

AG 4 - ZWISCHENBERICHT

Batterierecyclingmarkt Europa:

Chance für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft





AG 1

Klimaschutz im Verkehr



AG 2

Alternative Antriebe und Kraftstoffe für nachhaltige Mobilität



AG 3

Digitalisierung für den Mobilitätssektor



AG 4

Sicherung des Mobilitäts- und Produktionsstandortes, Batteriezellproduktion, Rohstoffe und Recycling, Bildung und Qualifizierung



AG 5

Verknüpfung der Verkehrs- und Energienetze, Sektorkopplung



AG 6

Standardisierung, Normung, Zertifizierung und Typgenehmigung

INHALT

KURZFASSUNG	4
EXECUTIVE SUMMARY	5
1 EINLEITUNG	6
2 HINTERGRUND: POLITISCHE RAHMENBEDINGUNGEN UND EU-REGULIERUNG	6
3 DIE BATTERIEWERTSCHÖPFUNGSKETTE UND MODELLANNAHMEN	7
4 ERGEBNISSE: RECYCLING IN EUROPA	14
4.1 Quantifizierung der Recyclingmengen	14
4.2 Quantifizierung von Investitionen und Beschäftigung	15
5 ZUSAMMENFASSUNG UND IMPLIKATIONEN FÜR DEN STANDORT EUROPA UND DEUTSCHLAND	19
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	26
QUELLENVERZEICHNIS	27



KURZFASSUNG

- Mit der zunehmenden Verbreitung der Elektromobilität wird in den kommenden Jahren auch der **Bedarf an Lithium-Ionen-Batterien** stark ansteigen. Dies erfordert unter anderem einen beschleunigten Aufbau von Batterieproduktionskapazitäten in Deutschland und Europa. Begleitend, jedoch verzögert zum Markthochlauf der Elektromobilität und dem Aufbau von Batterieproduktionskapazitäten, wird sich in Europa eine **Recyclingindustrie für Lithium-Ionen-Batterien** entwickeln.
- Im Bereich Batterierecycling ist China im internationalen Vergleich Weltmarktführer; die **deutschen und europäischen Kapazitäten fallen dagegen noch sehr gering** aus.
- Durch den Aufbau einer europäischen Recyclinginfrastruktur können **Abhängigkeiten von Importen aus dem Ausland potenziell reduziert** und **langfristig die Versorgungssicherheit in Europa sichergestellt** werden. Für den Betrachtungszeitraum bis 2040 zeigt sich, dass ein lokales Recycling einen signifikanten Einfluss auf die Rohstoffverfügbarkeit in Europa haben kann.
- Der vorliegende Bericht quantifiziert **zukünftige Bedarfe an Recyclingkapazitäten**, die damit verbundenen **Investitionen in Recyclinginfrastruktur** und daraus ableitbare **Arbeitsplatzeffekte für Europa**:
 - › Die dem europäischen Recycling zugeführte Materialmenge wird bis zum Jahr 2040 bei **deutlich über 1.000 Kilotonnen pro Jahr** liegen.
 - › Durch Recyclingverfahren mit hoher Effizienz und Rückgewinnungsrate könnte damit – basierend auf heutigen Rohstoffpreisen – ein **Wertpotenzial von etwa fünf Milliarden Euro pro Jahr ab dem Jahr 2040** gehoben werden.
- › Die dafür nötigen **Investitionen in Recyclinganlagen** kumulieren sich **bis 2040 auf etwa drei Milliarden Euro**.
- › Gleichzeitig ergibt sich bei einer entsprechenden Recyclingindustrie ein **Personalbedarf im Jahr 2040 von etwa 8.000 Personen**.
- Um diese Potenziale zu heben und eine entsprechende **Kreislaufwirtschaft für Batteriematerialien zu etablieren** müssen die **regulatorischen und ökonomischen Rahmenbedingungen** angepasst werden.
- Es ergeben sich folgende **Handlungsempfehlungen und Implikationen für den Standort Deutschland und Europa**:
 - › Die **derzeitigen Recyclingkapazitäten sind noch zu gering**, um die in den nächsten Jahren auftretenden Recyclingmengen abdecken zu können. Das für das nachhaltige Lithium-Ionen-Batterie-Recycling benötigte **technische Know-how ist in Europa bereits vorhanden** und ein **Hochskalieren dieser neuen Verfahren im industriellen Maßstab sollte mit Nachdruck verfolgt werden**, um kurzfristig mit **Initialinvestitionen für den Aufbau großindustrieller Recyclingkapazitäten** beginnen zu können.
 - › Die Industrie benötigt dafür **Rechts- und Planungssicherheit**. EU-Regulierungsvorhaben, die Geschäftsmodelle auf der Basis von **Nachhaltigkeitsprinzipien und hohen Umweltstandards** gewährleisten, sollten beschleunigt umgesetzt werden.

- › Für die weitere Marktentwicklung könnten **einheitliche Sammel- und Recyclingquoten** einen entscheidenden Beitrag zu einer geschlossenen Kreislaufwirtschaft im Bereich Batterierecycling leisten.
- › Darüber hinaus bringen **standardisierte und maschinenlesbare Verfahren** entscheidende Vorteile

für die Nachverfolgbarkeit, die Auswertung und die weitere Verwendung von Lithium-Ionen-Batterien.

- › Weitere **anwendungsorientierte Forschung und Entwicklung** sollte den **Aufbau einer Lithium-Ionen-Recyclingindustrie** begleiten.

EXECUTIVE SUMMARY

- As a consequence of the increasing prevalence of electromobility, **demand for lithium-ion batteries** is set to rise in the coming years. This requires, among other things, an accelerated development of battery production capacities in Germany and Europe. The market ramp-up of electromobility and the development of battery production capacities will be accompanied – albeit at a slightly later stage – by the formation of a **recycling industry for lithium-ion batteries** in Europe.
- When it comes to battery recycling, China is leading the market globally **whereas Germany and Europe only have very low capacities** to show.
- Building up European recycling infrastructure will **potentially reduce import dependencies on other countries** and **ensure security of supply in Europe in the long term**. Looking at the period up to 2040, it becomes clear that local recycling can have a significant impact on the availability of raw materials in Europe.
- This report quantifies **future needs in terms of recycling capacities, related investment in recycling infrastructure and resulting employment effects for Europe**:
 - › Material volumes capable of being recycled in Europe will **significantly exceed 1,000 kilotons per year** by 2040.
 - › Based on today's raw material prices, highly efficient recycling processes with high recovery rates could potentially deliver **about five billion euros in value per year starting in 2040**.
 - › The necessary **investment in recycling facilities** amounts to **three billion euros by 2040** cumulatively.
- › This kind of recycling industry will need to be staffed with about **8,000 employees in 2040**.
- **Regulatory and economic conditions** need to be adjusted in order to leverage these potentials and to establish a meaningful **circular economy for battery materials**.
- The following **recommendations and implications have been identified for Germany and Europe as places of investment**:
 - › **Current recycling capacities are insufficient** to treat the amounts of recycling expected in the next few years. **Europe already has the technical know-how** related to sustainable recycling of lithium-ion batteries; the emphasis should now be on **advancing these new processes to an industrial scale** in order to **kick-start investment for the development of large-scale recycling capacities** in the near future.
 - › This all depends on **legal and planning security** for industry players. EU regulation projects that ensure business models based on **principles of sustainability and high environmental standards** should be implemented swiftly.
 - › In terms of future market development, **common collection and recycling quotas** could make a massive contribution towards a closed circle economy in the field of battery recycling.
 - › Moreover, **standardised and machine-readable processes** are hugely advantageous for the traceability, evaluation and re-use of lithium-ion batteries.
 - › **Building a recycling industry for lithium-ion batteries** should be accompanied by further application-oriented research and development.

1 EINLEITUNG

Um die erheblich gesteigerte Nachfrage nach Batterien für Elektrofahrzeuge zu decken, werden in Deutschland und Europa in den kommenden Jahren voraussichtlich **Batterieproduktionskapazitäten im Umfang von mehreren 100 GWh/a aufgebaut**. Daraus ergeben sich große Herausforderungen bei der Versorgung mit kritischen (und nicht kritischen) Rohstoffen zur Produktion von Lithium-Ionen-Batterien. Es wird sich daher verzögert zum Markthochlauf der Elektromobilität **eine Recyclingindustrie für Lithium-Ionen-Batterien (LIB) in Europa** entwickeln. Ein **Kreislaufsystem für Batteriekomponenten und -rohstoffe** könnte einen wertvollen Beitrag zur **Verringerung der Abhängigkeit** von Importen aus dem Ausland und somit zur **Versorgungssicherheit** leisten. Auch im Hinblick auf die nachhaltige Nutzung der Elektromobilität ist die Schließung des Materialkreislaufs geboten.

Bereits heute befinden sich **zahlreiche Recycling-Pilotinitiativen** im Aufbau oder in Betrieb. Technologisch stehen für das Recycling verschiedene Verfahren zur Verfügung, die jedoch noch kein großindustrielles Niveau erreicht haben. Es müssen zeitnah **Recyclingkapazitäten ausgebaut** werden, die die zukünftigen großen Batteriemengen aus dem Rücklauf der ersten und zweiten Generation an Elektrofahrzeugen bewältigen können.

Anknüpfend an die [qualitative Betrachtung des Wertschöpfungsnetzwerks Batterierecycling](#) von Oktober 2020 legt die Arbeitsgruppe 4 der *Nationalen Plattform Zukunft der Mobilität (NPM)* mit diesem Papier eine quantitative Untersuchung zum zukünftigen Bedarf an Recyclingkapazitäten, den damit verbundenen Investitionen in Recyclinginfrastruktur sowie den daraus ableitbaren Arbeitsplatzeffekten für Europa vor.

Die Aussagen des vorliegenden Papiers basieren auf der Studie „**Quantifizierung Batterierecycling**“ (03/2021–07/2021), die das Fraunhofer-Institut für System und Innovationsforschung (ISI) mit dem Fraunhofer-Institut für Silicatforschung (ISC) für die AG 4 der NPM erstellt hat. Für die Modellierung der zukünftigen Bedarfsentwicklung der Recyclingkapazitäten wurden Annahmen auf Grundlage in der Literatur vorhandener Erkenntnisse sowie auf Grundlage der Ergebnisse von Experteninterviews getroffen. Die **Quantifizierungen** entstanden entlang der erwarteten **Menge an End-of-Life-Batterien**, der Anteile für **Batterierecycling** und **Second-Life bis 2040** sowie der erwarteten zusätzlichen **Materialflüsse aus Batterieproduktionsausschüssen**.

Unter Einbeziehung von Import- und Export-Effekten, einem möglichen Second-Life für Traktionsbatterien, politischen und regulatorischen Rahmenbedingungen sowie der technologischen Weiterentwicklung von Recyclingverfahren wurden drei Szenarien für das zukünftige Aufkommen von Recyclingmengen, die damit verbundenen Investitionen in Recyclinginfrastruktur und Arbeitsplatzeffekte aufgestellt. Im Ergebnis stehen Modellauswertungen über die drei Szenarien für das zukünftige Aufkommen von Recyclingmengen, die damit verbundenen Investitionen in Recyclinginfrastruktur und daraus ableitbare Arbeitsplatzeffekte in einem **Minimal-, Maximal-** sowie einem **„Best-guess“-Szenario beziehungsweise Basis-Szenario**. Abschließend wurden die Ergebnisse von den Expert:innen des Fraunhofer ISI und ISC sowie der NPM eingeordnet und mögliche Handlungsoptionen und -bedarfe für einen Aufbau der erforderlichen Recyclingkapazitäten für Politik und Industrie abgeleitet.

2 HINTERGRUND: POLITISCHE RAHMENBEDINGUNGEN UND EU-REGULIERUNG

- **Politische beziehungsweise regulatorische Rahmenbedingungen** spielen bei der Etablierung eines **europäischen und deutschen Batterierecyclings** eine Rolle:
 - › Arbeits- und Umweltschutzbestimmungen
 - › Aufbau von Handelsbeziehungen zu relevanten Partnerländern, insbesondere rohstoffliefernden Ländern und potenziellen Recyclern
 - › Politische Maßnahmen und Rahmenbedingungen in diesen Partnerländern

- › Altfahrzeug-/Batteriedirektiven und deren Umsetzung
- › Subventionsmaßnahmen
- Der **Regulierungsvorschlag zu Batterien und Altbatte-** **rien** der Europäischen Union (kurz: „EU-Batterieregulie-
rungsvorschlag“) beschreibt einen möglichen Rahmen.¹
- Darin werden **Recyclingeffizienzen** (Rohstoffausbeu-
te) beim Batterierecycling und **Mindesteinsatzmengen**
von Rezyklaten (Produkte eines Recyclingprozesses) in
Batterien bestimmt und **Informations-, Berichts- oder**

Sorgfaltspflichten zu Umwelt- und Sozialauswirkungen der Produktion und Rohstoffgewinnung vorgegeben.

