücke** bei der Bewertung der **Umweltauswirkungen** der verschiedenen Entsorgungswege für E-Auto-LIBs in China. Die Autoren untersuchten die Herstellung von **Lithium-Eisen-Phosphat (LFP)**-Autobatterien von der Nutzung bis hin zum Recycling, um eine Analyse der Umweltauswirkungen von der „Wiege bis zur Bahre“ durchzuführen. Um den Umweltnutzen der End-of-Life (EoL)-Phase für LFP-Batterien zu untersuchen, seien zwei EoL-Management-Szenarien betrachtet worden. Das erste Szenario kombinierte die Zweitverwertung mit dem Batterierecycling, während im zweiten Szenario die ausgemusterten E-Autobatterien direkt nach der Nutzung recycelt wurden. Die Ergebnisse zeigten, dass die **Zweitverwendung** gebrauchter LFP-Batterien in Energiespeichersystemen die Netto-Umweltauswirkungen des LIB-Lebenszyklus, insbesondere im Hinblick auf die Erschöpfung fossiler Brennstoffe, wirksam reduzieren könne. Würde die Nutzungsdauer der Sekundärnutzung von einem Jahr auf 10 Jahre erhöht, erhöhe sich der Umweltnutzen in den verschiedenen Wirkungskategorien um das 0,24- bis 4,62-fache. Im Szenario des **direkten Recyclings** könnten durch das Recycling gebrauchter LFP-Batterien mehr als 30 Prozent der Metallressourcen eingespart werden. Im Vergleich dazu stellten die Autoren fest, dass das Recycling von **Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid (NCM)**-Batterien für alle Wirkungskategorien einen **größeren Umweltnutzen** hatte als das Recycling von LFP-Batterien. Betrachte man die Umweltvorteile in der EoL-Phase, so würden die meisten Umweltauswirkungen über den gesamten Lebenszyklus wahrscheinlich ausgeglichen oder sogar positiv sein, wenn mehr als 50 Prozent der Gerätebatterien nach ihrer Entsorgung in Energiespeichersystemen wiederverwendet werden könnten.

7.4. Rensmo et al. (2023)

Laut Rensmo et al. (2023)¹⁰³ sei relativ **wenig** über die **Umweltrisiken des Lithiumrecyclings** bekannt, insbesondere im Hinblick auf die Emission von persistenten (in)organischen Fluorchemikalien wie per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS)⁽¹⁰⁴⁾. Die Autoren gehen davon aus, dass das derzeit am weitesten verbreitete Recyclingverfahren für Lithium, die **Pyrometallurgie**, die bei hohen Temperaturen von bis zu 1600 °C arbeite, ausreiche, um PFAS zu **mineralisieren**. Die **Hydrometallurgie**, ein zunehmend beliebter alternativer Recyclingansatz, benötige jedoch

102 Gekürzt und mit Unterstützung von KI übersetzt. Wang, Yixuan et al. (2022), Environmental impact assessment of second life and recycling for LiFePO₄ power batteries in China, Journal of Environmental Management, Volume 314, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115083>.

103 Gekürzt und mit Unterstützung von KI übersetzt. Rensmo, Amanda et al. (2023), Lithium-ion battery recycling: a source of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) to the environment?, <https://pubs.rsc.org/en/content/articlepdf/2023/em/d2em00511e>.

104 PFAS sind chemisch und thermisch sehr stabil und werden deshalb als „Ewigkeitschemikalien“ bezeichnet. Vgl. <https://www.bmu.de/faqs/per-und-polyfluorierte-chemikalien-pfas#:~:text=PFAS%20sind%20wasser%2D%2C%20fett%2D,Textilien%20oder%20Ski%2DWachsen%20eingesetzt>.

geringere Temperaturen von unter 600 °C, was einen **unvollständigen** Abbau und/oder die Bildung und Freisetzung persistenter fluorierter Stoffe begünstigen könne. Die Autoren betonen die Notwendigkeit, die Emissionen fluorierter Stoffe während des LIB-Recyclings weiter zu untersuchen, und schlagen vor, dass der Ersatz von PFAS-basierten Materialien (d. h. während der Herstellung) oder alternativ Nachbehandlungen und/oder Änderungen der Prozessbedingungen erforderlich sein könnten, um die Bildung und Emission persistenter fluorierter Stoffe zu vermeiden.

