



**NATIONALE PLATTFORM ZUKUNFT DER MOBILITÄT
- FOKUSGRUPPE WERTSCHÖPFUNG DER AG 4 -**

**KURZVERSION STUDIE „QUANTIFIZIERUNG BATTERIERECYCLING“
FRAUNHOFER ISI, PROJEKTLAUFZEIT 03/2021 – 07/2021**

Quantifizierung Batterierecycling – Inhalt

1. **Executive Summary**
2. Batteriemärkte und Batterieanwendungen in Europa
3. Die Batteriewertschöpfungskette und Modellannahmen
4. Ergebnisse: Recycling in Europa
 1. 4.1 Quantifizierung der Recyclingmengen
 2. 4.2 Quantifizierung von Investitionen und Beschäftigung
5. Zusammenfassung und Implikationen für den Standort Europa / Deutschland

Executive Summary

Hintergrund

- In Deutschland und Europa sollen in den kommenden Jahren Batterieproduktionskapazitäten im Umfang mehrerer 100 GWh/a aufgebaut werden, welche die Große Nachfrage nach Batterien für die Elektromobilität decken sollen. Daraus ergeben sich große Herausforderungen bei der Versorgung mit kritischen Rohstoffen zur Produktion von Lithium-Ionen-Batterien.
- Begleitend, jedoch verzögert zum Markthochlauf der Elektromobilität und dem Aufbau von Batterieproduktionskapazitäten, wird sich in Europa eine Recyclingindustrie für Lithium-Ionen Batterien 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 Materialkreislaufes geboten und wird zur Zeit durch politische Initiativen flankiert und im Sinne von Sammel- und Recyclingquoten regulatorisch vorbereitet.
- Bereits heute befinden sich zahlreiche Recycling-Pilotinitiativen im Aufbau oder in Betrieb, obwohl sich die Materialmenge aus alten Elektrofahrzeugen oder Neuschrotten der Batterieproduktion aktuell nur in niedrigen zweistelligen Kilotonnen-Bereich pro Jahr bewegen dürfte. Technologisch stehen für das Recycling bereits heute verschiedene Verfahren zur Verfügung, welche jedoch noch nicht auf einer industriellen „GWh-Skala“ implementiert sind. In Zukunft müssen jedoch genau solche Recyclinginfrastrukturen aufgebaut werden, welche die großen Batteriemengen aus dem Rücklauf der ersten und zweiten Generation an Elektrofahrzeugen bewältigen können.
- Die vorliegende wissenschaftliche Untersuchung adressiert die folgenden Forschungsthemen:
 1. Quantifizierung der erwarteten Menge an End-of-Life-Batterien sowie der Anteile für Batterierecycling und Second-Life bis 2040
 2. Quantifizierung der erwarteten zusätzlichen Materialflüsse aus Batterieproduktionsausschüssen
 3. Abschätzung der benötigten Investitionen und der Personalbedarfe in Europa für ein Batterierecycling

Executive Summary

Quantifizierung Batterierecycling

- In der vorliegenden Untersuchung wurde ein Material- und Wertstrommodell für die Inverkehrbringung, Nutzung und das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien entwickelt und auf einen europäischen Betrachtungsraum parametrisiert und ausgewertet. Unter Einbeziehung von Import/Export-Effekten, einem möglichen "2nd-life" für Traktionsbatterien, politischen Rahmenbedingungen und der technologischen Weiterentwicklung von Recyclingverfahren wurden drei Szenarien für das zukünftige Aufkommen von Recyclingmengen die damit verbundenen Investitionen in Recyclinginfrastruktur und Arbeitplatzeffekte aufgestellt.
- Bis zum Jahr 2040 dürfte die jährliche, dem europäischen Recycling zugeführte Materialmenge, bei deutlich über 1.000 Kilotonnen liegen. Durch Recyclingverfahren mit hoher Effizienz und Rückgewinnungsrate könnte damit – basierend auf heutigen Rohstoffpreisen – ein Wertpotenzial von etwa 5 Mrd. Euro gehoben werden. Die dafür nötigen Investitionen in Recyclinganlagen kumulieren sich bis 2040 auf etwa 2,7 Mrd. Euro. Der Personalbedarf einer entsprechenden Recyclingindustrie läge bei etwa 8.000 Personen im Jahr 2040.
- Die im Rahmen der Untersuchung aufgestellten Annahmen und Berechnungen unterliegen hohen Unsicherheiten hinsichtlich regulativen Rahmenbedingungen, Technologieentscheidungen und Marktentwicklungen. Die aufgestellten Minimal- und Maximalszenarien spiegeln die Bandbreite der möglichen zukünftigen Entwicklung wider und sortieren die quantitativen Ergebnisse ein.

Quantifizierung Batterierecycling – Inhalt

1. Executive Summary
2. **Batteriemärkte und Batterieanwendungen in Europa**
3. Die Batteriewertschöpfungskette und Modellannahmen
4. Ergebnisse: Recycling in Europa
 1. 4.1 Quantifizierung der Recyclingmengen
 2. 4.2 Quantifizierung von Investitionen und Beschäftigung
5. Zusammenfassung und Implikationen für den Standort Europa / Deutschland

Der europäische Betrachtungsraum (EU+)

Märkte und Produktionsstandorte für Batterieanwendungen

- Für die im Rahmen der Untersuchung durchgeführten Quantifizierungen wurde ein europäischer Betrachtungsraum gewählt. Um alle Hauptmärkte und wesentlichen Produktionsstandorte für Batterien und Batterieanwendungen mitberücksichtigen zu können, wurden die quantitative Analysen für die Europäische Union sowie für die Länder Großbritannien, Norwegen und Schweiz (hier "EU+") durchgeführt.
- Neben dieser Markt- und Produktionssicht erlaubt die Wahl dieses relativ großen Betrachtungsraums auch die Annahme, dass der überwiegende Anteil der neu zugelassenen Elektrofahrzeuge bis zum Lebensende innerhalb der EU+ verbleibt und nicht noch während der Nutzungsphase ins weitere Ausland exportiert wird.
- Deutschland nimmt als Automobilstandort aber auch als zukünftiger Batterieproduktionsstandort eine wichtige Position im gewählten Betrachtungsraum ein. So kamen knapp 30% der in 2020 in der EU und Großbritannien hergestellten PKW aus deutscher Produktion (VDA2020). Auch bei den Neuzulassungen lag der Anteil Deutschlands bei knapp 25% (Marklines).
- Die Ankündigungen für den Aufbau von Zellproduktionskapazitäten belaufen sich für Deutschland bis 2030 auf insgesamt 276 GWh (Europa 989 GWh)*. Deutschland dürfte sich also auch in diesem Bereich zu einem der wichtigsten Standorte in Europa entwickeln.