- Für die **Hersteller** kommt damit **mehr Verantwortung** hinsichtlich der Vermeidung negativer Umwelt- und Sozialauswirkungen bei der Batterieproduktion hinzu.
- Vor dem Hintergrund der bestehenden und der sich ver-
ändernden politischen und regulatorischen Rahmen-
bedingungen werden im folgenden Modellannahmen
zur Batteriewertschöpfungskette getroffen. Dabei
wird eine **Quantifizierung von Recyclingmengen**, den
entsprechenden **Investitionen und Beschäftigungs-**
effekten vorgenommen.

3 DIE BATTERIEWERTSCHÖPFUNGSKETTE UND MODELLANNAHMEN

MÄRKTE UND PRODUKTIONSSTANDORTE FÜR BATTERIEANWENDUNGEN

- Um alle Hauptmärkte und wesentlichen Produktions-
standorte für Batterien und Batterieanwendungen zu
berücksichtigen, wurde für die Quantifizierungen ein
erweiterter **europäischer Betrachtungsraum** gewählt
(**Europäische Union, Großbritannien, Norwegen und die**
Schweiz – hier „EU+“).
- Dadurch kann zumindest angenommen werden, dass
der überwiegende Anteil der heute neu zugelassenen
Elektrofahrzeuge bis zum Lebensende innerhalb der
EU+ verbleibt und nicht noch während der Nutzungs-
phase ins weitere Ausland exportiert wird.
- **Deutschland** nimmt als **Automobilstandort**, aber auch
als zukünftiger **Batterieproduktionsstandort** eine **wich-**
tige Position im gewählten Betrachtungsraum ein.
So kamen **knapp 30 % der im Jahr 2020** in der EU und

Großbritannien hergestellten Pkw aus **deutscher Pro-**
duktion.² Auch bei den **EU-Neuzulassungen** lag der
Anteil an Fahrzeugen aus Deutschland bei knapp 25 %.³

- Die **Ankündigungen** für den Aufbau von **Zellprodukti-**
onskapazitäten belaufen sich für **Deutschland bis 2030**
auf maximal 276 GWh (Europa 989 GWh)⁴. Deutschland
dürfte sich also auch in diesem Bereich zu einem der
wichtigsten Standorte in Europa entwickeln.

MODELLOGIK UND EINFLUSSFAKTOREN

- Um das zukünftige Aufkommen von Recyclingmengen,
die damit verbundenen Investitionen in Recyclinginfra-
struktur und daraus ableitbare Arbeitplatzeffekte zu
ermitteln, wurden drei Szenarien (**Minimal-, Maximal-**
sowie ein „**Best-guess**“-Szenario **beziehungsweise**
Basis-Szenario) aufgestellt.⁵

¹ Europäische Kommission (2020): Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL concerning batteries and waste batteries, repealing Directive 2006/66/EC and amending Regulation (EU) No 2019/1020. URL: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/4b5d88a6-3ad8-11eb-b27b-01aa75ed71a1/language-en>

² Vgl. VDMA 2020

³ Vgl. Marklines 2021

⁴ Stand Mai 2021

⁵ Die im Rahmen der Untersuchung aufgestellten Annahmen und Berechnungen unterliegen hohen Unsicherheiten hinsichtlich regulativen Rahmenbedingungen, Technologieentscheidungen und Marktentwicklungen. Das Minimal- und das Maximalszenario stellen Extrembetrachtungen dar, welche jeweils Modellparameter verknüpfen, die sich mindernd beziehungsweise verstärkend auf zukünftige Recyclingmengen auswirken. So beruht zum Beispiel das Maximalszenario auf den Annahmen einer schnellen Marktdiffusion von Elektrofahrzeugen, hohen Wachstumsraten in anderen Batterieanwendungen, einer moderaten bis kurzen Lebensdauer der Batterien und nur geringen Exporten von Batterieschrotten aus Europa, welche insgesamt zu einem hohen Recyclingaufkommen innerhalb Europas führen. Das Minimalszenario kombiniert entsprechend gegenteilige Annahmen. Im Basis-Szenario wurden insgesamt moderate Annahmen angesetzt, welche sich stark an den bisher zu beobachtenden Trends in Batteriemärkten und Nutzung orientieren.

- Das entsprechende **Modell zur Quantifizierung von Batterierecycling** deckt wesentliche Schritte der **Batteriewertschöpfungskette** ab (siehe Abbildung 1).
- Diese erstreckt sich von der Produktion von Materialien und Batterien bis über deren Nutzung (hier: Pkw und Nutzfahrzeuge (NFZ), Elektronik/Verbraucher (3C), Zweiräder, und Speicher (ESS)) und Behandlung nach dem Lebensende.⁶
- Die Entwicklung aller Schritte der skizzierten Wertschöpfungskette ist heute noch **starken Unsicherheiten** unterworfen. **Realdaten**, insbesondere zur konkreten Ausgestaltung einer Recyclingindustrie in Europa **existieren nicht**. Die für die Untersuchung getroffenen und im folgenden Kapitel diskutierten Annahmen beruhen somit überwiegend auf der Einschätzung von Expert:innen aus Industrie und Forschung.

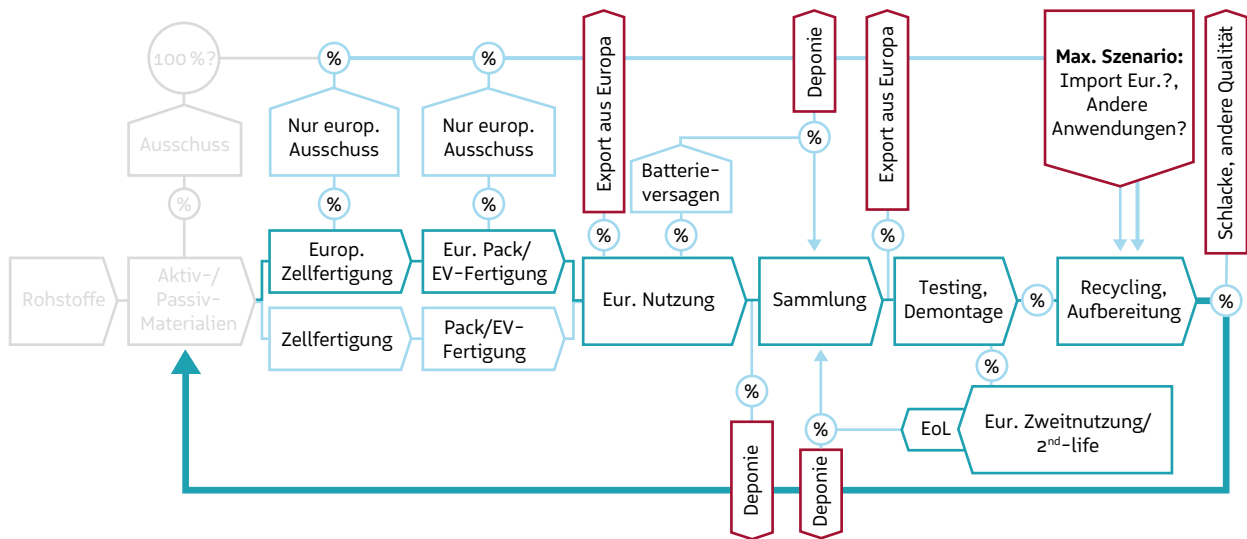


Abbildung 1: Material-/Wertstrommodell – Modelllogik
Quelle: Fraunhofer ISI, Fraunhofer ISC 2021

- Wesentliche, noch nicht abschließend zu klärende Fragen umfassen unter anderem Gebrauchtfahrzeugmärkte, Kosten im In- und Ausland und Umsetzung von Regulierungsvorhaben.
- Für das Recycling beziehungsweise für den **Wert der Rezyklate** entscheidend sind die in der Batterie verbauten Komponenten.
 - **Kathodenseitig** könnte in Zukunft die Verwendung nikelreicher **NMC⁸- und NCA⁹-Materialien** den größten Anteil des Materialbedarfs ausmachen. LFP¹⁰ könnte mittelfristig **in der Anwendung im EV-Niedrigpreissegment** an Bedeutung gewinnen, vor allem wenn sich die „**Cell-to-Pack-Konzepte**“ der chinesischen Hersteller am Markt durchsetzen können.
 - **Anodenseitig** wird die **Verwendung siliziumhaltiger Anodenkompositionen** voraussichtlich gegenüber den **bisher hauptsächlich verwendeten Graphiten** zunehmen. Zudem könnten ab 2030 Batteriezellen

⁶ Die aufgeführten Schritte können in unterschiedlichen Regionen erfolgen und unterliegen daher den jeweiligen Export- und Importströmen. Quoten und Effizienzen beschreiben mögliche Material- und Wertverluste (u. a. durch Limitierung technischer Prozesse und unsachgemäße Behandlung/Verbleib). Der Betrachtungszeitraum umfasst die Jahre 2020/21 bis 2040 und erstreckt sich auf die Länder der Europäischen Union erweitert durch Großbritannien, Norwegen und die Schweiz (EU+).

⁷ Vgl. VDMA 2020; NPM AG4 2021

⁸ Stoffgruppe aus Lithium-, Nickel-, Mangan- und Cobaltoxiden

⁹ Stoffgruppe aus Lithium-, Nickel-, Cobalt- und Aluminiumoxiden

¹⁰ Lithium-Eisen-Phosphat

mit **Lithium-Metall-Anoden** genutzt werden, zum Beispiel in Feststoffbatteriezellen.

- Für den Materialbedarf auf Packebene besteht neben **Kupfer, Stahl und Kunststoffen insbesondere eine hohe Nachfrage nach Aluminium**, da dieses Material für die Konstruktion von Modul- und Packgehäusen verwendet wird.

- Aus den Szenarien zum Aufbau von Zellproduktionskapazitäten und den Annahmen zu verwendeten Materialien für Elektrode, Zelle und Pack ergibt sich ein Materialbedarf in der Produktion **von 3.000 (Min.-Szenario) bis hin zu 5.000 (Basis-/Max.-Szenario) Kilotonnen im Jahr 2040**.
- Den größten Gewichtsanteil nimmt dabei **Aluminium** ein, das sowohl für die positive Stromableiterfolie als auch für Zell-, Modul- und Packgehäuse verwendet wird. Auf Zellebene dominiert **Nickel** durch seinen Einsatz in vielen Kathodenmaterialien, gefolgt von der **Elektrolytmasse und Aluminium**.