7.5. Guelfo et al. (2023)

Nach Angaben von Guelfo et al. (2023)¹⁰⁵ zeige die Studie zum ersten Mal die globale und bisher unerkannte Freisetzung neuartiger, **LiB-assoziierter PFAS** (Bis-Perfluoralkyl-Sulfonimide (Bis-FASIs), insbesondere Bis(trifluormethylsulfonyl)imid (Bis-FMeSI)) in Boden, Sediment und Oberflächenwasser in der Nähe von Produktionsgebieten. Toxizitätsdaten zeigten, dass Bis-FMeSI das Verhalten und die grundlegenden Energiestoffwechselprozesse **aquatischer Organismen** bereits bei niedrigen Werten verändern könne, was darauf hindeute, dass selbst relativ niedrige Konzentrationen für aquatische Wirbeltiere und wirbellose Tiere bedenklich sein könnten. Darüber hinaus werde die Verwendung von Bis-FMeSI und anderen PFAS in LiB-haltigen Konsumgütern zu Umweltverschmutzung bei der Entsorgung am Ende des Lebenszyklus führen (z. B. auf Hausmülldeponien). Schließlich stellten Bis-FASIs aufgrund ihrer Unbeständigkeit und Löslichkeit ähnliche Herausforderungen an die Behandlung wie andere PFAS, obwohl adsorptive Behandlungsverfahren, die für die Entfernung von PFOA [Perfluorooctansäure] und PFOS [Perfluorooctansulfonsäure] entwickelt wurden, auch Bis-FASIs **vor aussichtlich wirksam entfernen** könnten. Im Allgemeinen seien die Herausforderungen im Zusammenhang mit dem Auftreten, der Mobilität, der Toxizität und der Widerstandsfähigkeit von Bis-FASI ähnlich wie bei anderen PFAS. Allerdings sei das Potenzial für eine fortlaufende und zunehmende Freisetzung von Bis-FASI aufgrund der exponentiell steigenden Nachfrage nach LiBs einzigartig. Ohne Änderungen der Herstellungs-, Verwendungs-, Entsorgungs- und Aufbereitungspraktiken würden die Konzentrationen von Bis-FASI im Boden, im Grundwasser, in Oberflächengewässern, in Abwasser-rückständen und im Sickerwasser von Deponien wahrscheinlich ansteigen, mit den damit verbundenen Belastungen von Menschen und Umwelt. Es sei wichtig zu betonen, dass Bis-FASIs derzeit weltweit **nicht reguliert** seien, so dass es an regulatorischen Faktoren fehle, die die notwendigen Veränderungen zur Minderung dieser Expositionen bewirken könnten.

7.6. Smical et al. (2023)

Smical et al. (2023)¹⁰⁶ weisen darauf hin, dass in vielen Ländern, insbesondere in Schwellen- und Entwicklungsländern, Geräte-Altballerrien nicht effizient und selektiv gesammelt würden. Daher lande ein nicht unerheblicher Teil auf **Mülldeponien**. Auf diesen Deponien könnten Altballerrien mit verschiedenen flüssigen Umgebungen in Kontakt kommen, entweder mit Sickerwasser oder mit Oberflächenwasser, wo sie im Laufe der Zeit korrodierten. Unter diesen Bedingungen

105 Gekürzt und mit Unterstützung von KI übersetzt. Guelfo, Jennifer et al. (2023), The dirty side of clean energy: Lithium ion batteries as a source of PFAS¹⁰⁵ in the environment, <https://assets-eu.researchsquare.com/files/rs-3150504/v1/393cfa2a-30fa-4aaa-abb9-444372503371.pdf?c=1690930776>.

106 Smical, Irina et al. (2023), The Influence of Spent Portable Battery Waste on the Aquatic Environment, <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/21/11658>.

könnten Metalle und andere gefährliche Bestandteile dieser Batterieabfälle freigesetzt werden. **Schwermetalle** in Gewässern stellten eine **Gefahr für die aquatische Umwelt** und die menschliche Gesundheit dar. Es habe sich gezeigt, dass Altbatterien Gewässer mit Schwermetallen verunreinigen könnten. Aus diesem Grund sei es wichtig, dass gebrauchte Batterien gesammelt und recycelt würden. Die Autoren stellten fest, dass der Batterietyp und die Art des Metalls den Mechanismus des Metallaustrags in die aquatische Umwelt beeinflussten. Die Autoren sehen weiteren Forschungsbedarf.