Der europäische Betrachtungsraum (EU+)

Politische Rahmenbedingungen und EU-Regulierung

- Zahlreiche politische (und gesetzliche) Rahmenbedingungen spielen bei der Etablierung eines europäischen/deutschen E-Mobilitätsbatterierecyclings eine Rolle:
 - Arbeits- und Umweltschutzbestimmungen, Lohnnebenkosten, (Aufbau von) Handelsbeziehungen zu relevanten Partnerländern (insbesondere rohstoffliefernden Ländern und potentiellen Recyclern), politische Maßnahmen/Rahmenbedingungen in diesen Partnerländern, Altfahrzeug-/Batteriedirektive und deren Umsetzung, Subventionspolitik (oder sonstige finanzielle Unterstützung der Recycler von Seiten des Staates), etc.
- Der Regulierungsvorschlag für das Europäische Parlament und den Europäischen Rat hinsichtlich Batterien und Altbatterien (kurz: „EU-Batterieregulierungsvorschlag“) – EU (2020) stellt die neueste Entwicklung in diesem Bereich dar. Darin werden:
 - Recyclingeffizienzen (Rohstoffausbeute) beim Batterierecycling (siehe Tabelle „Recyclingeffizienzen“)
 - Mindesteinsatzmengen von Rezyklaten in Batterien (siehe Tabelle „Mindesteinsatzmengen“)und bestimmt Informations-/Berichts- oder Sorgfaltspflichten mit Bezug zu Umwelt- und Sozialauswirkungen der Produktion/Rohstoffgewinnung (u.a. Batteriepass, Carbon Footprint und Due Diligence) vorgegeben.
- Für die Hersteller kommt damit (zu der Rücknahmepflicht für Altbatterien) mehr Verantwortung hinsichtlich der Vermeidung der negativen Umwelt- und Sozialauswirkungen der Batterieproduktion hinzu.

Recycling-effizienzen (%)	2025	2030
LIB gesamt	65	70
Kobalt	90	95
Nickel	90	95
Lithium	35	70
Kupfer	90	95

Mindest-einsatzmengen (%)	2030	2035
Kobalt	12	20
Nickel	4	12
Lithium	4	10

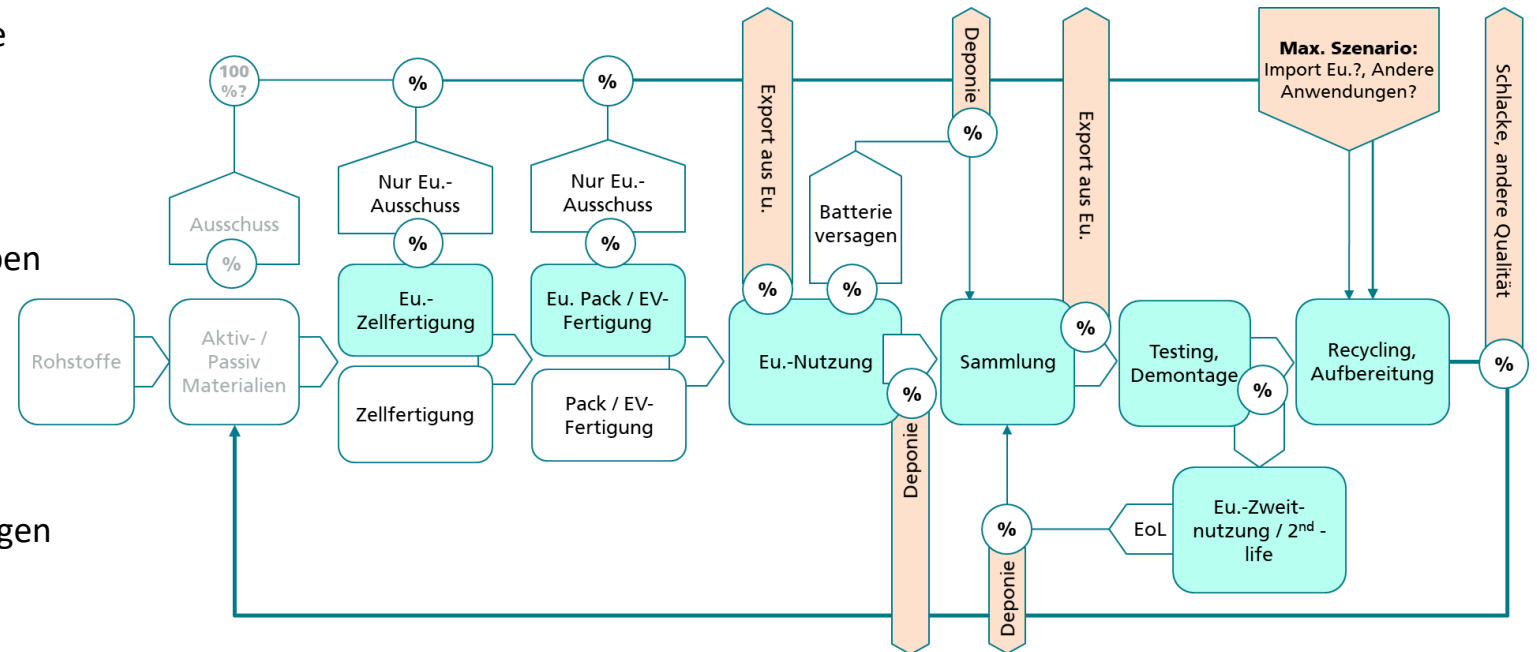
Quantifizierung Batterierecycling – Inhalt

1. Executive Summary
2. Batteriemärkte und Batterieanwendungen in Europa
- 3. Die Batteriewertschöpfungskette und Modellannahmen**
4. Ergebnisse: Recycling in Europa
 1. 4.1 Quantifizierung der Recyclingmengen
 2. 4.2 Quantifizierung von Investitionen und Beschäftigung
5. Zusammenfassung und Implikationen für den Standort Europa / Deutschland

Material-/Wertstrommodell

Modelllogik

- Das Modell zur Quantifizierung von Recyclingmengen und den entsprechenden Investitionen und Beschäftigungseffekten deckt wesentliche Schritte der Batteriewertschöpfungskette ab (siehe Grafik). 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.
- Da die aufgeführten Schritte in unterschiedlichen Regionen erfolgen können, sind die Materialflüsse stark durch jeweilige Export- und Importströme beeinflusst. Weiter beschreiben Quoten oder Effizienzen mögliche Material- und Wertverluste, welche durch Limitierungen technischer Prozesse oder unsachgemäße Behandlung / Verbleib gegeben sein können.
- Der Betrachtungszeitraum ist von heute (2020/21) bis 2040 gewählt.
- Der Betrachtungsraum ist die Europäische Union erweitert um die Länder Großbritannien, Norwegen und Schweiz: EU+ (EU27, UK, NO, CH).