MATERIALBEDARF FÜR DIE ZELL- UND PACKPRODUKTION

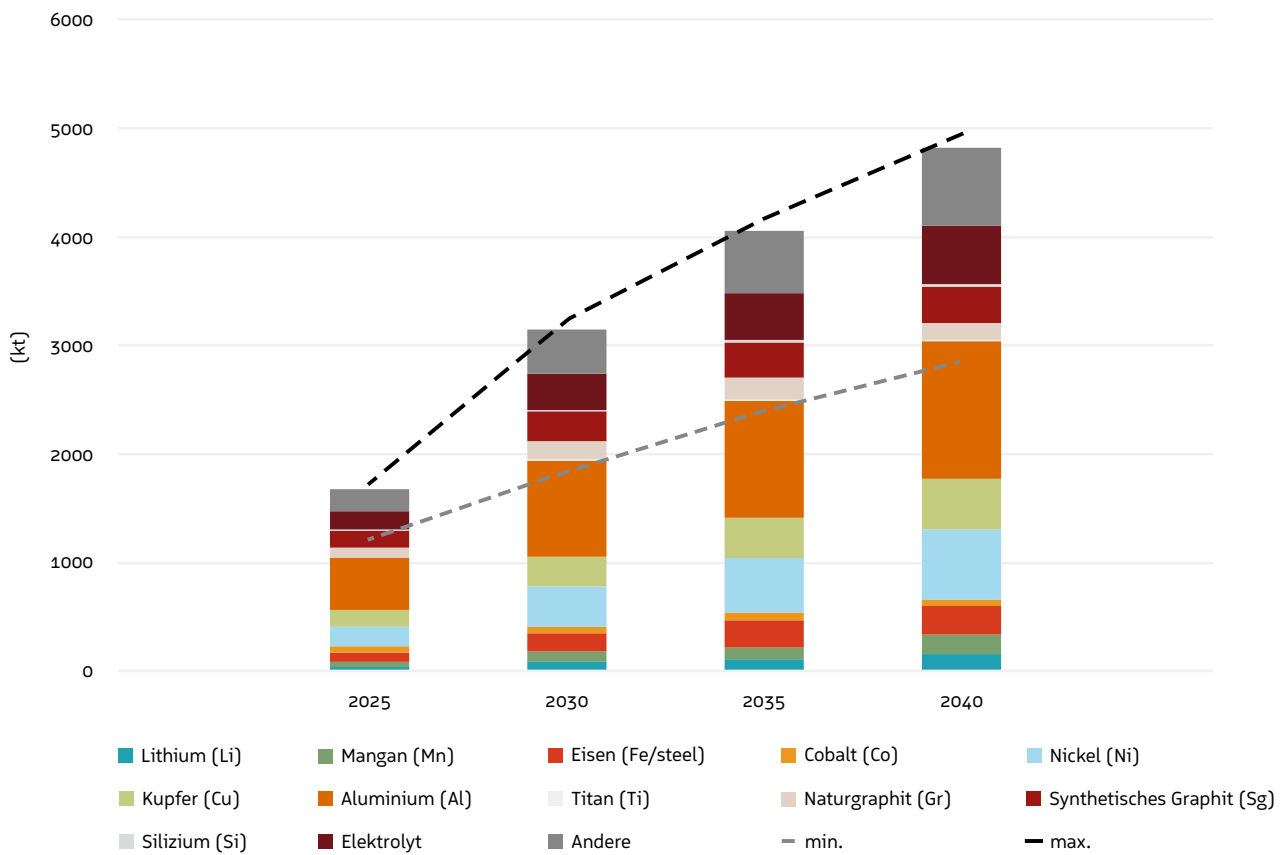


Abbildung 2: Materialbedarf Zell- und Packproduktion
Quelle: Fraunhofer ISI, Fraunhofer ISC 2021

RÜCKLÄUFE ZUM EUROPÄISCHEN LIB-RECYCLING

- Rückläufe zum Batterierecycling speisen sich aus den folgenden drei Quellen:
 - › Ausschüsse aus der Batterie(zell)produktion
 - › Batterien aus Elektrofahrzeugen
 - › Batterien aus anderen Anwendungen, insbesondere „3C“ (d. h. Elektronik, Computer, Haushalts- und Power tools und weitere), Stationäre Batteriespeicher (ESS) und Micromobility (E-Bikes und Scooter)

AUSSCHUSS AUS DER BATTERIEPRODUKTION

- Bei der **Batterie(zell)produktion** treten **Abfälle** durch den Produktionsprozess auf. Diese sind beispielsweise Slurryreste (Beschichtungsreste der Elektrodenfolie) mit Aktivmaterialien aus Mischprozessen, Folien mit teilweiser Beschichtung am Anfang und Ende jeder Beschichtungsrolle, Elektrodenreste beim Vereinzeln der Elektroden. Auch bei eingefahrener Produktion beträgt die Ausbeute somit weniger als 100 %. Die Prozesse werden daher stetig optimiert.

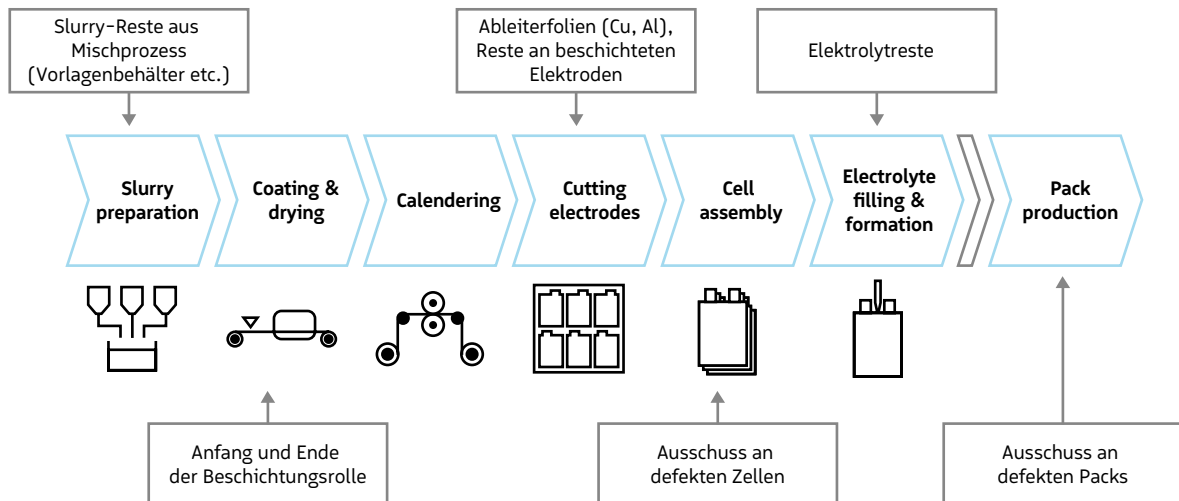


Abbildung 3: Prozessschritte der Batterieproduktion
Quelle: eigene Abbildung nach Smekens 2016

- Für die Quantifizierung wurden mit Ausbeuten von **85 % bis 90 % heute** und **90 % bis 95 % 2040** gerechnet (Bernhart 2020). Es ist davon auszugehen, dass in der Hochlaufphase die Ausschussraten neuer Zellfabriken noch deutlich über denen einer optimierten und eingefahrenen Produktion liegen werden. Dies gilt insbesondere für die Jahre bis 2030.
- Im Gegensatz zu gebrauchten Batterien aus unterschiedlichsten Anwendungen fallen diese **Neuschrotte** an definierten Orten an und könnten leicht einem **lokalen Recycling** zugeführt werden.

Für die Jahre ab 2030 wird mit einem **Übergang zu einer hocheffizienten Produktion** ausgegangen.

BATTERIE-INVERKEHRBRINGUNG IN EUROPA: ELEKTROFAHRZEUGE

- Viele der heute im europäischen Betrachtungsraum zugelassenen Fahrzeuge werden im Laufe ihres Lebens **ins außereuropäische Ausland exportiert**. Typische Pfade verlaufen über eine Inverkehrbringung in West- oder Zentraleuropa, einen ersten Export nach Osteuropa und gegebenenfalls einen **zweiten Export ins außereuropäische Ausland**. Es ist somit möglich, dass ein Teil der in Europa in Verkehr gebrachten Fahrzeuge außerhalb Europas der Verwertung oder dem Recycling zugeführt werden.
- Für Verbrenner (Pkw) sind heute **Exportquoten von 70 %** typisch. Bei den Exportquoten für Elektrofahrzeuge wird davon ausgegangen, dass der heute vernachlässigbare Export ins außereuropäische Ausland bis 2030 auf verbrennertypische Werte ansteigen wird. Durch diesen graduellen Anstieg und die angenommene Lebensdauer der Fahrzeuge spielen die **Exportquoten für Gebrauchtfahrzeuge im Betrachtungszeitraum bis 2040 nur eine untergeordnete Rolle**.
- Nach ihrem Lebensende müssen die Batterien beziehungsweise die jeweiligen Anwendungen einem **Sammelsystem** zugeführt werden. Dazu wurde angenommen, dass **95 % aller in Europa außer Dienst gestellten Elektrofahrzeuge** in einem entsprechenden System landen, bei einer **10%- bis 20%-tigen Quote** für die Weiternutzung von im Sammelsystem erfassten EV-Batterien in **Second-Life-Anwendungen** (Lebensdauer dort: 6 Jahre).
- Für die für den Export gesammelt (nicht Second-Life-Anwendung) zugeführten Batterien wurden zeitlich konstante Quoten von **10 % bis 50 % angenommen**.¹¹ **Diese Exportraten wirken sich stark auf die Quantifizierung der Recyclingmengen in Europa aus.**

BATTERIE-INVERKEHRBRINGUNG IN EUROPA: ANDERE BATTERIEANWENDUNGEN

- Um Rücklaufmengen von LIB zum europäischen Recycling für den Betrachtungszeitraum insgesamt abzuschätzen, wurde der Betrachtungsrahmen für das Inverkehrbringen von Batterien über die Elektrofahrzeuge hinaus auf **weitere Batterieanwendungen (3C, ESS und Micromobility)** erweitert.
- Europäische Marktanteile für die genannten Batterieanwendungen wurden aufgrund globaler Marktstudien abgeschätzt. Für die Nutzungszeit in diesen Anwendungen wurde eine Lebensdauer von acht Jahren, nach der Nutzung eine **Sammelquote von 80 %** angenommen.¹² Für den Export gesammelter Batterien aus den genannten Anwendungen wurden zeitlich konstante Quoten von **10 % bis 50 %** angenommen.¹³ Diese wirken sich ebenfalls stark auf die Quantifizierung der Recyclingmengen in Europa aus.

¹¹ Vgl. Circular Economy Initiative Deutschland 2020

¹² Vgl. Mayyas 2018

¹³ Vgl. Circular Economy Initiative Deutschland 2020

RÜCKLAUFMENGEN BIS 2040

- Vor 2030 werden Altbatterien aus Elektronik und anderen 3C-Anwendungen, vor 2035 Neuschrotte aus der Batterieproduktion noch einen größeren Anteil am Recyclingaufkommen ausmachen als der Rücklauf aus alten Fahrzeugbatterien.
- Ab 2035 werden alte Fahrzeugbatterien den weitaus größten Anteil der Rücklaufmengen zum europäischen LIB-Recycling ausmachen (siehe Abbildungen 4–6).

RÜCKLAUF (KILOTONNEN)	2025			2030			2035			2040		
	min.	Basis	max.	min.	Basis	max.	min.	Basis	max.	min.	Basis	max.
Zell-, Packproduktion	32	59	75	44	95	118	54	118	149	58	132	170
xEV Pkw und Nfz	9,2	9,8	10,4	67	77	86	218	389	559	513	1.030	1.550
3C, ESS, eBikes, Scooter	25	33	41	39	55	72	50	90	132	70	168	269
Gesamt	66	102	127	150	227	277	323	597	840	642	1.330	1.990

Abbildung 4: Batterierecycling in Europa – Zusammenfassung Rücklaufmengen
Quelle: Fraunhofer ISI, Fraunhofer ISC 2021

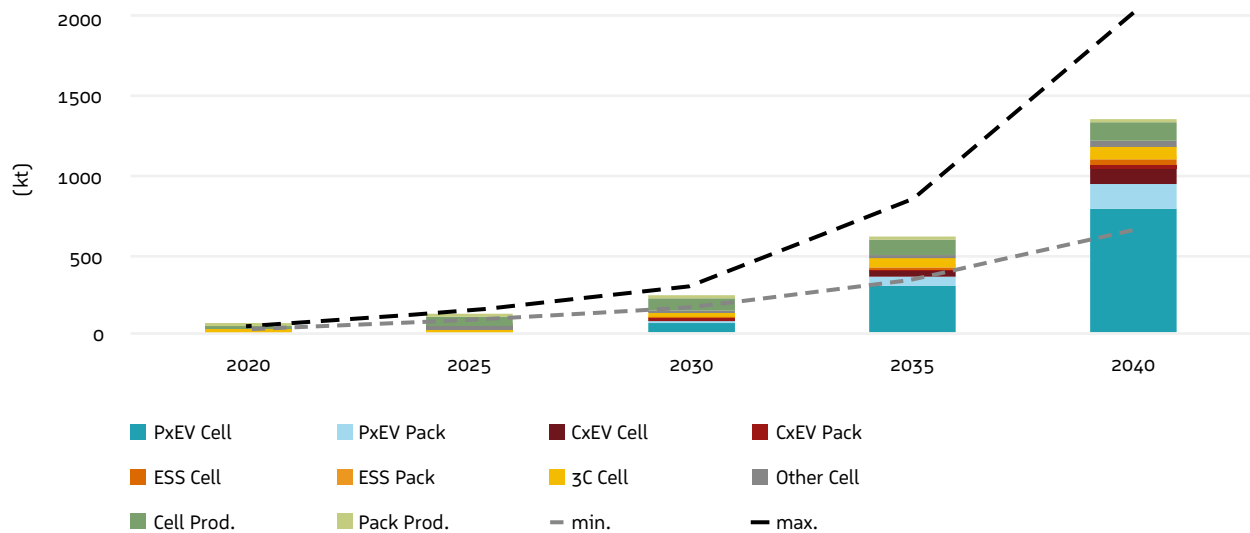


Abbildung 5: Rücklaufmenge LIB (Pack-Ebene. Mengenangaben nach Abzug von Sammelverlusten und Exporten.
Balken zeigen das Basis-Szenario)
Quelle: Fraunhofer ISI, Fraunhofer ISC 2021