7.7. Barbosa et al. (2023)

Barbosa et al. (2023)¹⁰⁷ analysierten 61 Studien über Lithium in der Meeres- und Küstenumwelt. Die Autoren stellen fest, dass es an einer kontinuierlichen Bewertung des Lithiumvorkommens in **marinen Systemen** mangle, was die Notwendigkeit unterstreiche, spezifische **Überwachungsprogramme** zu implementieren, um die Entwicklung von Lithium über Raum und Zeit zu bewerten. Andererseits habe Lithium nachweislich schädliche **Auswirkungen auf die Meeres- und Ästuarbiota**¹⁰⁸. Die Auswirkungen auf die Nahrungskette sowie auf die Erhaltung der Tierwelt und folglich auch auf die menschliche Gesundheit seien jedoch noch nicht ausreichend bekannt. Daher trage die Übersicht zum Verständnis der Auswirkungen von Lithium bei und könne weitere Untersuchungen zu diesem Thema anregen.

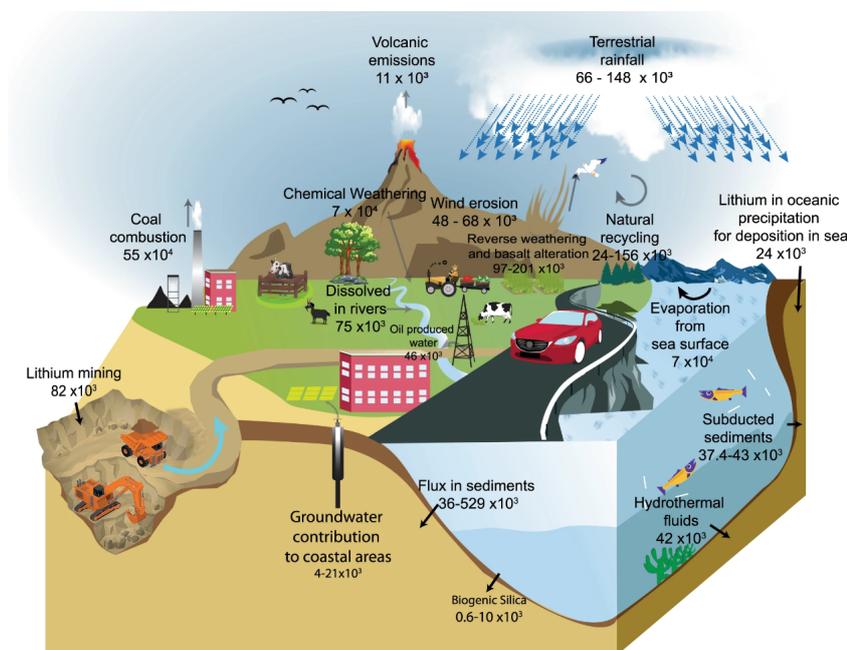
7.8. Adeel et al. (2023)

Die folgende Abbildung aus Adeel et al. (2023)¹⁰⁹ zeigt weitere natürliche und künstliche Lithium-Eintragspfade in Umweltkompartimente des globalen Li-Kreislaufs:

107 Barbosa, Helena et al. (2023), Lithium: A review on concentrations and impacts in marine and coastal systems, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969722064737>.

108 „Ästulare sind die Mündungsbereiche großer Flüsse ins Meer. Sie sind der von Ebbe und Flut beeinflusste Übergang vom Süßwasser des Flusses ins Salzwasser des Meeres. Im Durchmischungsbereich von Süß- und Salzwasser, in der Brackwasserzone, leben zum Teil hoch spezialisierte Arten, die nur in diesem begrenzten Bereich überleben können.“, <https://www.wwf.de/themen-projekte/meere-kuesten/schutz-der-kuesten/aestuarie>.

109 Adeel, Muhammad et al. (2023), Global navigation of Lithium in water bodies and emerging human health crisis, <https://www.nature.com/articles/s41545-023-00238-w>.