Material-/Wertstrommodell

Modelllogik und Einflussfaktoren

- 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 Experten aus Industrie und Forschung.
- Wesentliche und heute noch nicht abschließend zu klärende Fragen sind:
- **Marktwachstum und europäische Produktion:** Wie hoch wird das Volumen der Batterieproduktionen in Europa tatsächlich sein? Welche europäische Nachfrage nach Batteriematerialien entsteht und welche Produktionsausschüsse resultieren daraus?
- **Gebrauchtfahrzeugmärkte:** Werden sich die Ströme gebrauchter Elektrofahrzeuge ähnlich zu Verbrennern entwickeln und damit einen hohen Transfer der in Batterien gebundenen Rohstoffe außerhalb Europas bewirken oder führt der möglicherweise verzögerte Ausbau von Ladeinfrastruktur außerhalb Europas zum Verbleib von Elektrofahrzeugen im Binnenmarkt?
- **Kosten im europäischen In- und Ausland:** Während das Sammeln außer Verkehr gesetzter Fahrzeuge am Ort ihrer letzten Nutzung, und damit zum Teil auch in Europa, geschehen muss, könnten spätere Schritte der Recyclingkette aus Kostengründen außerhalb Europas stattfinden. Dies betrifft insbesondere Prozessschritte, bei denen keine Gefahrgutaufgaben mehr bestehen.
- **Umsetzung von Regulierungsvorhaben:** Wie schnell und wie streng werden Regulierungsvorhaben auf europäischer Ebene umgesetzt? Führen mögliche Quoten tatsächlich zu einem innereuropäischen Recycling oder können diese ebenso durch Importe von Rezyklaten aus anderen Teilen der Welt erfüllt werden?

Batterieproduktion in Europa

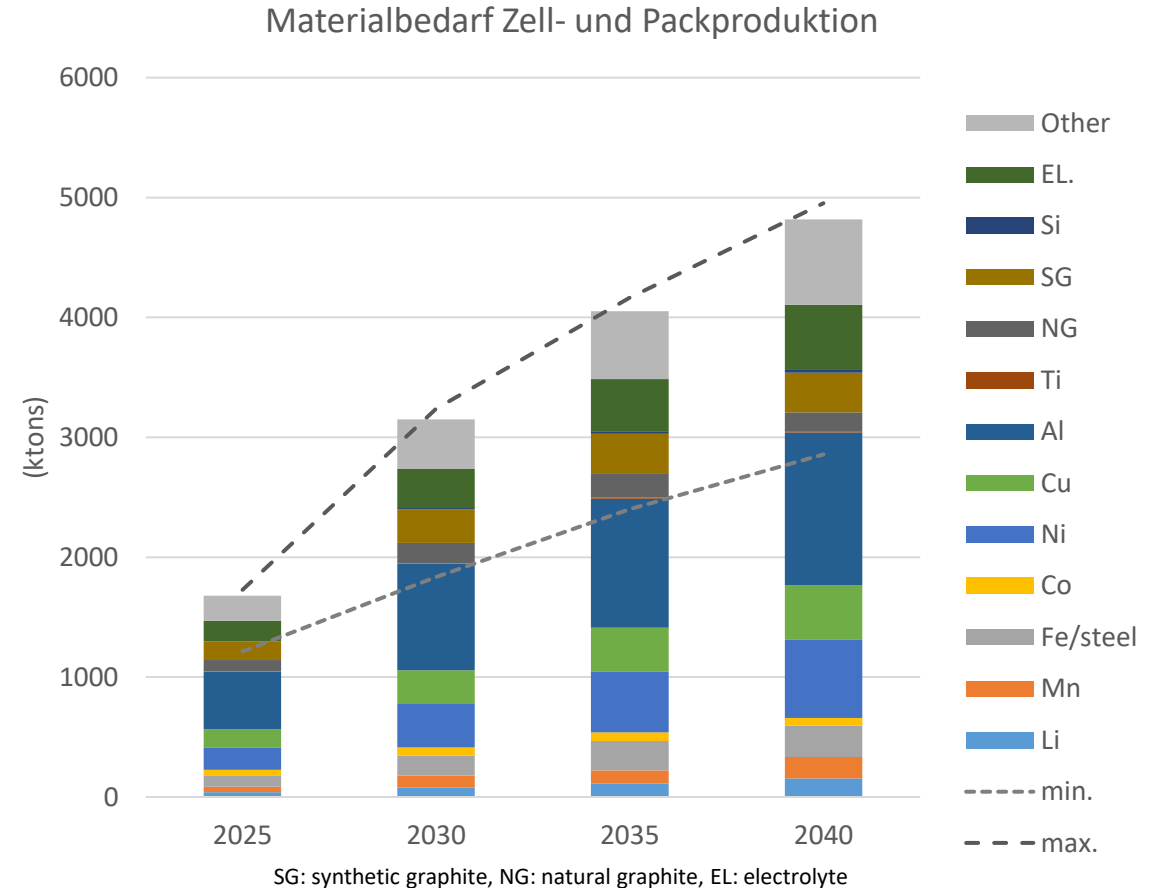
Kapazitäten und Entwicklung von Zellchemien

- Die Annahmen zu Produktionsmengen für Batterien in Europa orientieren sich an Ankündigungen internationaler Hersteller zum Aufbau von Produktionskapazitäten. Demnach könnten die Batteriezellproduktionskapazität in Europa bis 2030 400 bis 700 GWh/a betragen (VDMA2020, siehe auch Bericht der NPM AG4 zur Batterieproduktion, 2021).
- Für das Recycling bzw. für den Wert der Rezyklate entscheidend sind die in der Batterie verbauten Komponenten. Eine Trendanalyse verschiedener Marktanalysten (B3, P3, Roskill, F&S, BMI, Avicenne, IHS) für den globalen LIB-Kathodenmarkt weist auf zukünftig steigende Anteile Ni-reicher Materialien hin. Dies betrifft insbesondere die Verwendung Ni-reicher NMC- und NCA-Materialien, welche den größten Anteil des Kathodenmaterialbedarfs ausmachen könnten (hier: 70% zwischen 2030 und 2040). LFP könnte mittelfristig in der Anwendung im EV-Niedrigpreissegment an Bedeutung gewinnen, insbesondere, falls sich die "cell to pack" Konzepte der chinesischen Hersteller am Markt durchsetzen können (hier: 10% in 2030 auf 3% in 2040). Jenseits 2030 könnten weitere Zellchemien in den Markt kommen, wie z.B. Mn-basierte Materialien wie $\text{Li}(\text{Mn},\text{Ni})_2\text{O}_4$ (LMNO) oder Li-Überschuss-Oxide (LLO) (hier 7% in 2030 auf 20% in 2040).
- Anodenseitig stellen Graphite nach wie vor das Material der Wahl dar (hier: 80% in 2030 auf 45% in 2040). Zukünftig wird von einem Übergang zu Si-haltigen Anodenkompositen ausgegangen (Anteil metallisches Si am Anodenmaterialmix 15% in 2030 auf 25% in 2040). Zudem könnten ab 2030 Batteriezellen mit Li-Metall-Anoden genutzt werden (hier: 5% in 2030 auf 30% in 2040), z.B. in Feststoffbatteriezellen.
- Für den Materialbedarf auf Packebene (zusätzlich zur Zelle noch Gehäuse, Kühlung, Kabel) wurden Annahmen aus Dai2018 übernommen. Neben Kupfer, Stahl und Kunststoffen besteht dabei insbesondere eine hohe Nachfrage nach Aluminium, da dieses Material für die Konstruktion von Packgehäusen verwendet wird. Für die zeitliche Entwicklung des Bedarfs wurde eine zunehmende Implementierung sogenannter "cell to pack" Konzepte angenommen, welche den Ressourcenaufwand reduziert.