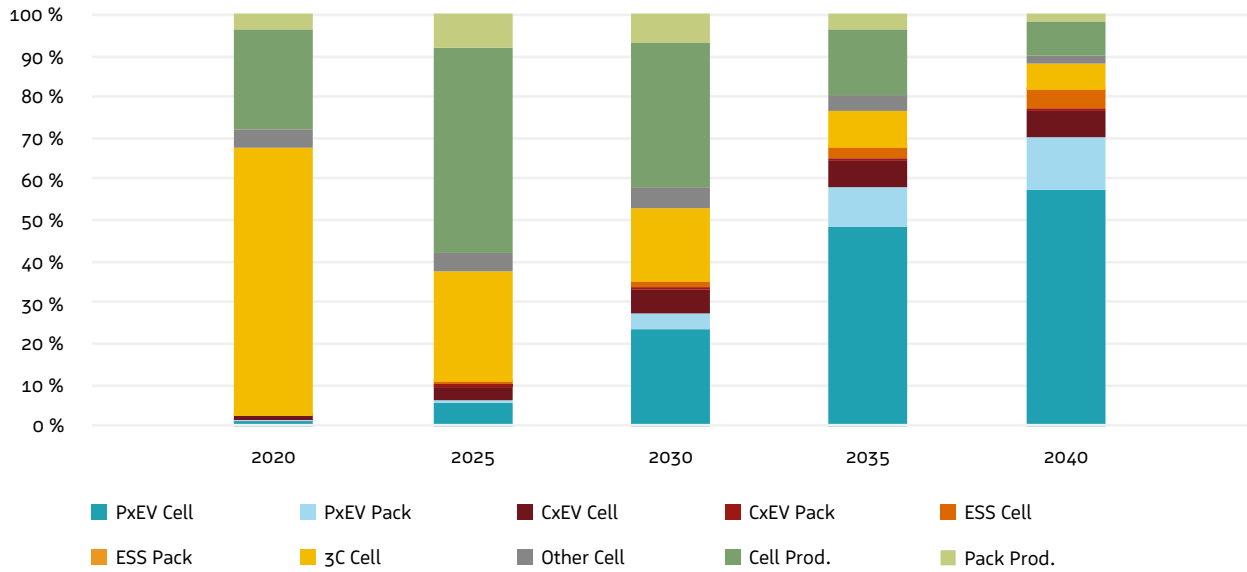


Abbildung 6: Anteile Rücklaufmenge LIB (Pack-Ebene. Mengenangaben nach Abzug von Sammelverlusten und Exporten. Balken zeigen das Basis-Szenario)
Quelle: Fraunhofer ISI, Fraunhofer ISC 2021

MODELLPARAMETER FÜR RECYCLINGEFFIZIENZEN

- Der Fokus des heutigen und zukünftigen LIB-Recyclings liegt auf den teuren und teilweise versorgungskritischen **Metallen Nickel, Cobalt und Kupfer**.
- Das Recycling des in den Zellen enthaltenen **Lithiums und Aluminiums** ist derzeit mit technischen und daraus fol-

genden **ökonomischen Schwierigkeiten verbunden**, in Zukunft wird dennoch mit **hohen Recyclingraten** gerechnet.

- Die Rohstoffe mit niedrigerem Wert wie **Mangan** sowie **Kunststoffe** werden voraussichtlich auch in Zukunft eher dem **Downcycling¹⁴** oder der **thermischen Verwertung** zugeführt, sodass diese bis 2040 niedrige Recyclingraten aufweisen werden.

EFFIZIENZ ZELLRECYCLING (%)	2020		2040	
	min.	max.	min.	max.
Lithium	0	0	85	90
Cobalt	75	90	90	95
Nickel	75	90	90	95
Kupfer	75	90	90	95
Eisen/Stahl	90	90	90	95
Aluminium	66	66	90	90
Mangan	0	0	0	90
Kohlenst. EoL	0	0	0	10
Kohlenst. Produktionsausschuss	0	0	10	50
Polymere	0	0	0	0

Abbildung 7: Effizienz Zellrecycling
Quelle: Fraunhofer ISI, Fraunhofer ISC 2021

¹⁴ Beim Downcycling werden Abfallprodukte zwar wiederverwertet, allerdings fallen Wertverluste im Weiterverarbeitungsprozess an.

4 ERGEBNISSE: RECYCLING IN EUROPA

4.1 QUANTIFIZIERUNG DER RECYCLINGMENGEN

MENGE UND WERT DER RÜCKGEWONNENEN METALLE

• Unter Annahme entsprechender Recyclingeffizienzen und der Szenarien für Rücklaufmengen (Kapitel 3) ergeben sich die in Abbildung 8 angegebenen **Rezyklatmengen für ausgewählte Metalle und Materialien**. Im Vergleich zur Gesamtmasse der dem Recycling zugeführten Altbatterien liegt die **Gesamtrückgewinnungsrate** je nach Szenario zwischen **45 und 75 %**. Der Rest fällt als

Verlust an, wird thermisch verwertet oder besitzt nach Abschluss der Prozesse eine untaugliche Qualität.

• Auf Basis mittlerer Rohstoffpreise für 2020 beläuft sich der Wert der Rezyklate im Basis-Szenario für das **Jahr 2040 auf circa fünf Milliarden Euro** (Minimal-Szenario: 2,1 Milliarden Euro, Maximal-Szenario: 8,3 Milliarden Euro).

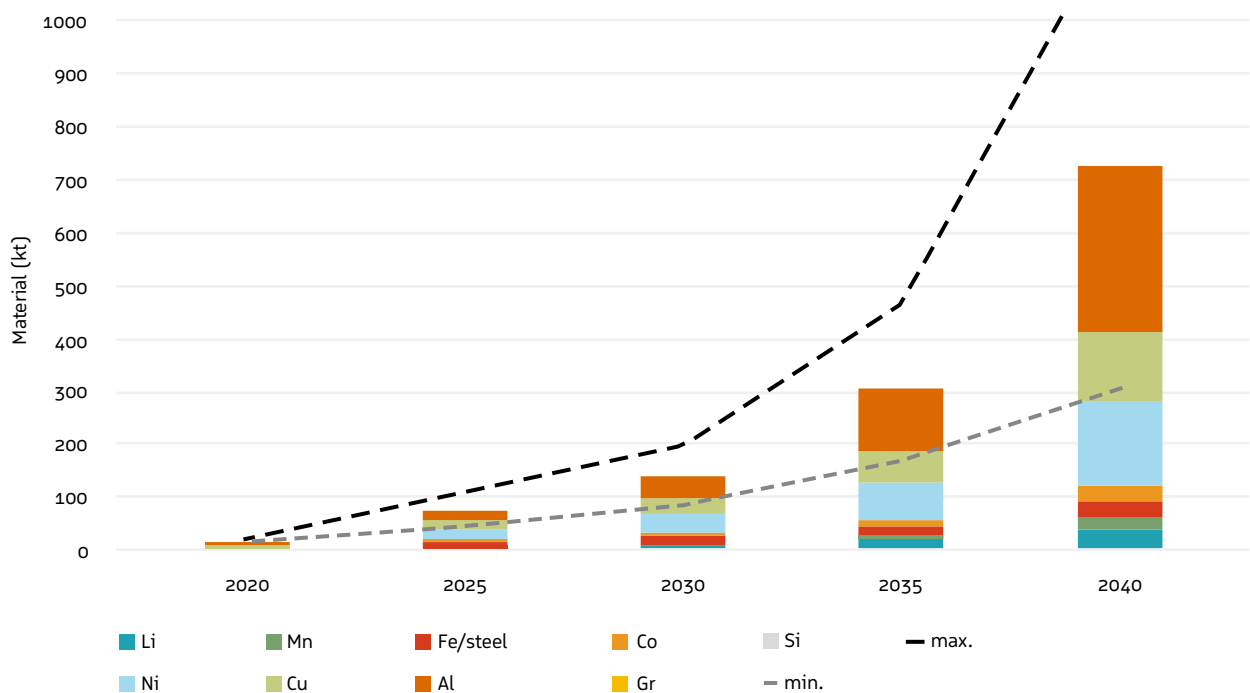


Abbildung 8: Rezyklatmenge europäisches Recycling
Quelle: Fraunhofer ISI, Fraunhofer ISC 2021

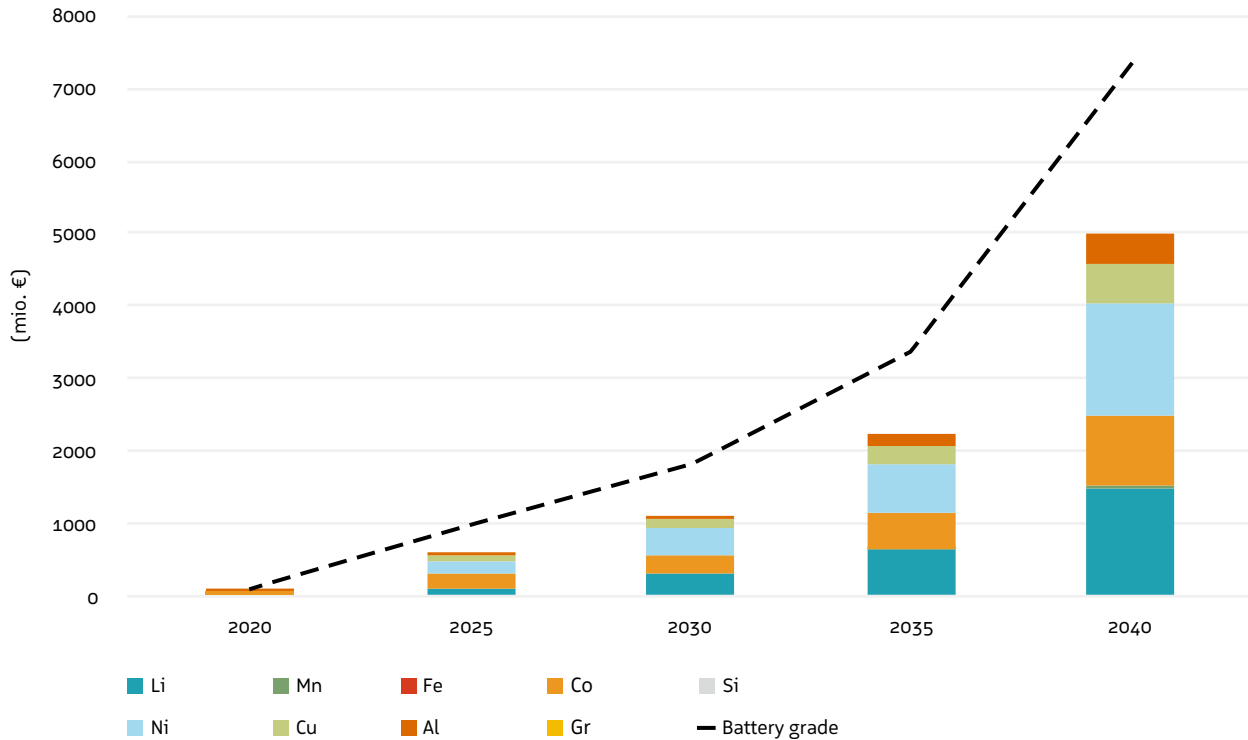


Abbildung 9: Materialwert Rezyklate Metalle/Materialien
Quelle: Fraunhofer ISI, Fraunhofer ISC 2021

4.2 QUANTIFIZIERUNG VON INVESTITIONEN UND BESCHÄFTIGUNG

LIB-RECYCLINGANLAGEN IN EUROPA

- Die Mehrzahl der in Europa in Betrieb befindlichen oder entstehenden Anlagen sind zunächst noch Pilotanlagen.
- Die in Europa **angekündigten Recyclinganlagen** entsprechen einer Gesamtkapazität von **33 kt/a**¹⁵.
- Die meisten Anlagen produzieren **Schwarzmasse durch mechanische Aufbereitung**, die dann extern bei metallurgischen Unternehmen weiterverarbeitet werden kann.
- Die Angaben zu **Initialinvestitionen** der Anlagen gehen weit auseinander, was in der Verwendung **unterschiedlicher Technologien**, unterschiedlicher **Endprodukte** und ihrem Pilotliniencharakter begründet ist. Die Bandbreite der in Pressemitteilungen kommunizierten **Initial-**

investitionen liegt im Bereich **1 bis 8 Millionen Euro/(kt/a) (Kilotonne/Jahr)**.