Seit seiner Entdeckung im Jahr 1970 sei Lithium (Li) als Therapeutikum z. B. gegen Depressionen verschrieben worden. In jüngerer Zeit finde Li in verschiedenen Industriezweigen Verwendung insbesondere in elektronischen Geräten. Dies führe zu einer Li-Konzentration im Oberflächen- und Trinkwasser, die je nach geografischer Lage stark schwanke und eine große Gefahr für die Umwelt und die öffentliche Gesundheit darstelle. Aktuelle Studien belegten beispielsweise einen hohen Li-Gehalt im Grundwasser Pakistans, Südostirlands oder in den Vereinigten Staaten. Li spiele für die menschliche Gesundheit eine zweiseitige Rolle: Liaugaudaite et al. berichten über eine geringere Selbstmordrate bei hohen Li-Konzentrationen im Trinkwasser von Litauen. Harari et al. führten eine Studie an 178 schwangeren Frauen in Argentinien durch und stellen fest, dass ein erhöhter Li-Gehalt im Trinkwasser die Kalziumhomöostase während der Schwangerschaft störe. In Anbetracht der jüngsten Unklarheiten in der Literatur bestehe ein dringender Bedarf, die Akkumulation von Li in Trinkwasserquellen im Hinblick auf seine positive oder schädliche Wirkung auf die menschliche Gesundheit aufzudecken. Obwohl umfangreiche Daten über die Akkumulation von Li in der Nahrungskette vorlägen, dokumentierten nur wenige Studien die potenziellen Auswirkungen einer chronischen Exposition gegenüber Li über die Wasseraufnahme. Obwohl Li ein nützliches Element für den menschlichen Körper sein könne, dürfe seine toxikologische Wirkung in hohen Dosen nicht vernachlässigt werden. Hohe Li-Konzentrationen in Gewässern und Leitungswasser aufgrund der Verschmutzung durch Li-Batterien führten zu Toxizität für menschliche Herzmuskelzellen. Eine geringe Recyclingrate von Li führe letztendlich zu Li in unseren Gewässern durch anthropogene Ressourcen. Gegenwärtig gebe es keine gesetzlichen Normen von Gesundheitsorganisationen für den sicheren Li-Gehalt im Trinkwasser. Die Autoren schlussfolgern, dass nachhaltige Anwendungen von Li und ein **ordnungsgemäßes**

Recycling die besten Ansätze für eine sichere Handhabung und Nutzung der Li-Ressourcen seien.¹¹⁰

7.9. Abdelkareem et al. (2023)

Abdelkareem et al. (2023)¹¹¹ erörtern die von Batterien ausgehenden Risiken für die menschliche Gesundheit und die Umwelt und verweisen u. a. auf Kumar et al. (2022)¹¹², die die Auswirkungen der **Bleiverschmutzung** durch eine **Recyclinganlage** für Bleibatterien in **Bangladesch** untersuchten und die Konzentrationen in den Böden, Nutzpflanzen und Wasserströmen maßen. Sie stellten fest, dass die anthropogenen Aktivitäten in der Fabrik die Hauptquelle für die überhöhten Metallkonzentrationen waren, die in den Böden in der Nähe, in Nahrungsmittelpflanzen und in Grundwasserproben gefunden wurden, wo die Konzentrationen die vorläufigen Richtwerte der Weltgesundheitsorganisation (WHO) überschritten.

7.10. Gutsch/Leker (2024)

Nach Angaben der Pressemitteilung des Forschungszentrums Jülich reduziert Batterierecycling deutlich sowohl die Kosten als auch die Umweltbelastung.¹¹³ Die Pressemeldung bezieht sich hierbei auf die Studie von

Gutsch, Moritz; Leker, Jens (2024), Costs, carbon footprint, and environmental impacts of lithium-ion batteries – From cathode active material synthesis to cell manufacturing and recycling, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261923014964>.

Gutsch/Leker (2024) zufolge, gebe es bislang nur wenige Forschungsarbeiten, die gleichzeitig wirtschaftliche und ökologische Bewertungen für die Produktion und das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien vornähmen. Die mit dem **hydrometallurgischen Recyclingprozess** verbundenen Kosten und **Umweltbelastungen** seien **im Vergleich zu den Vorteilen gering**. Die Verwendung von kohlenstoffarmer Energie während des gesamten Zellherstellungsprozesses trage dazu bei, das Treibhauspotenzial zu senken. Die allgemeinen Umweltauswirkungen könnten auf diese Weise jedoch nicht verringert werden. Um die kombinierten Umweltauswirkungen zu verringern, seien niedrige Ausschussraten und Recycling entscheidend.¹¹⁴

110 Adeel, Muhammad et al. (2023), Global navigation of Lithium in water bodies and emerging human health crisis, <https://www.nature.com/articles/s41545-023-00238-w>.