Batterieproduktion in Europa

Materialbedarf für die Zell- und Packproduktion

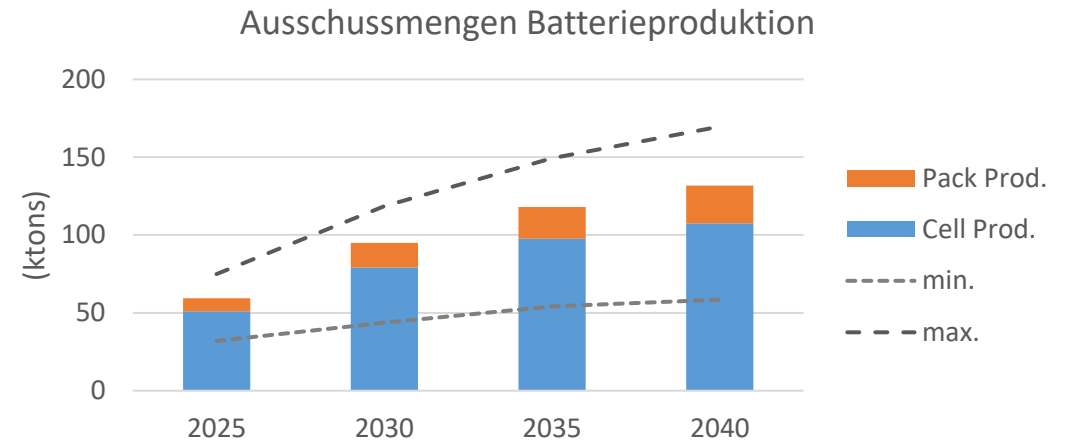
- Aus den Szenarien zum Aufbau von Zellproduktionskapazitäten und den Annahmen zu verwendeten Materialien für Elektrode, Zelle und Pack ergibt sich ein Materialbedarf in der Produktion von 3.000 (Min.-Szenario) bis hin zu 5.000 (Basis-/Max.-Szenario) Kilotonnen in 2040.
- Den größten Gewichtsanteil nimmt dabei Aluminium ein, welches 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.



Batterieproduktion in Europa

Ausschuss und Quantifizierung des Materialrücklaufs zum Recycling

- Bei der Batteriezellproduktion treten prozessinherente Abfälle auf, wie z.B. Slurryreste mit Aktivmaterialien aus Mischprozess, Folien mit teilweise 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. Für die Quantifizierung wurden mit Ausbeuten von 85 bis 90% heute und 90 bis 95% 2040 angenommen (vgl. auch Bernhart2020).
- Es ist davon auszugehen, dass die Ausschussraten in der Hochlaufphase (hier angenommen: 6 Monate) neuer Zellfabriken noch deutlich über denen einer optimierten und eingefahrenen Produktion liegen dürften. Dies betrifft insbesondere die Jahre bis 2030, in denen einige Projekte von Herstellern umgesetzt werden könnten, die heute noch über wenig Erfahrungen in der industriellen Zellproduktion verfügen. Für die Jahre nach 2030 wird mit einem Übergang zu einer hocheffizienten Produktion ausgegangen (Ausbeute erste 6 Monate heute 65 bis 80% und 85% in 2040).
- Im Gegensatz zu gebrauchten Batterien aus unterschiedlichsten Anwendungen fallen diese Neuschrotte an definierten Orten an und könnten einem lokalen Recycling zugeführt werden.



Batterie-Inverkehrbringung in Europa

Elektrofahrzeuge

- Für die Inverkehrbringung und Nutzung von Elektrofahrzeugen wurden verschiedene Annahmen gewählt:
- Die Inverkehrbringung in Europa orientieren sich an den Produktionsszenarien 37,5% EV und 55% EV der NPM), welche bis 2030 ein Verhältnis von 70:30 für BEV:PHEV unter den Elektrofahrzeugen annehmen. Die Szenarien besitzen gute Übereinstimmung mit den Prognosen der International Energy Agency (IEA2021). Die Fahrzeuglebensdauern wurden an Verbrennern (max.) bzw. Garantieangaben für Elektroautos (min.) orientiert. Die Batteriegröße (kWh/Fzg.) richtet sich nach Analysen der Fraunhofer ISI LIB-Datenbank.
- 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 ggf. 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. Für LKW sind nochmals deutlich höhere Quoten typisch. Für die Annahme von maximalen Exportquoten für Elektrofahrzeuge wurde ein Anstieg von heute 0% (Ergebnisse Interviews) auf die verbrennertypischen Werte bis 2040 angenommen. Durch diesen graduellen Anstieg und die angenommene Lebensdauer der Fahrzeuge spielen die Exportquoten für Gebrauchtfahrzeuge bis 2040 nur eine untergeordnete Rolle.
- Nach ihrem Lebensende müssen die Batterien, bzw. die jeweiligen Anwendungen einem Sammelsystem zugeführt werden. Dazu wurde angenommen, dass 95% aller in Europa außer Dienst gestellten Elektrofahrzeuge in einem entsprechenden System landen. Weiter wurde eine Quote von 10 bis 20% für die Weiternutzung von im Sammelsystem erfassten EV-Batterien in 2nd-life Anwendungen angenommen (Lebensdauer dort: 6 Jahre). Für den Export gesammelter und nicht einer 2nd-life Anwendung zugeführter Batterien wurden zeitlich konstante Quoten von 10 bis 50% angenommen (Kwade2020). **Diese Exportraten wirken sich stark auf die Quantifizierung der Recyclingmengen in Europa aus.**

Batterie-Inverkehrbringung in Europa

Andere Batterieanwendungen (3C, ESS, Scooter)