QUANTIFIZIERUNG INVESTITIONEN UND BESCHÄFTIGUNG: VORGEHENSWEISE

- Der Vergleich der **angekündigten Recyclinganlagen von etwa 33 kt/a** zum **prognostizierten Bedarf** für europäische Recyclingkapazitäten von **etwa 100 kt/a im Jahr 2025 auf etwa 1.300 kt/a im Jahr 2040** zeigt, dass die Größenordnung der angekündigten Anlagen **deutlich unter dem zukünftigen Bedarf** liegt.
- Eine Investitionsbedarfseinschätzung für weitere Recyclinganlagen und die damit verbundenen Arbeitsplatzeffekte hat ergeben, dass **1 bis 3 Millionen Euro** an

¹⁵ Summe der bekannten/angekündigten Kapazitäten

(Initial-)Investitionen und **5 bis 7 Arbeitsplätze pro kt jährliche Recyclingkapazität** erforderlich sein werden.

- Bereits aufgebaute Anlagen/Investitionen/Recyclingkapazitäten bleiben nicht ohne Weiteres bestehen, sondern müssen mittels **Reinvestitionen** erneuert werden (zum Beispiel 5 % Abschreibung p.a.¹⁶).

BATTERIERÜCKLAUF AUS XEV UND ALLEN LIB-ANWENDUNGSGBIETEN

- Das Recycling von Batterien aus den betrachteten LIB-Anwendungsgebieten (xEV, ESS, 3C, Micromobility) inklusive der Ausschüsse europäischer Zellproduktionen erfordert den Aufbau einer **Recyclingkapazität** zwischen **600 und 2.000 kt/a bis 2040**. Die dafür nötigen Initialinvestitionen kumulieren sich auf **circa 3 Milliarden Euro bis zum Jahr 2040** (Spannbreite circa 0,6 Milliarden Euro (Min.-Szenario) bis circa 6 Milliarden Euro (Max.-Szenario)).

- Der **Anteil der Batterien aus Elektromobilitätsanwendungen** und der entsprechende Anteil beim Investitionsbedarf macht dabei zwischen **70 und 80 %** der gesamten LIB-Recyclingmenge bzw. des gesamten Investitionsbedarfs aus.
- Die zeitliche Entwicklung des Investitionsbedarfs für die Jahre 2025 bis 2040 ist in Abbildung 10 abgebildet. Dabei sollte berücksichtigt werden, dass die **Investitionen zum Teil Jahre früher** anfallen, d.h. im Verlauf des Aufbaus der Recyclingkapazitäten und nicht, wie hier angenommen, erst zum Zeitpunkt des Anfalls der Rücklaufmenge.
- Neben den Initialinvestitionen kann auch von Reinvestitionen in die Infrastruktur ausgegangen werden, die sich bei einem **Abschreibungssatz von 5 % p.a.** vom Ausgangswert **bis 2040 auf 800 Millionen Euro kumulieren** (Spannbreite circa 200 Millionen Euro (Minimal-Szenario) bis circa 1,7 Milliarden Euro (Maximal-Szenario)).

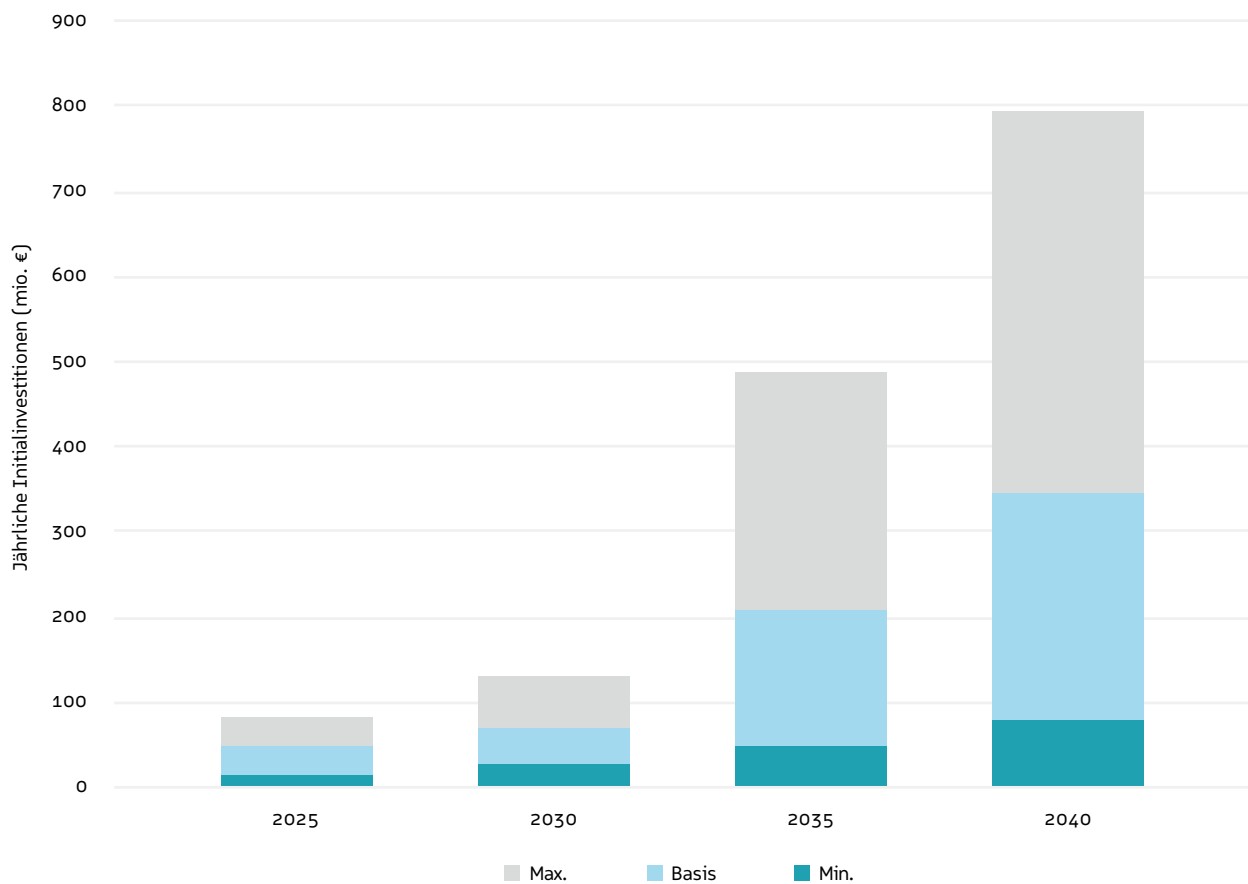


Abbildung 10: Initialinvestitionen zum Erreichen der nötigen Recyclingkapazität EU+
Quelle: Fraunhofer ISI, Fraunhofer ISC 2021

16 Vgl. Kwade 2012

BATTERIERÜCKLAUF AUS XEV UND ALLEN LIB-ANWENDUNGSGEBIETEN

- Betrachtet man lediglich die Recyclingmengen aus Elektromobilitätsanwendungen, so ist im Basis-Szenario von einem Anstieg von etwa **60 Arbeitsplätzen im Jahr 2025** auf etwa **6.200 Arbeitsplätze im Jahr 2040** auszugehen. In der Extrembetrachtung der Minimal- und Maximal-Szenarien ergibt sich **im Jahr 2040 ein Personalbedarf von 2.600 bis 11.000 Personen**.
- Wird nicht nur der LIB-Rücklauf aus E-Mobilitätsanwendungen berücksichtigt, sondern auch der **Rücklauf aus allen anderen LIB-Anwendungsgebieten** (Energy

Storage System (ESS), Computing, Consumer, Communication (3C) etc.) inklusive der Produktionsausschüsse, so ergeben sich bei gleichen Arbeitsplatzsätzen (5 bis 7 Arbeitsplätze pro kt jährliche Kapazität) deutlich **höhere Beschäftigungsbedarfe für das Recycling**.

- Im Basis-Szenario ist unter Berücksichtigung aller Anwendungen und Quellen von einem Anstieg der **benötigten Arbeitskräfte** von etwa **160 im Jahr 2025** auf circa **8.000 im Jahr 2040** auszugehen. In der Extrembetrachtung der Minimal- und Maximal-Szenarien ergibt sich **im Jahr 2040 ein Personalbedarf von 3.200 bis 14.000 Personen**. Wird zusätzlich die Sammlung berücksichtigt, so könnten in Europa **bis 2040** zusätzlich zwischen **6.000 und 16.000 Arbeitsplätze** entstehen.

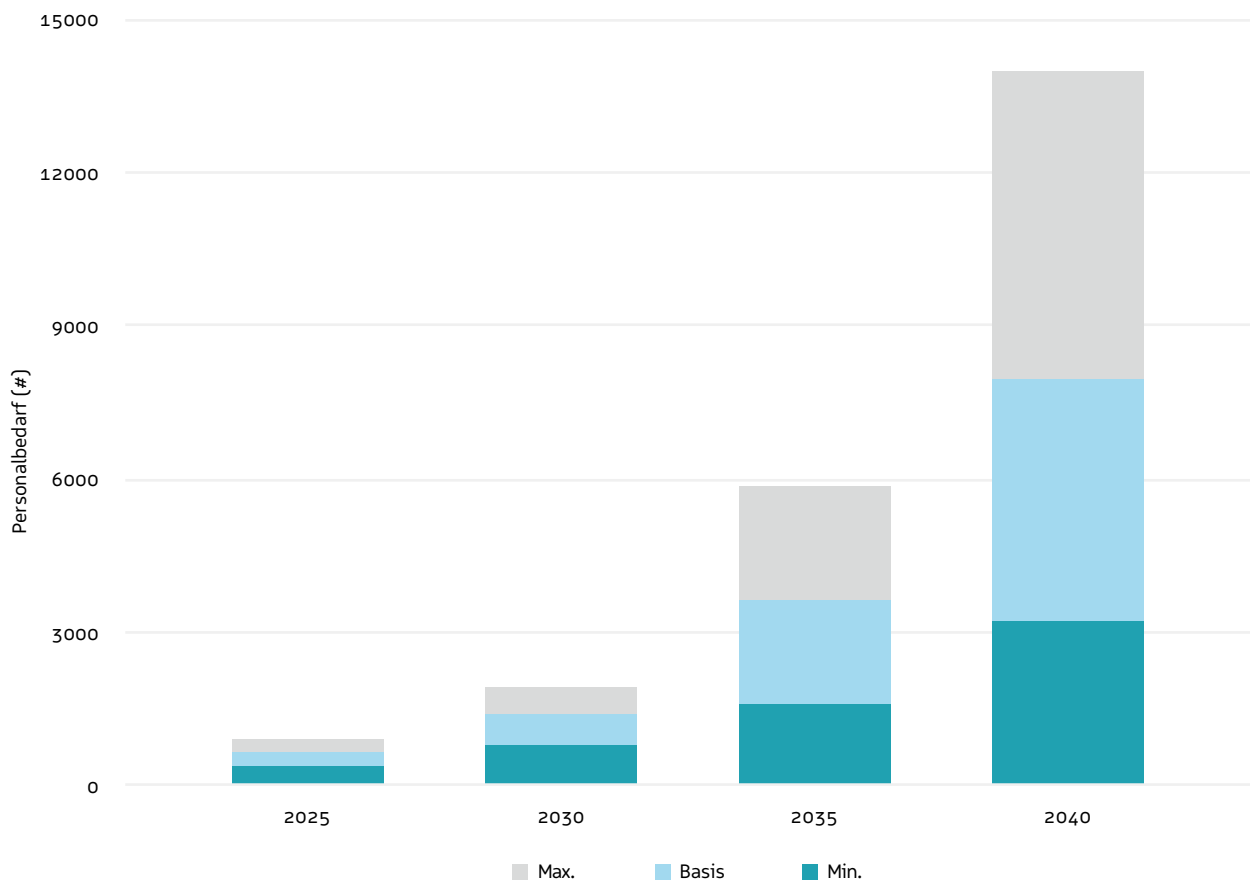


Abbildung 11: Personalbedarf für Recycling in EU+ (exkl. Sammlung)
Quelle: Fraunhofer ISI, Fraunhofer ISC 2021

DEUTSCHLANDS ANTEIL AM EUROPÄISCHEN BATTERIERECYCLING

- Eine **Quantifizierung der Recyclingmengen für Deutschland**, wie sie in der Untersuchung für Europa durchgeführt wurde, ist nur **begrenzt möglich**. Die **Vernetzung der deutschen Automobil-Gebrauchtmärkte mit anderen europäischen Ländern** ist sehr stark, ebenso finden Importe und Exporte von Schrotten in großem Umfang statt. Als Teil gesamteuropäischer Märkte wären die Unsicherheiten einer Quantifizierung für Deutschland extrem groß und somit nur bedingt aussagekräftig.
- Differenziert nach den unterschiedlichen Materialquellen für ein Batterierecycling kann die Rolle Deutschlands jedoch grob einsortiert werden. In den Szenarien des **Zell-**

produktionshochlaufs in Europa erlangt Deutschland **bis 2030 einen Anteil von 34 %** bei den angekündigten Kapazitäten etablierter Hersteller (Basis für Minimal-Szenario) und unter Hinzurechnung der Hälfte optional oder von neuen Herstellern angekündigten Kapazitäten **einen Anteil von 30 %** (Basis- und Maximal-Szenario).