111 Abdelkareem, Mohammad Ali et al (2023), Environmental aspects of batteries, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772737823000287#>.

112 Kumar, Sazal et al. (2022), Lead and other elements-based pollution in soil, crops and water near a lead-acid battery recycling factory in Bangladesh, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653521037620>.

113 <https://www.fz-juelich.de/de/aktuelles/news/meldungen/2024/batterierecycling-reduziert-kosten-und-umweltbelastung-deutlich>.

114 Gutsch, Moritz; Leker, Jens (2024), Costs, carbon footprint, and environmental impacts of lithium-ion batteries – From cathode active material synthesis to cell manufacturing and recycling, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261923014964>.

8. Pfandsysteme und weitere Handlungsempfehlungen

Nach Angaben der Bundesregierung sei auch ein Pfand auf **Geräte-Alt Batterien** im Rahmen der Verhandlungen der **VO (EU) 2023/1542** erwogen worden, sei jedoch letztlich von der Europäischen Kommission, dem Europäischen Parlament und dem Rat nicht aufgenommen worden. Der zukünftige Rechtstext enthalte jedoch einen Passus, der die Europäische Kommission zu einer **Prüfung eines möglichen Pfandsystems bis Ende 2027** verpflichte:¹¹⁵

„Die Kommission beurteilt bis zum 31. Dezember 2027 die Durchführbarkeit und die potenziellen Vorteile der Einrichtung von Pfandsystemen für Batterien, insbesondere für Allzweck-Gerätebatterien.“¹¹⁶

Die Deutsche Umwelthilfe (DUH) fordert, **Anreize** für Pfandsysteme zu schaffen¹¹⁷ und kritisiert den vom Bundesumweltministerium vorgelegten Entwurf zur Novelle des Elektroggesetzes vom 02.05.2024. Die DUH fordert u. a. ein **Pfand auf Lithium-Ionen-Batterien**, um die Brandgefahr durch unsachgemäße Entsorgung zu bannen.¹¹⁸

Des Weiteren dringt die DUH darauf, die gesetzlichen Vorgaben so zu gestalten, dass Akkus gegenüber Primärbatterien bevorzugt werden. Dies wäre z. B. durch eine Abgabe auf Primärbatterien möglich. Zudem sollten Akkus möglichst in **Standardformaten** zum Einsatz kommen, damit sie flexibel im Haushalt eingesetzt werden könnten.¹¹⁹

Der Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Kreislaufwirtschaft (BDE) wünscht für Batterien ab einer **Spannung von 9 Volt** ein **Pfand** in Höhe von 50 Euro.¹²⁰

Der Expertenkreis Transformation der Automobilwirtschaft (ETA) fordert, die Demontierbarkeit von Batteriezellen für Reparatur und abschließendes Recycling zu fördern und **negative**

115 Antwort der Bundesregierung auf die Schriftliche Anfrage Nr. 170, 14.07.2023, <https://dserver.bundestag.de/btd/20/077/2007751.pdf>.

116 Art. 63 der VO (EU) 2023/1542.

117 Stellungnahme der Deutschen Umwelthilfe zur Überarbeitung des Batteriegesetzes (Batteriegesetz (BattG) zuletzt geändert am 3.11.2020 und in Kraft getreten am 1.1.2021 wird schrittweise bis zum 18. Februar 2024 von der europäischen EU-Batterieverordnung abgelöst), https://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Projektinformation/Kreislaufwirtschaft/Batterien/240311_DUH_Stellungnahme_BattG_2023_FINAL.pdf.

118 DUH (2024), Novelle des Elektroggesetzes: Deutsche Umwelthilfe kritisiert Gesetzentwurf als ambitionslos und fordert Ausweitung der Sammelpflichten sowie Vorgaben zur Wiederverwendung, 03.05.2024, <https://www.duh.de/presse/pressemitteilungen/pressemitteilung/novelle-des-elektroggesetzes-deutsche-umwelthilfe-kritisiert-gesetzentwurf-als-ambitionslos-und-ford/>.

119 Stellungnahme der Deutschen Umwelthilfe zur Überarbeitung des Batteriegesetzes (Batteriegesetz (BattG) zuletzt geändert am 3.11.2020 und in Kraft getreten am 1.1.2021 wird schrittweise bis zum 18. Februar 2024 von der europäischen EU-Batterieverordnung abgelöst), S. 7, https://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Projektinformation/Kreislaufwirtschaft/Batterien/240311_DUH_Stellungnahme_BattG_2023_FINAL.pdf

120 BDE (2023), UBA-Studie bestätigt: Batteriepfand verringert Brandrisiko in Entsorgungsbetrieben, 14.07.2023, <https://www.bde.de/presse/batteriepfand-bde-erneuert-forderung/>.