- Europäische Marktanteile für weitere Batterieanwendungen und damit die Inverkehrbringung von Batterien neben Elektrofahrzeugen wurden über Marktstudien abgeschätzt.
 - Der Anteil des europäischen Smartphonemarktes entspricht so z.B. etwa 25% des Weltmarkts (Statista2020). Für den gesamten "3C" Elektronik und Konsumerbereich (d.h. Elektronik, Computer, Haushalts- und Powertools und weitere) wurden globale Marktprognosen verschiedener Analysten ausgewertet. Für den Anteil Europas an der Nachfrage wurden 25% angenommen. Die Bandbreite der Analystenprognosen erlaubt zudem die Aufstellung von Min./Max.-Szenarien. (BMI, BNEF, Roskill, Avicenne)
 - Stationäre Batteriespeicher (ESS) haben heute an der globalen LIB-Nachfrage einen eher geringen Anteil. Laut Analystenmeinungen dürfte die globale Nachfrage bis 2030 jedoch in den dreistelligen GWh-Bereich ansteigen. Für den europäischen Marktanteil wurden 17,5% angenommen. (BMI, Yole, Yano, Roskill, BNEF)
 - Im Bereich eBikes dürften Verkäufe in Europa etwa ein Drittel des globalen Marktes ausmachen (Mordorintelligence2020). Bei anderen Scooter oder Mobilitätsanwendungen dürfte der europäische Marktanteil niedriger liegen. Entsprechend wurde für diese Studie ein europäischer Marktanteil von 25% an Micromobility Anwendungen angenommen. (VDMA2020)
- Für die Nutzungszeit wurde eine Lebensdauer von 8 Jahren, nach der Nutzung eine Sammelquote von 80% angenommen (vgl. auch Mayyas2018).
- Für den Export gesammelter Batterien aus den genannten Anwendungen 3C, ESS und Micromobility wurden zeitlich konstante Quoten von 10 bis 50% angenommen (Kwade2020). **Diese wirken sich stark auf die Quantifizierung der Recyclingmengen in Europa aus.**

Batterierecycling in Europa

Minimal-, Maximal- und Basis-Annahmen

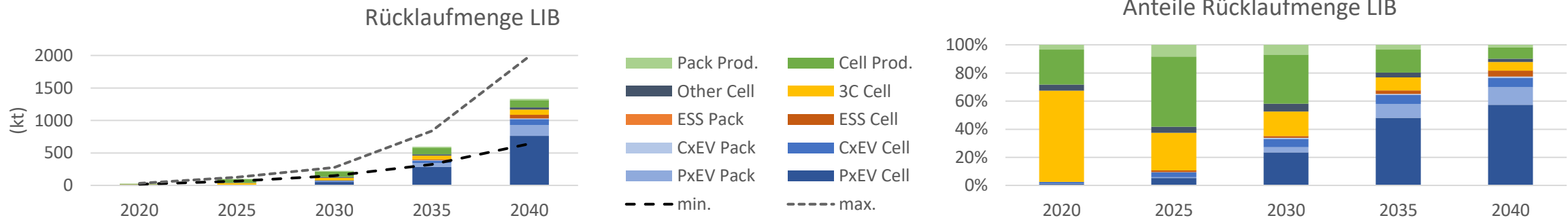
- In allen Schritten des Materialstrommodells wurden Minimal- und Maximalannahmen getroffen.
- Für die Erzeugung von zwei Extremszenarien wurden jeweils begünstigende oder vermindernde Faktoren für das Aufkommen von Recyclingmengen in Europa kombiniert. So z.B. die schnelle Marktdiffusion von Elektrofahrzeugen und eine kurze Lebensdauer der Fahrzeuge bzw. Batterie. Durch diese Extremkombination ist die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten des Minimal- oder Maximalszenarios für die Recyclingmengen unwahrscheinlich, beide Szenarien stellen somit quantitative Grenzen für die zukünftige Entwicklung dar.
- Das Basis-Szenario, welches auf Kombinationen des Minimal- und Maximalszenarios beruht, bildet eine nach unserem Kenntnisstand wahrscheinliche Zukunftsentwicklung ab.

Szenario	xEV Hochlauf	xEV Lebensd.	Exportraten xEV	2 nd -life für xEV Batt.	Wachstum andere Anwend.	Exportraten Schrotte	Zellprod. in Europa	Ausschuss Zellprod.
Minimal, geringer Rohstoffverbrauch, geringes Recyclingvolumen	37,5% EV-Szenario	lang	hoch	häufiger	gering	hoch	nur etabl. Hersteller	gering
Basis	55% EV-Szenario	moderat					etabl. und 50% neue Hersteller	moderat
Maximal, hoher Rohstoffverbrauch, hohes Recyclingvolumen		kurz	niedrig	selten	hoch	niedrig		hoch

Batterierecycling in Europa

Zusammenfassung Rücklaufmengen zum europäischen Recycling

- Pack-Ebene. Mengenangaben nach Abzug von Sammelverlusten und Exporten. Balken zeigen das Basis-Szenario.



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

Batterierecycling in Europa

Modellparameter für Recyclingeffizienzen

- Aus den Interviews und der Literaturrecherche gesammelte quantitative und qualitative Werte werden genutzt, um die Modellparameter für das Minimal- und Maximal-Szenario zu ermitteln.
- Die in der Tabelle gegebenen Recyclingeffizienzen beziehen sich ausschließlich auf den Recyclingprozess selbst und entsprechen im Maximalszenario der Anwendung der besten verfügbaren Recyclingtechnologie.
- Der Fokus des heutigen und zukünftigen LIB-Recyclings liegt auf den teuren und tw. kritischen Metallen Nickel, Kobalt und Kupfer.
- Das Recycling des enthaltenen Lithiums und Aluminiums ist derzeit mit technischen und daraus folgenden ökonomischen Schwierigkeiten verbunden, in Zukunft wird dennoch mit hohen Recyclingraten gerechnet.
- Die weniger versorgungskritischen Rohstoffe mit niedrigerem Wert wie Mangan, Graphit/Kohlenstoff sowie Kunststoffe werden voraussichtlich auch in Zukunft eher dem Downcycling oder der thermischer Verwertung zugeführt, sodass diese auch bis 2040 niedrige Recyclingraten aufweisen werden.