- Unter der Annahme eines ortsnahe Recyclings der Abfallprodukte von Zellfabriken könnten damit gerade in den Jahren 2025 bis 2035 hohe Anteile der in Europa entstehenden Recyclingmengen in Deutschland verarbeitet werden. Die **in Deutschland anfallende Recyclingmenge aus der Zellproduktion** könnte dementsprechend **2030 zwischen 13 und 35 kt/a** und 2040 zwischen 17 und 51 kt/a ausmachen.¹⁷

RÜCKLAUF (KTONNEN) DE	2030		2040	
	min.	max.	min.	max.
Zell-, Packproduktion	13	35	18	51
xEV Pkw und Nfz	4	26	30	430
3C, ESS, eBikes, Scooter	2	17	3	62
Gesamt	19	78	51	543

Abbildung 12: Deutschlands Anteil am europäischen Batterierecycling
Quelle: Fraunhofer ISI, Fraunhofer ISC 2021

- Bezogen auf die Neuzulassungen von Pkw im Jahr 2020 besaß Deutschland **einen Anteil von 28 % am europäischen Markt**, bei **batterieelektrischen Pkw von 30 %** und bei **Plug-in-Hybriden** sogar von **40 %**.

Recyclingmengen lassen sich daraus **jedoch nicht direkt** ablesen, da eine Prognose des Verbleibs außer Verkehr gesetzter Fahrzeugbatterien aktuell noch nicht möglich ist. Es ist jedoch – analog zur Situation bei Verbrennern – davon auszugehen, dass ein signifikanter Anteil der in Deutschland neu zugelassenen Elektrofahrzeuge im Laufe ihres Lebens exportiert werden.

- Im **Falle kleinerer Batterieanwendungen** (Elektronik oder Micromobility) ist das Erreichen des **Lebensendes in Deutschland wahrscheinlich**. Eine Zuführung in die Sammelsysteme sollte daher lokal erfolgen. Dafür sprechen auch hohe Logistikkosten und ein hoher Aufwand

beim Gefahrgut Batterie. Gegenargumente finden sich in vergleichsweise hohen Lohn- und Energiekosten, was ein Schrottexport und Recycling in zum Beispiel osteuropäischen Ländern begünstigen würde.

- **Vergleichbare Standortfaktoren** finden sich auch in der Batteriezellfertigung. Für ein fortgeschrittenes und automatisiertes Batterierecycling ist der Aufbau einer entsprechenden Industrie in Deutschland nicht unwahrscheinlich. Am Ende könnten dafür nicht nur die Standortfaktoren, die die Schrottentstehung und das Recycling selbst betreffen, ausschlaggebend sein, sondern auch die **Nähe zu Abnehmern der Rezyklate**.
- Für Beschäftigungseffekte in Deutschland bedeutet dies eine Spanne von **circa 130 bis circa 470 Beschäftigten im Jahr 2030** und **circa 300 bis circa 3.300 Beschäftigten im Jahr 2040**.

¹⁷ Die Maximalabschätzung unterstellt, dass netto keine Schrotte und Fahrzeuge exportiert werden. Die Minimalabschätzung beinhaltet lediglich die Neuschrotte aus der Zellproduktion zu 100 % (keine Exporte), gebrauchte Batterien aus Fahrzeugen und anderen Anwendungen zu 20 % (80 % Export während oder nach Lebenszeit).

- Um eine Recyclingkapazität in Höhe von **19 bis 78 kt/a** (siehe Tabelle oben) zu erreichen, sind **Initialinvestitionen** in Höhe von **40 bis 160 Millionen Euro notwendig**. Eine Recyclingkapazität von **51 bis 543 kt/a**

(vgl. den Rücklauf in Deutschland im Jahr 2040) erfordert dagegen Initialinvestitionen in Höhe von circa **0,1 bis 1 Milliarde Euro**.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND IMPLIKATIONEN FÜR DEN STANDORT EUROPA UND DEUTSCHLAND

IMPLIKATIONEN FÜR DEN STANDORT EUROPA/DEUTSCHLAND

- Ausgehend von den Ergebnissen der Quantifizierung (siehe oben) lassen sich Handlungsempfehlungen und

Implikationen für den Standort Deutschland und Europa ableiten. Diese erstrecken sich über die Themenfelder **Marktentwicklung, regulatorische Bedingungen, ökologischer Fußabdruck** und **internationaler Wettbewerb**.

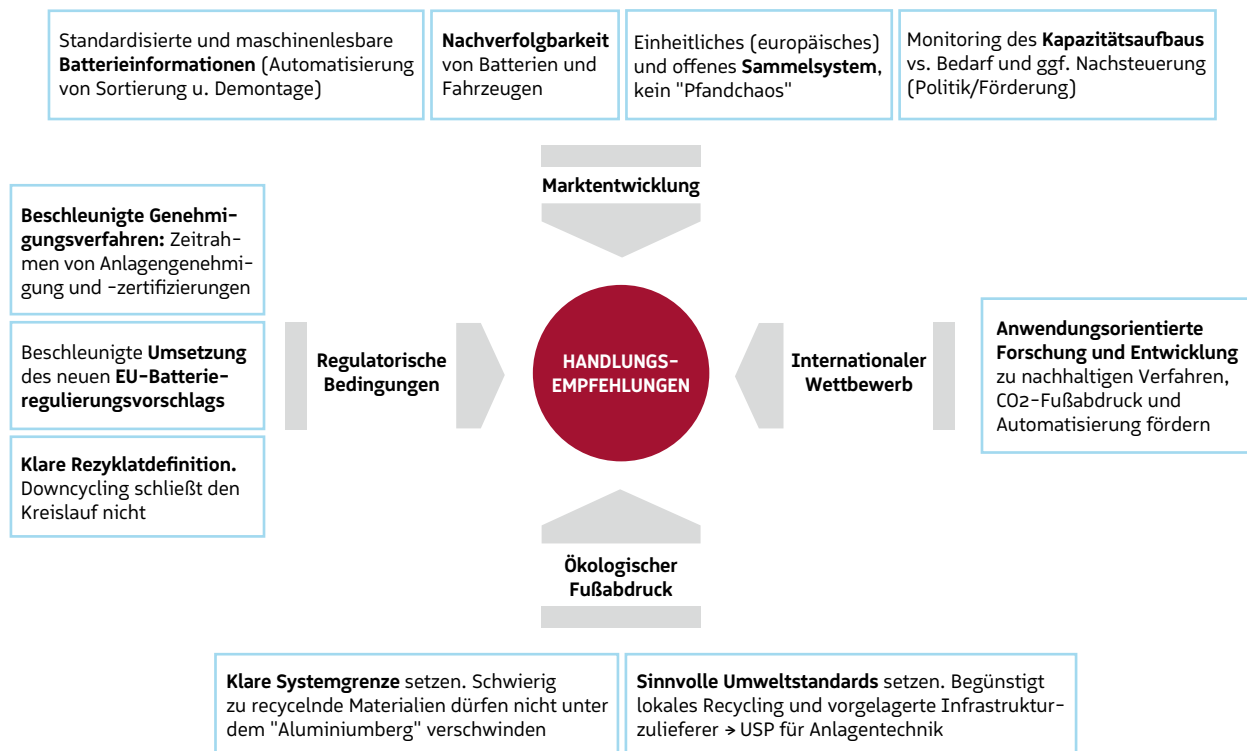


Abbildung 13: Handlungsempfehlungen
Quelle: Fraunhofer ISI, Fraunhofer ISC 2021

MARKTENTWICKLUNG

- Die Quantifizierung zeigt, dass **Altbatterien aus Elektronik und anderen 3C-Anwendungen** vor 2030 und **Neuschrotte aus der Batterieproduktion** vor 2035 noch einen **größeren Anteil am Recyclingaufkommen** ausmachen werden als der Rücklauf aus alten Fahrzeugbatterien. **Ab 2035** werden **alte Fahrzeugbatterien** den **weitaus größten Anteil** am Recyclingaufkommen ausmachen. **Für 2040** wird eine zu recycelnde **Batteriemenge von mehr als 1.000 kt/a** erwartet.
- Das für das **LIB-Recycling benötigte technische Know-how ist in Europa vorhanden** und es befinden sich Pilotanlagen unterschiedlicher Unternehmen mit einer Gesamtkapazität **von mindestens 33 kt/a Altbatterien in Betrieb oder in Planung**.

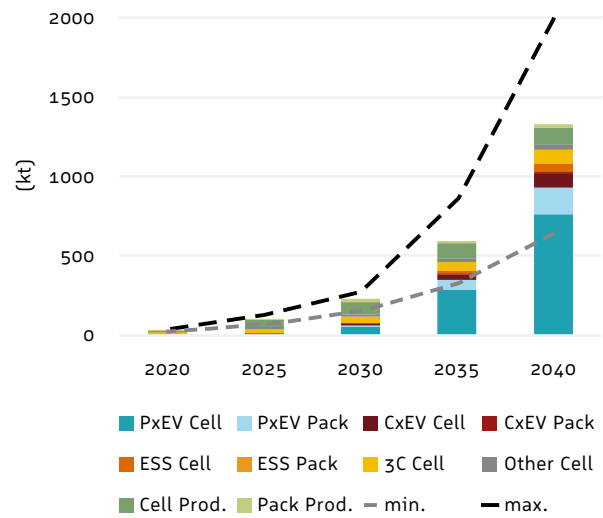


Abbildung 14: Rücklaufmenge LIB
Quelle: Fraunhofer ISI, Fraunhofer ISC 2021

- Das **Hochskalieren** dieser Verfahren ist möglich, sodass auch im **industriellen Maßstab große Mengen an LIB recycelt werden können**. Die derzeitigen **Kapazitäten** sind jedoch noch zu **niedrig**, um die in den nächsten Jahren auftretenden Recyclingmengen bewältigen zu können.
- Für den Betrachtungsraum EU+ wird ein **geschätzter (Initial-)Investitionsbedarf** im Recyclingbereich in einer **Größenordnung von etwa 3 Milliarden Euro** (kumuliert bis 2040) erwartet (Basis-Szenario, 0,6 bis 6 Milliarden Euro min./max.). Dadurch könnte ein Personalbedarf von **circa 8.000 Beschäftigten** (exklusive Sammlung) im **Jahr 2040** entstehen (Basis-Szenario, 3.000 bis 14.000 Arbeitsplätze min./max.).