Umweltwirkungen der **Primärrohstoff**gewinnung und -verarbeitung mit einem angemessenen Grenzausgleich zu bepreisen.¹²¹

DLR/Fraunhofer IPA (2020) fordern ebenfalls **Pfandsysteme und Leasingmodelle**, da diese die Rückführung von EoL-Batteriesystemen zu den Herstellern bzw. zu möglichen Vertragspartnern aus dem Bereich Recycling/Remanufacturing fördern. Die Wahl der Pfandhöhe sei hierbei als Balanceakt zu verstehen. Während sie ausreichend hoch sein müssten, um eine Motivation zur Rückführung darzustellen, führe ein zu hohes Pfand möglicherweise zu einem für Konsumenten inakzeptablen Preisanstieg des Batteriesystems. Durch die Festlegung von Eigentumsfragen und Verantwortlichkeiten über den gesamten Produktlebenszyklus hinaus, könne eine solche Entwicklung von der öffentlichen Hand gefördert werden.¹²²

Im Juni 2021 gaben Bittner et al. (2021) vom Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI folgende Handlungsempfehlungen. Einige davon warten noch auf Umsetzung:¹²³

121 ETA (2024), Kurzpapier zu Innovationen bei Förderung, Substitution, Nutzung und Recycling von Rohstoffen, S. 6f, https://expertenkreis-automobilwirtschaft.de/media/pages/home/a934fbc55f-1706107043/expertenkreis-transformation-automobilwirtschaft_kurzpapier_innovationen_bei_rohstoffen_final_20240119.pdf.

122 S. 133f, https://www.ipa.fraunhofer.de/content/dam/ipa/de/documents/Kompetenzen/Nachhaltige-Produktion-und-Qualitaet/Endbericht_KSBS_offen.pdf.

123 Juni 2021, <https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/9efc8e14-807a-432a-a715-6235c718ab0e/content>.

Zusammenfassung

Handlungsempfehlungen Politik



9. Recyclingunternehmen für Lithium

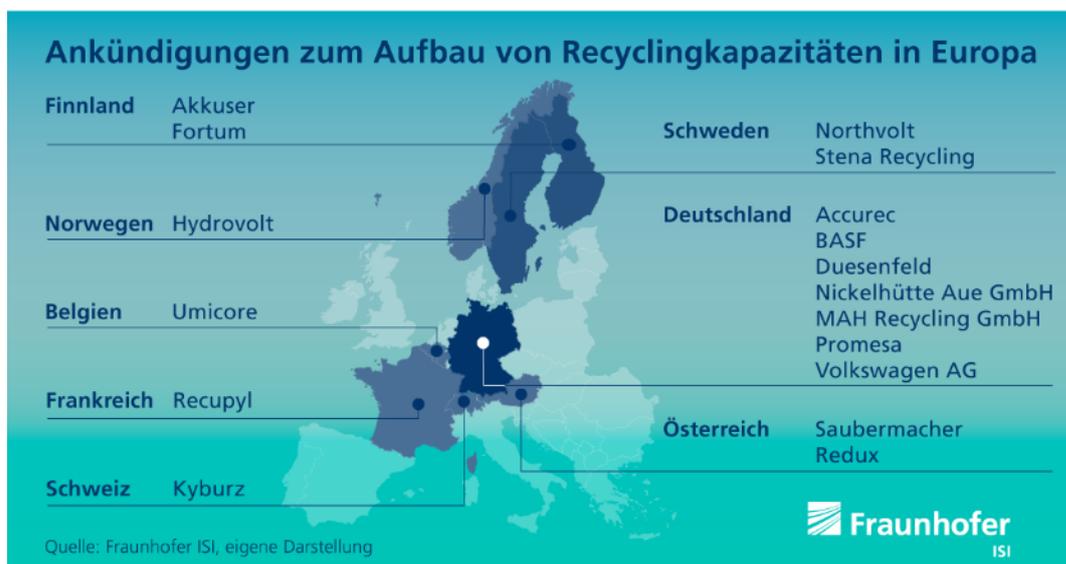
Nach Angaben von Heimes et al. (2022) gebe es noch keine standardisierte Prozesskette für das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien (LIB), die sich am Markt etabliert habe. Die Batteriekapazitäten stiegen, aber viele der bestehenden Recyclingunternehmen recycelten nur bis zur Schwarzmasse¹²⁴. Bei den in Europa angekündigten Recyclingkapazitäten, gemessen am Batterievolumen, handle es sich noch überwiegend um Pilotanlagen, die in naher Zukunft aufgestockt werden müssten.¹²⁵ Laut CHEManager¹²⁶(2023) kümmere sich derzeit nur eine geringe Zahl von Unternehmen um das Recycling von Altbatterien. Während sich die industrielle Umsetzung der LIB-Recyclingtechnologie noch in einem relativ frühen Stadium befinde, würden von Forschungseinrichtungen, wie z. B. dem Karlsruher Institut für Technologie – KIT, ständig neue technische Entdeckungen und Verbesserungen gemacht und immer mehr Recyclingunternehmen