Effizienz Zellrecycling	2020 min	2020 max	2040 min	2040 max
Lithium	0	0	85	90
Kobalt	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. Produkt ionsausschuss	0	0	10	50
Polymere	0	0	0	0

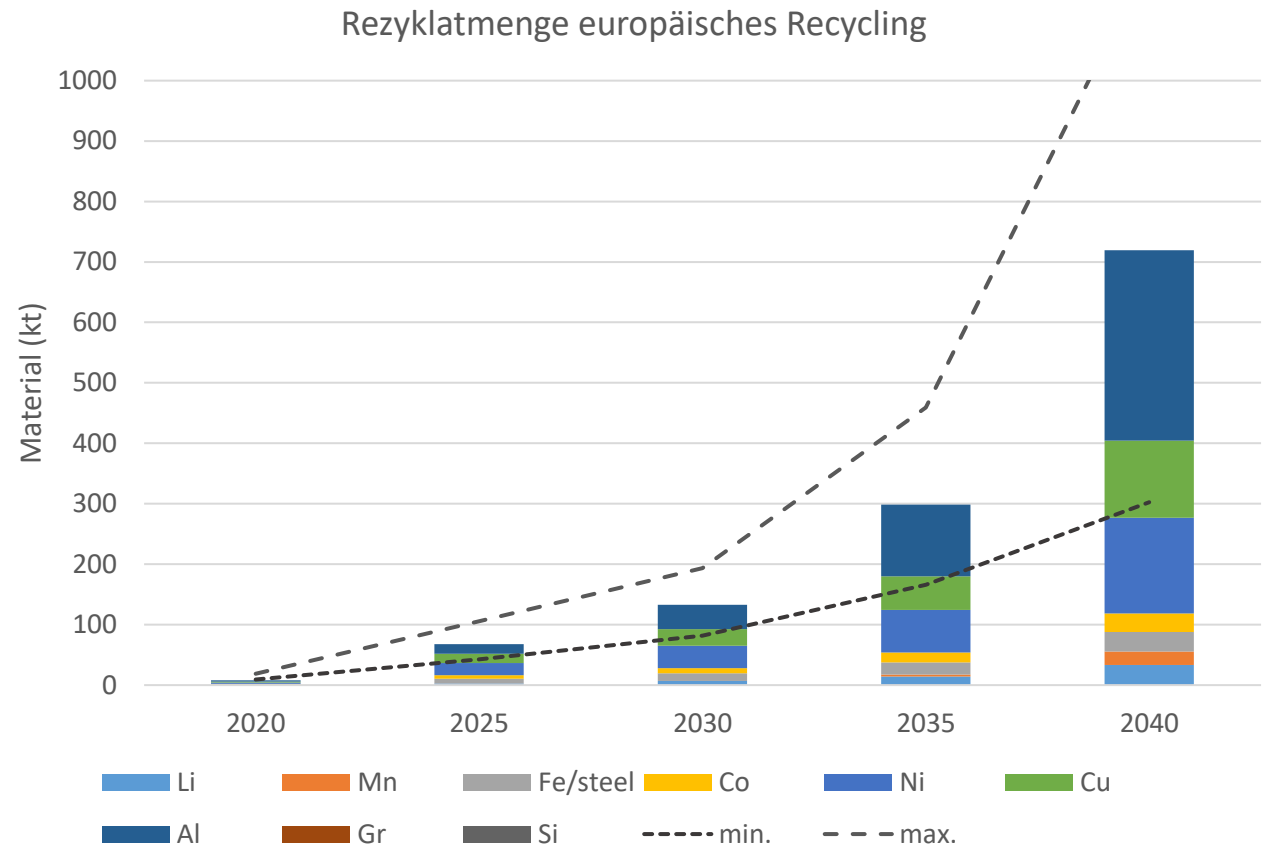
Quantifizierung Batterierecycling – Inhalt

1. Executive Summary
2. Batteriemärkte und Batterieanwendungen in Europa
3. Die Batteriewertschöpfungskette und Modellannahmen
4. **Ergebnisse: Recycling in Europa**
 1. **4.1 Quantifizierung der Recyclingmengen**
 2. 4.2 Quantifizierung von Investitionen und Beschäftigung
5. Zusammenfassung und Implikationen für den Standort Europa / Deutschland

Batterierecycling in Europa

Menge der rückgewonnenen Metalle

- Unter Annahme entsprechender Recyclingeffizienzen und der Szenarien für Rücklaufmengen (Abschnitt 3) ergeben sich die in der Grafik angegebenen Rezyklatmengen für ausgewählte Metalle und Materialien.
- Die hohe Menge für Aluminium ergibt sich aus den Annahmen hoher Aluminiumanteile für Batteriemodule und –packs.
- 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 oder wird thermisch verwertet oder besitzt nach Abschluss der Prozesse eine untaugliche Qualität.