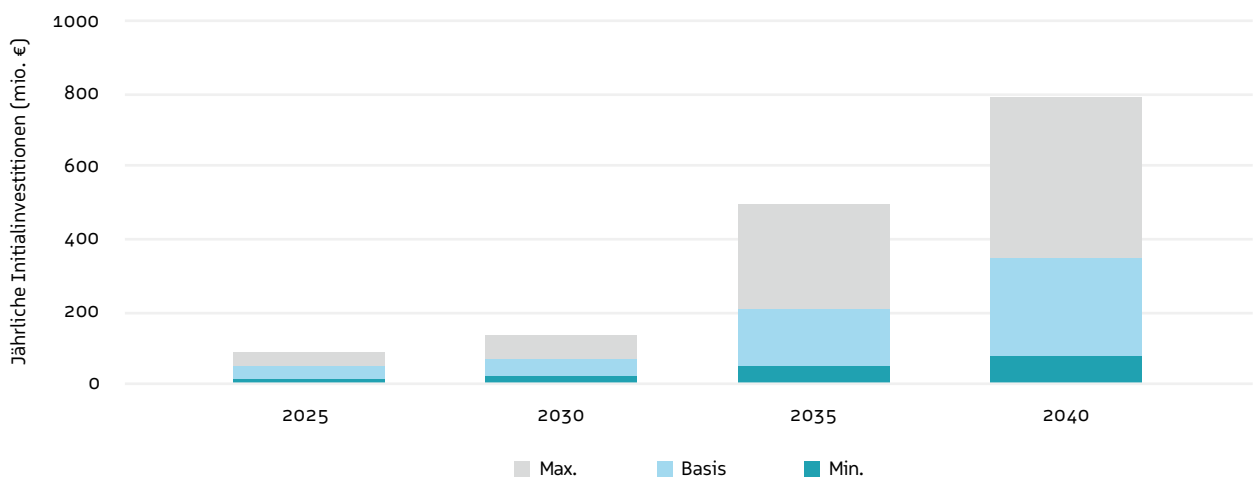


Abbildung 15: Initialinvestitionen zum Erreichen der nötigen Recyclingkapazität EU+
Quelle: Fraunhofer ISI, Fraunhofer ISC 2021

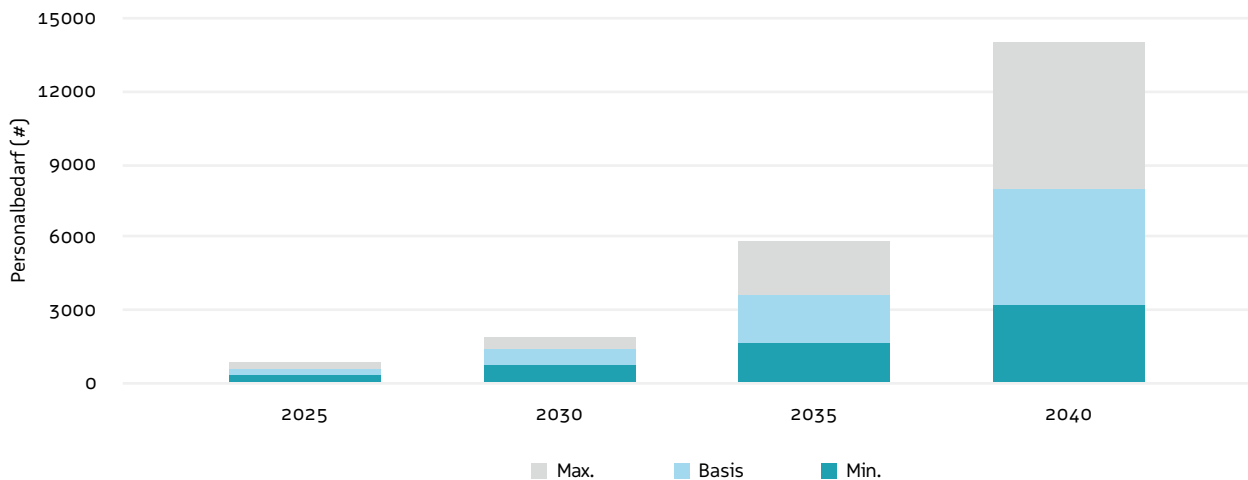


Abbildung 16: Personalbedarf Recycling in EU+ (exkl. Sammlung)
Quelle: Fraunhofer ISI, Fraunhofer ISC 2021

- Die Rohstoffnachfrage durch **die erwarteten steigenden Produktionszahlen von LIB in Europa** wird im Betrachtungszeitraum **nicht durch Rezyklate gedeckt werden können**, sodass die **primäre Rohstoffproduktion weiterhin von großer Bedeutung** sein wird.
- Mit einer Deckungsquote > 10 % der Nachfrage durch Zellproduktionen in Europa für Lithium, Nickel, Kupfer und von > 20 % für Cobalt sind die Rezyklatmengen aber **absolut signifikant**. Ein **lokales Recycling hätte damit einen signifikanten Einfluss** auf die Rohstoffverfügbarkeit in Europa. Eine hohe **Rohstoffverfügbarkeit** in Europa könnte wiederum die lokale Batteriematerialindustrie aktivieren und/oder stärken.
- Besonders der geforderte **Rezyklateinsatz in der Batterieproduktion** kann als starker Treiber für das Recycling wirken, da die erzeugte Nachfrage nach sekundären Batterierohstoffen zur Profitabilität der Recyclingaktivitäten beiträgt.
- Unklarheiten im Regulierungsvorschlag** bestehen jedoch darin, dass derzeit noch offen ist, worauf sich die geforderten Recyclingeffizienzen beziehen (Systemgrenze), das heißt, es wird möglicherweise Raum gelassen für „Pseudo-Recycling-Verfahren“ (zum Beispiel nur Recycling bis zur Schwarzmasse).
- Besonders **hohe Prozesskosten der Recyclingbetriebe** stellen derzeit noch **wirtschaftliche Hemmnisse** für das LIB-Recycling dar. Diese Kosten können erwartungsgemäß durch **steigendes Know-how** und **Skaleneffekte** in Zukunft reduziert werden. Weitere Hemmnisse bestehen durch lange und **aufwändige Genehmigungsprozesse**.
- Da die schnelle Transformation von Technologien nicht ohne Risiko erfolgt und der Anschub hier noch nicht stattgefunden hat, kann sich die **Kürzung von Abschreibungsfristen** im Fall der Brennstoffzellentechnologie als hilfreiches Instrument zur **Senkung der Investitionsschwelle** erweisen.

REGULATORISCHE RAHMENBEDINGUNGEN

- Mit dem Vorschlag der EU-Kommission zur Regulierung von Batterierecycling sollen **Wettbewerbsverzerrungen durch EU-weite Geltungsbereiche verhindert** werden. Eine **Due Diligence** legt außerdem die Verantwortlichkeiten für Sozial- und Umweltwirkungen der Batterieproduktion fest. Der Vorschlag umfasst den **gesamten Lebenszyklus der Batterie** von der Herstellung bis zur Entsorgung.

INTERNATIONALER WETTBEWERB

- Innerhalb Europas ist das nötige **Know-how und die für die industrielle Umsetzung** des LIB-Recyclings in relevanten Industriesparten wie dem Anlagenbau **vorhanden**. Der Aufbau einer Recyclingindustrie wird jedoch wesentlich von weiteren Standortfaktoren und Import-/Exportströmen von Fahrzeugen während ihrer Lebenszeit abhängen.
- Dabei ist es **wahrscheinlich**, dass **LIB-Recycling** vor allem aus **Sicherheits- und Transportkostengründen** bis zur Schwarzmasse **innerhalb Europas** stattfinden wird. Aus dem gleichen Grund ist jedoch auch mit einem niedrigen Import nach Europa zu rechnen.
- Ab der **Schwarzmasse könnte das Recycling stärker globalisiert** werden, da der spezifische Metallwert pro Masse steigt und es sich dabei nicht um Gefahrgut handelt. Nur lokale **Recyclingmöglichkeiten** würden jedoch auch für den **Logistikanteil des CO₂-Fußabdrucks** von Batterien Reduktionspotenziale eröffnen.
- In der Regel sind die Recyclingprozesse **hochautomatisierbar**¹⁸, weshalb **hohe Lohnkosten keine entscheidenden Standortnachteile** bedeuten müssen.
- Im **internationalen Vergleich ist heute China Weltmarktführer** mit den größten Recyclingkapazitäten. In den **USA** werden aktuell Möglichkeiten zur Stärkung eines **inländischen Batterierecyclings geprüft**. **Europäische und deutsche Regularien** stellen derzeit noch eine **Herausforderung** für Anlagenbauer oder **Betreiber aus China** dar, weshalb bisher von dieser Seite keine Wettbewerbsgefahr für die europäische Recyclingindustrie droht. Diese **besteht** derzeit eher durch den Export von in **Europa anfallenden Schrotten**.¹⁹

ÖKOLOGISCHER FUßABDRUCK

- Das Recycling von LIB stellt durch die **Komplexität** des **Batterieaufbaus**, die **Diversität** der enthaltenen **Rohstoffe** sowie die **Sicherheitsproblematik bei Transport, Lagerung und Recycling** durch die enthaltene Restenergie und **toxische Inhaltsstoffe** eine große **Herausforderung** dar.

- **Unterschiedliche Recyclingverfahren** werden voraussichtlich parallel weiterentwickelt und auch in Zukunft **nebeneinander existieren**. Da die Verfahren unterschiedliche Vor- und Nachteile aufweisen, wird sich vermutlich nicht die eine Recyclingtechnologie durchsetzen. Dennoch setzt ein **Großteil der in der EU angekündigten Recyclinganlagen auf die kalte Prozessroute**²⁰.
- **Wesentliche Faktoren** des ökologischen Fußabdrucks lassen sich nur im Fall eines **lokalen Recyclings kontrollieren**. So etwa der Logistikfußabdruck, die Kontrolle über den verwendeten Energie- und Strommix, das tatsächliche Erreichen geforderter Recyclingeffizienzen sowie die Einhaltung von Umwelt- und Arbeitsschutzaufgaben.
- Durch die **Verringerung des Imports von Rohstoffen** beziehungsweise durch die **vermehrte Nutzung von (einheimischen) Rezyklaten** können politische, soziale und ökologische Risiken in den wichtigsten Abbauländern in Afrika, Asien und Südamerika reduziert werden. Zudem stärkt eine lokale Verfügbarkeit von Rezyklaten auch deren **lokale Weiterverwendung**, das heißt die Materialindustrie in Europa. Auch hier gelten die genannten ökologischen Argumente zur **Verwendung grüner Energieträger**.

HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

POLITIK

Sowohl vonseiten der Batterieproduzenten und Automobilhersteller als auch vonseiten der entstehenden Recyclingindustrie besteht großes Interesse an der Etablierung einer Kreislaufwirtschaft für Batteriematerialien. Die Politik hat den Auftrag, geeignete Rahmenbedingungen zu setzen, welche wirtschaftlich tragfähige und ökologisch nachhaltige Recyclinggeschäftsmodelle ermöglichen.

- **Rechtssicherheit schaffen und beschleunigte Umsetzung des neuen EU-Batterieregulierungsrahmens vorantreiben:** In Europa positionieren sich viele Akteure mit Pilotanlagen und unterschiedlichen Recyclingverfahren. Die Umsetzung von Geschäftsmodellen richtet sich nach politischen Rahmenbedingungen, welche heute noch teilweise offen sind. Für die weitere Industrieentwicklung ist eine möglichst schnelle Schaffung

¹⁸ Diese Entwicklung hängt stark von den Standardisierungsbestrebungen der Produzenten ab (vgl. „Standardisierung vorantreiben“, S. 24).

¹⁹ Die Novellierung der Europäischen Richtlinie zu Batterien und Akkumulatoren wird ab 2022 konkrete Anforderungen wie Nachhaltigkeit, Sicherheit, Kennzeichnung, End-of-Life-Management etc. regulieren. Um Batterien in die Europäische Union exportieren zu können, müssen auch nicht europäische Batterieproduzenten diese Anforderungen beachten.

²⁰ Eine konstante Prozesskälte in Batterieproduktion und -recycling stellt eine wichtige Voraussetzung für effiziente Produktions- und Recyclingverfahren dar.

von Rechtsklarheit und Planungssicherheit geboten. Insbesondere sollten alle Regulierungsmaßnahmen möglichst klare Systemgrenzen setzen und eine tatsächliche Kreislaufführung von Ressourcen unterstützen. Eine einheitliche europäische Regulierung fördert die grenzüberschreitende Zusammenarbeit.