124 Siehe Fn. 88.

125 Heimes, Heiner et al. (2022), Battery Atlas 2022, Shapping the European Lithium-Ion Battery Industry, https://www.pem.rwth-aachen.de/global/show_document.asp?id=aaaaaaaaabpjuwfi.

126 CHEManager gehört zum Chemieverlag Wiley-VCH GmbH und ist eine Fach- und Wirtschaftszeitung für das Management in der chemischen und pharmazeutischen Industrie., <https://www.chemanager-online.com/en/about-us>.

nähmen die Herausforderung einer wirtschaftlichen Umsetzung an.¹²⁷ Die folgende Grafik von Neef et al. (2021) zeigt den geplanten Ausbau der Recyclingkapazitäten in Europa:¹²⁸



Aktuell werden Batterie-Recycling-Start-ups gegründet und gefördert, u. a. auch Start-ups, die Rohstoffe aus der Schwarzmasse extrahieren.¹²⁹

10. Podcasts

Buchert, Matthias (2021), Batterierecycling, Podcast über Kreislaufwirtschaft bei Batterien, <https://www.postlithiumstorage.org/de/news-events/podcasts/folge8-1-1>.

127 CHEManager (2023), Batterie-Recycling-Technologien – Verfahren, Trends und Marktchancen, Wie weit ist das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien entwickelt, 05.03.2023, <https://www.chemanager-online.com/news/batterie-recycling-technologien-verfahren-trends-und-marktchancen>.

128 Neef, Christoph et al. (2021), Recycling von Lithium-Ionen-Batterien: Chancen und Herausforderungen für den Maschinen- und Anlagenbau, Kurzstudie im Auftrag der IMPULS-Stiftung (Stiftung für den Maschinenbau, den Anlagenbau und die Informationstechnik), Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, November 2021, S. 16, <https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/6bdb1c34-a6a9-40dd-a9f9-33f4527c10ca/content>.

129 <https://www.exzellenz-start-up-center.nrw/aktuelles/news/2024/start-up-der-rwth-aachen-erhaelt-55-millionen-euro>; <https://www.exzellenz-start-up-center.nrw/start-ups/start-up-talk/interview-mit-paul-sabarny-und-lilian-schwich-gruendungsteam-der-cylib-gmbh>.

Siehe auch Saatkamp, Michael (2023), Europa baut Recycling von Lithium-Ionen-Batterien aus: Kapazitätsentwicklung, Bedarfsanalyse und Marktakteure im Blickpunkt, 26.07.2023, <https://www.isi.fraunhofer.de/de/blog/themen/batterie-update/recycling-lithium-ionen-batterien-europa-kapazitaeten-bedarf-akteure-markt-analyse.html>.

Fichtner, Maximilian; Gallée, Malte (2022), Batterieverordnung der EU, Podcast über Kreislaufwirtschaft bei Batterien & Rohstoffunabhängigkeit, <https://www.postlithiumstorage.org/de/news-events/podcasts/eu-batterieverordnung>.

Lutz, Lukas (Sphere Energy) (2024), Batterierecycling: Noch teuer, unsicher & aufwändig? 12.05.2024, So hilft KI dem deutschen Batterie-Arbeitsmarkt! Ersetzt KI bald Batterie-Fachkräfte?, <https://www.postlithiumstorage.org/de/news-events/podcasts/batterierecycling-noch-teuer-unsicher-aufwaendig>.