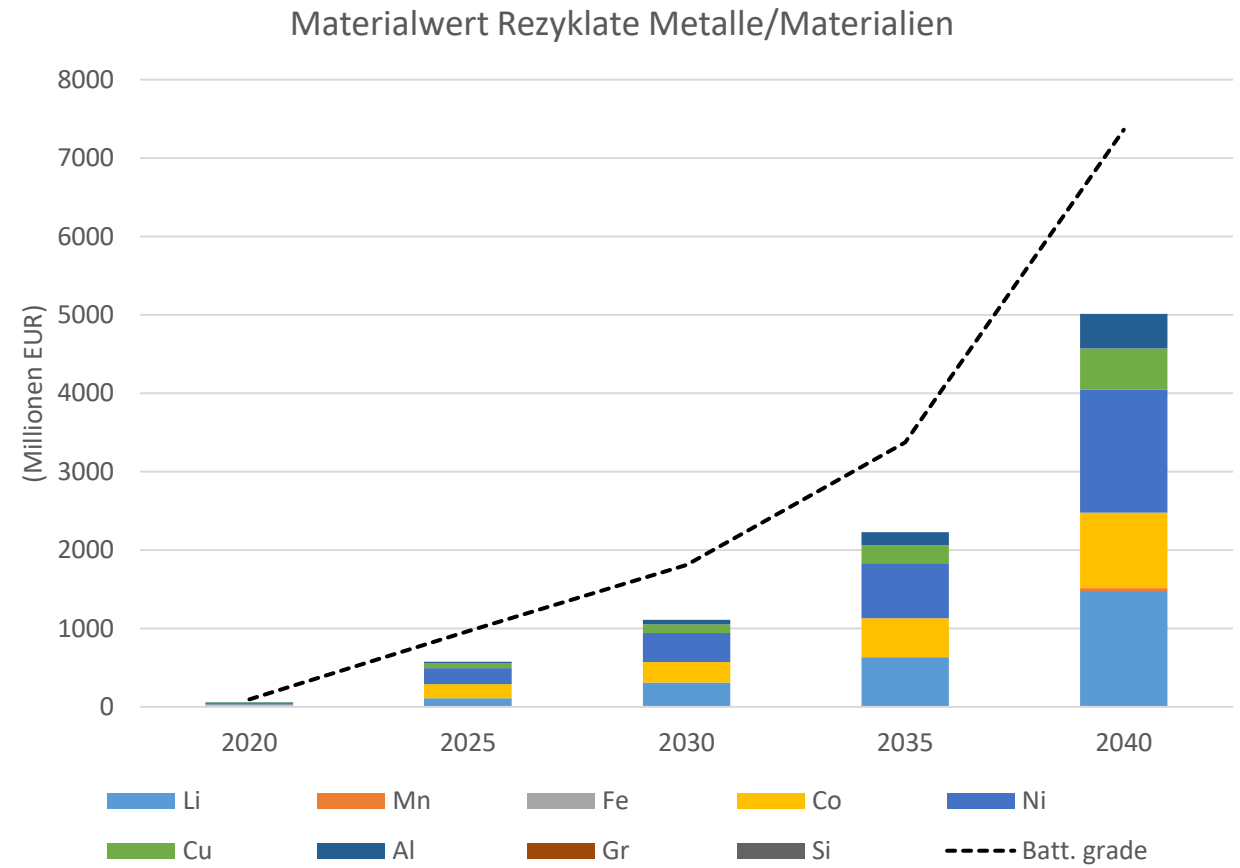
Batterierecycling in Europa

Wert der rückgewonnenen Metalle

- Auf Basis mittlerer Rohstoffpreise für 2020 nach Angaben der LME und anderer Quellen beläuft sich der Wert der Rezyklate im Basis-Szenario für das Jahr 2040 auf 5 Milliarden Euro. (Minimalszenario: 2,1 Mrd. Euro, Maximalszenario: 8,3 Mrd. Euro)
- Für Metallverbindungen in Batteriequalität könnten entsprechend höhere Erlöse erzielt werden (Skizziert auf Basis von Preisunterschieden für 2020).

Li: 53 \$/kg, Mn: 2,1 \$/kg, Co 37,5 \$/kg, Ni 12 \$/kg, Cu 5 \$/kg,
Al 1,7 \$/kg, Rohgraphit 0,9 \$/kg, Si 1,8 \$/kg. 1\$ ~ 0,82 €

Roskill2020, BMI2020

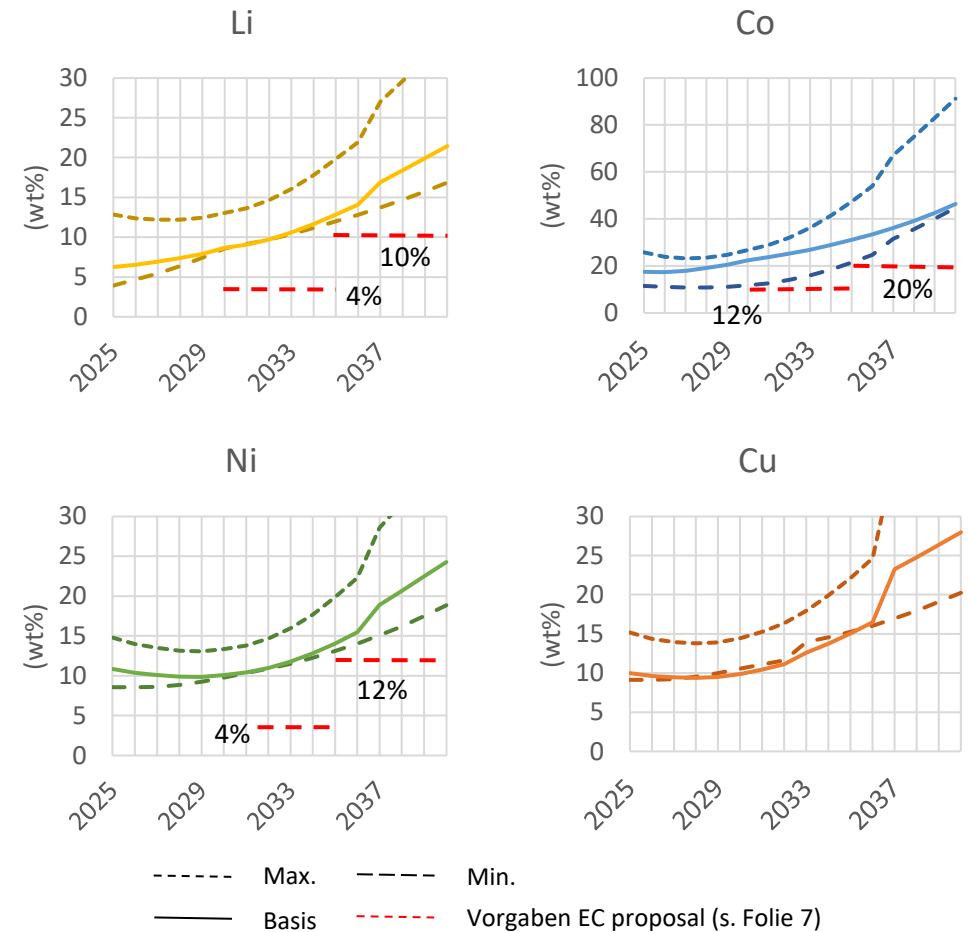


Batterierecycling in Europa

Vergleich mit dem Rohstoffbedarf der Batterieproduktion

- Annahme: Die in Europa erzeugten Rezyklate dienen ausschließlich der Produktion von Batteriematerialien für die europäischen Zellproduktion.
- Die Grafiken zeigen die mögliche Nachfragedeckung des Rohstoffbedarfs für neue Batteriematerialien in den Extremszenarien Min./Max. und dem Basis-Szenario (durchgezogene Linie).
- Da die Min. und Max.-Szenarien Kombinationen aus geringem Marktwachstum und geringem Aufbau europäischer Produktionskapazitäten, bzw. hohem Wachstum und hohem Ausbau darstellen, ähneln sich die Deckungsszenarien / Ergebnisse.
- Die durch die EU-Regulierung vorgeschlagenen Quoten könnten somit trotz der im Rahmen dieser Untersuchung hohen Exportquoten für Fahrzeuge und Schrotte erreicht werden.
- Voraussetzung hierfür ist das Recycling und die Anrechnung als Rezyklat der in der Zellproduktion anfallenden Neuschrotte in Europa mit geringer zeitlicher Verzögerung.