- **Nachhaltigkeit von Geschäftsmodellen gewährleisten:** Eine mögliche Regulierung der Batteriekreislaufwirtschaft sollte darauf abzielen, dass sich über alle Wertschöpfungsstufen hinweg der ökologisch nachhaltigste Prozess durchsetzt. Deshalb muss darauf geachtet werden, dass die gewählte Regulierung zwar hinreichend konkret ist, um die tatsächliche Kreislaufführung von Ressourcen sicherzustellen, die technologieoffene Entwicklung zukünftiger Technologiepfade und Geschäftsmodelle aber weiterhin möglich bleibt. Eine möglichst vollständige Kreislaufführung sollte auch wirtschaftlich attraktiv sein. Die Geschäftsmodelle, die sich unter anderem aus den regulativen Rahmenbedingungen ergeben können, sollten auch in Zukunft tragfähig sein, das heißt selbst bei sich verändernden Batteriezellchemien (zum Beispiel LFP) oder schwankenden Rohstoffpreisen.
- **Markthemmnisse abbauen:** Neue Geschäftsmodelle zur Verwertung genutzter Batterien können zusätzliche ökonomische und ökologische Potenziale heben. Um diese zu ermöglichen, sollten Hemmnisse, zum Beispiel die Informationsverfügbarkeit zu Batteriekonstruktion und Materialien oder den Zustand der Batterie (State of Health/State of Charge) betreffend, abgebaut werden. Die Zugänglichkeit von Batterie Nutzungsdaten sollte für die Bewertung der Batteriesicherheit und Tauglichkeit für Second-Life-Anwendungen gegeben sein. Gerade für die schnelle Reaktion auf dynamisch wachsende Märkte sollten Zulassungs- und Zertifizierungsprozesse für Anlagen und Verfahren effizienter gestaltet sein.
- **Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Batterierecyclingindustrie ermöglichen:** Um die Versorgung mit Altbatterien im Inland sicherzustellen, sollte die Verschiffung von ebendiesen (und der Zwischenprodukte des Recyclings) zur Behandlung und zum Recycling in Länder außerhalb der EU verhindert werden, wenn in diesen Ländern keine „gleichwertigen Bedingungen“ für diese Prozesse gelten (siehe Entwurf EU-Battery Regulation). Es sollten daher möglichst schnell, auf Grundlage der europäischen Umwelt- und Sozialstandards, einheitliche Kriterien zur Anwendung innerhalb der EU entwickelt werden. Darüber hinaus muss ein wirksamer Kontroll- und Durchsetzungsmechanismus zur Sicherstellung dieser „gleichwertigen Bedingungen“ eingerichtet werden.
- **Monitoring einführen:** Die heute angekündigten Recyclingkapazitäten genügen nicht, um mittelfristig eine Kreislaufführung aller Batteriematerialien zu gewährleisten. Die tatsächliche Entwicklung der Recyclingkapazitäten sollte daher durch geeignete Monitoringprogramme begleitet werden. Diese können Aufschluss darüber geben, ob der Markt schnell genug auf die dynamische Entwicklung der Batterierücklaufmengen reagiert oder ob gegebenenfalls seitens der Politik, zum Beispiel durch Investitionsanreize, nachgesteuert werden müsste.
- **Umwelt- und Effizienzstandards setzen und verbessern:** Verpflichtende Umweltstandards bei der Behandlung von Batterien und Vorgaben zu Recyclingeffizienzen bilden einen Mindestrahmen, welcher den nachhaltigen Umgang mit zum Teil kritischen Batteriematerialien gewährleisten soll. Darüber hinaus sollten sinnvolle Zielvorgaben dazu beitragen, Verfahren weiter zu verbessern, um zum Beispiel auch den CO₂-Fußabdruck des Recyclings selbst zu verkleinern. Die CO₂-Einsparung in der Logistik könnte unter anderem durch die Etablierung eines europäischen Demontagenetzwerks unterstützt werden. Weitere Verbesserungen könnten durch die Berücksichtigung von Materialien im Recyclingprozess, welche nach heutigem Stand der Technik einem Downcycling oder der thermischen Verwertung zugeführt werden, erfolgen.
- **Rückgabe und Sammlung beobachten:** Batterien besitzen einen hohen Materialwert. Damit bestehen in Zukunft bei geklärten Besitzverhältnissen auch entsprechende Anreize, gebrauchte Batterien einem Sammelsystem zuzuführen, falls Endkund:innen am monetären Restwert der Batterie beteiligt werden. Maßnahmen wie etwa die Einführung von Pfandsystemen stellen einen zusätzlichen Verwaltungsaufwand für die beteiligten Akteure dar und sollten nur dann in Erwägung gezogen werden, falls die marktgetriebene Zuführung gebrauchter Batterien zu Sammelsystemen versagt oder die Rückgabe aufgrund eines geringen Materialwerts der Batterien unattraktiv wird. Die Nachverfolgbarkeit von Batterien sollte in jedem Fall gewährleistet sein, um unsachgemäßen Verbleib zu verhindern.
- **Forschung und Entwicklung fördern:** Die europäische Recyclingindustrie verfügt über weitgehendes Know-how aus der Behandlung und Verwertung vielfältiger Abfallströme und ist damit gut auf die Etablierung eines LIB-Recyclings vorbereitet. Zur langfristigen Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit ist es wichtig, die Wirtschaftlichkeit von hoch effizienten und ökologisch

nachhaltigen Verfahren weiter zu verbessern, auf zukünftige Batterietechnologien anzupassen und somit den USP europäischer Technologie und eines europäischen Recyclings zu erhalten. Dies kann über die gezielte Förderung von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben, insbesondere zu den Themen Automatisierung, Skalierung und Nachhaltigkeit, erreicht werden. Themen wie die Passfähigkeit von Verfahren zu zukünftigen Materialsystemen und Batteriekonzepten sollten frühzeitig adressiert werden. Neben gezielten Technologieentwicklungen sollte auch der Austausch zwischen Industrie und Forschung im Sinne einer Nutzbarmachung gesammelter Praxiserfahrungen gestärkt werden.

INDUSTRIE

- Marktentwicklung nutzen:** Der zukünftige Recyclingmarkt ist groß und wächst schnell.²¹ Bis 2040 könnte in Europa Bedarf für etwa 50 große LIB-Recyclinganlagen (25 kt/a) entstehen. Ein frühzeitiger Einstieg ist sinnvoll, um rechtzeitig Logistik-Netzwerke und Lieferbeziehungen aufzubauen sowie notwendiges Know-how zu erlangen.
 - Partnerschaften eingehen:** Ein Einstieg ins Recyclinggeschäft kann heute insbesondere in Partnerschaft mit den entstehenden europäischen Zellfertigungen gelin-
- gen. Die Aufbereitung von Produktionsresten wird bereits in den kommenden Jahren signifikant an Bedeutung gewinnen.
- Effiziente Technologien kommerzialisieren:** Entscheidungen zu zukünftigen Recyclingtechnologien sind noch nicht getroffen. Für innovative, effiziente („grüne“) und automatisierbare Technologien ist viel Platz im Markt. Im Hinblick auf Nachhaltigkeits- und CO₂-Vorgaben einer möglichen Regulierung sollte in neuen Projekten auf möglichst material- und energieeffiziente Verfahren gesetzt werden. Grundvoraussetzungen für deren wirtschaftlichen Erfolg ist die Skalierbarkeit in den „Kilotonnen-pro-Jahr“-Maßstab.
 - Standardisierung vorantreiben:** Die Effizienz von Recyclingprozessen von der Batteriedemontage bis hin zum Rezyklat wird entscheidend von den Automatisierungsmöglichkeiten abhängen. Standardisierte und maschinenlesbare Batterieinformationen können die Batteriebewertung und die Steuerung von Recyclingprozessen erleichtern. Kennzeichnungen und standardisierte Demontagevorgaben können die Automatisierung von Sortierung und Demontage vorantreiben. Industrielle Akteure sollten in den gängigen Standardisierungsgremien entlang der gesamten Wertschöpfungskette herstellerübergreifende Standards definieren, welche eine hohe Effizienz des Gesamtsystems Recycling gewährleisten.

²¹ 15 % bis 20 % durchschnittliche jährliche Wachstumsrate.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1	Material-/Wertstrommodell – Modelllogik	8
Abbildung 2	Materialbedarf Zell- und Packproduktion	9
Abbildung 3	Prozessschritte der Batterieproduktion	10
Abbildung 4	Batterierecycling in Europa – Zusammenfassung Rücklaufmengen	12
Abbildung 5	Rücklaufmenge LIB	12
Abbildung 6	Anteile Rücklaufmenge LIB	13
Abbildung 7	Effizienz Zellrecycling	13
Abbildung 8	Rezyklatmenge europäisches Recycling	14
Abbildung 9	Materialwert Rezyklate Metalle/Materialien	15
Abbildung 10	Initialinvestitionen zum Erreichen der nötigen Recyclingkapazität EU+	16
Abbildung 11	Personalbedarf für Recycling in EU+ (exkl. Sammlung)	17
Abbildung 12	Deutschlands Anteil am europäischen Batterierecycling	18
Abbildung 13	Handlungsempfehlungen	19
Abbildung 14	Rücklaufmenge LIB	20
Abbildung 15	Initialinvestitionen zum Erreichen der nötigen Recyclingkapazität EU+	20
Abbildung 16	Personalbedarf Recycling in EU+ (exkl. Sammlung)	21

ANHANG

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BEV	Battery Electric Vehicle (Batterieelektrisches Fahrzeug)
3C	Computing, Consumer, Communication
A	Annum (Jahr)
EL	Electrolyte (Elektrolyt)
ESS	Energy Storage System (Stationäres Energiespeichersystem)
EU+	Betrachtungsraum Europäische Union, Großbritannien, Norwegen und die Schweiz
GWH	Gigawatt Hours (Gigawattstunden)
KT	Kilotons (Kilotonnen)
KWH	Kilowatt Hours (Kilowattstunden)
LFP	LiFePO ₄
LIB	Lithium-Ionen-Batterie
LLO / HE-NMC	Li-Rich Layered Oxide / High Energy NMC (hier als Synonym verwendet für Li-Überschuss-Materialien)
LMNO	Li(Mn,Ni) ₂ O ₄
NCA	Li(Ni,Co,Al)O ₂
NFZ / CV	Nutzfahrzeug / Commercial Vehicle
NG	Natural Graphite (Graphit aus dem Bergbau)
NMC	Li(Ni,Mn,Co)O ₂
OTHER	Andere Materialien, je nach Kontext zum Beispiel passive Zellkomponenten oder Kunststoffe
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle (Plug-in-Hybridfahrzeug)
PKW	Personenkraftwagen
SG	Synthetic Graphite (Synthetisches Graphit)
USP	Unique Selling Proposition (etwa: Alleinstellungsmerkmal)
XEV	Electric Vehicle (Elektrofahrzeuge ohne Angabe der genauen Antriebstechnologie)

QUELLENVERZEICHNIS

Bernhart, W. et al. (2020): Rising opportunities for battery equipment manufacturers, Roland Berger Report.

Circular Economy Initiative Deutschland (Hrsg.) (2020): Ressourcenschonende Batteriekreisläufe – mit Circular Economy die Elektromobilität antreiben. acatech/SYSTEMIQ, München/London.

Europäische Kommission (2020): Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL concerning batteries and waste batteries, repealing Directive 2006/66/EC and amending Regulation (EU) No 2019/1020.

Fraunhofer ISI, Fraunhofer ISC (2021): Projektbericht „Quantifizierung Batterierecycling“, A. Bittner, A. Flegler, C. Neef, L. Rostek, D. Stijepic, L. Tercero Espinoza, A. Thielmann, Fraunhofer ISI und Fraunhofer ISC, 2021

Kwade, A.; Bärwaldt, G. (2012): LithoRec. Recycling von Lithium-Ionen-Batterien. URL:https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/publications/abschlussbericht-lithorec_1.pdf [zuletzt aufgerufen am 06.07.2021]

Marklines Co. Ltd. (2021): Automotive Industry Portal. URL: <http://www.marklines.com> [zuletzt aufgerufen am 06.07.2021]

Mayyas, A.; D. Steward; Mann, M. (2018): The case for Recycling: Overview and challenges in the material supply chain for automotive li-ion batteries, Sustainable Materials and Technologies 17.

NPM AG 4 (2021): Bericht Quantifizierung Batterieproduktion URL: https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/?post_type=2download&p=13617 [Stand: Oktober 2021].

Smekens, J. et al (2016): Influence of Electrode Density on the Performance of Li-Ion Batteries: Experimental and Simulation Results, Energies, 9(2), S. 104.

Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) (2020): Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030 – Update 2020.

IMPRESSUM

VERFASSER

Nationale Plattform Zukunft der Mobilität,
Arbeitsgruppe 4 „Sicherung des Mobilitäts- und Produktionsstandortes,
Batteriezellproduktion, Rohstoffe und Recycling, Bildung und Qualifizierung“,

September 2021

HERAUSGEBER

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI)

REDAKTIONELLE UNTERSTÜTZUNG

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften
ifok GmbH

SATZ UND GESTALTUNG

ifok GmbH

LEKTORAT

Nikola Klein – e-squid text konzept lektorat

Die Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (NPM) ist per Kabinettsbeschluss von der Bundesregierung eingesetzt und wird vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur federführend koordiniert. Sie arbeitet unabhängig, überparteilich und neutral.