Bedarfsdeckung Batterierohstoffe durch Rezyklate



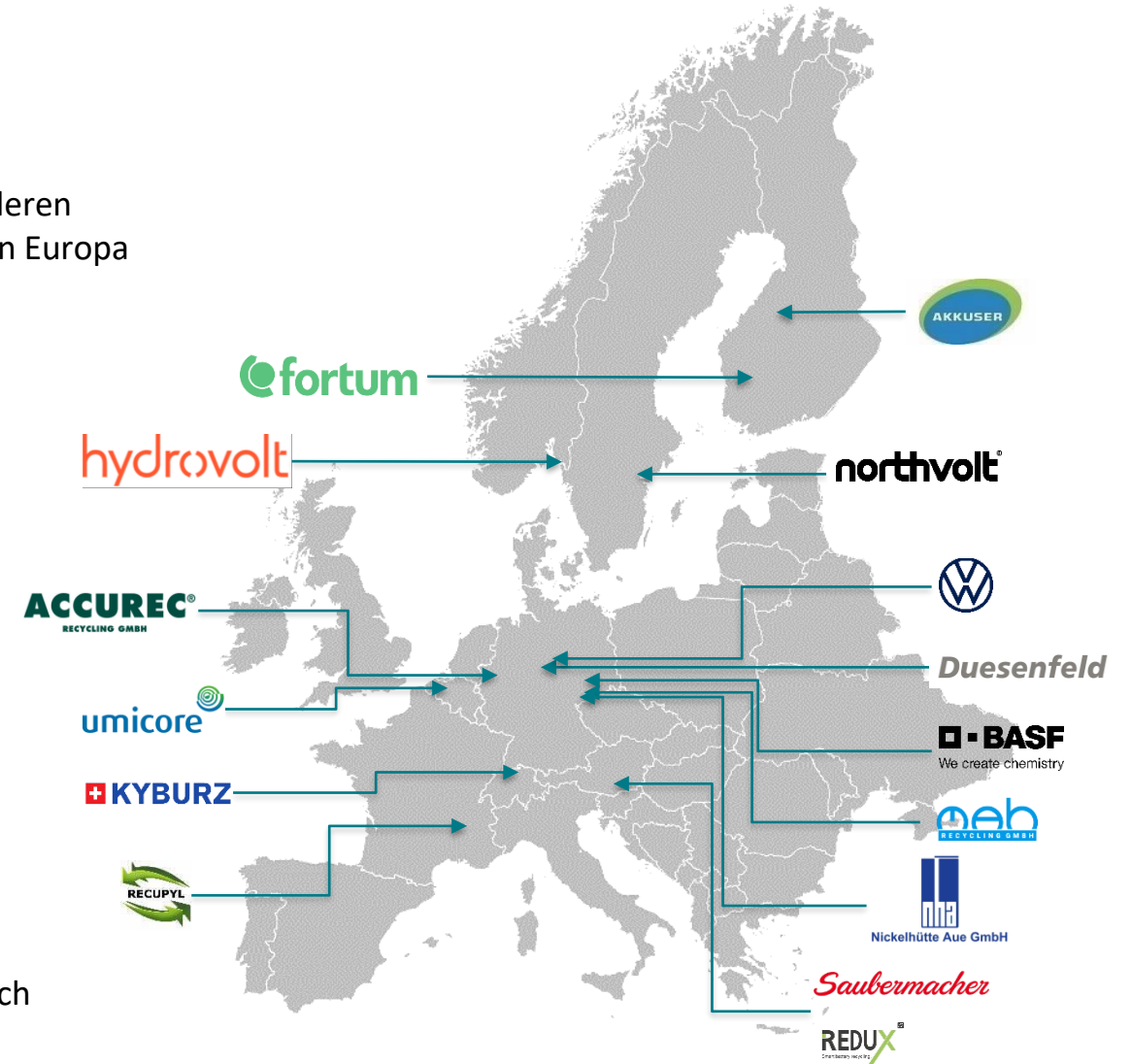
Quantifizierung Batterierecycling – Inhalt

1. Executive Summary
2. Batteriemärkte und Batterieanwendungen in Europa
3. Die Batteriewertschöpfungskette und Modellannahmen
4. **Ergebnisse: Recycling in Europa**
 1. 4.1 Quantifizierung der Recyclingmengen
 2. **4.2 Quantifizierung von Investitionen und Beschäftigung**
5. Zusammenfassung und Implikationen für den Standort Europa / Deutschland

Batterierecycling

LIB Recyclinganlagen in Europa

- Bereits heute engagieren sich zahlreiche Akteure in Europa (und auch in anderen Regionen der Welt, insb. Asien) im Bereich LIB-Recycling. Die Mehrzahl der in Europa in Betrieb befindlichen oder entstehenden Anlagen sind Pilotanlagen.
- Die Grafik verortet einige der operativen oder konkret geplanten Recyclinganlagen. Die angekündigten Recyclinganlagen entsprechen einer Gesamtkapazität von 33.000 t/a (Summe der bekannten / angekündigten Kapazitäten).
- Zusätzlich zu den gezeigten Anlagen gibt es zahlreiche Forschungsprojekte sowie Vorhaben, zu welchen keine Standortinformationen verfügbar sind.
- Die meisten Anlagen produzieren Schwarzmasse durch mechanische Aufbereitung, welche 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 Initialinvestitionen liegt im Bereich 1 bis 8 Mio. €/kt/a).



Quantifizierung Investitionen und Beschäftigung

Vorgehensweise

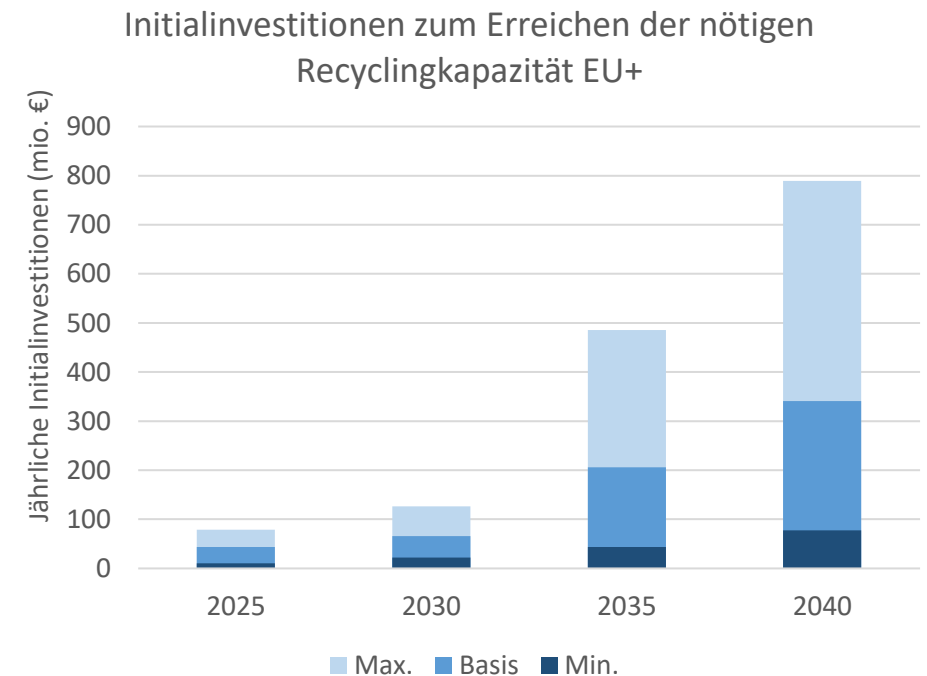
- Der Vergleich der angekündigten Recyclinganlagen von etwa 33 kt/a zum prognostizierten Bedarf für europäische Recyclingkapazitäten von etwa 100 kt/a in 2025 auf etwa 1.300 kt/a in 2040 zeigt, dass die Größenordnung der angekündigten Anlagen deutlich unter dem zukünftigen Bedarf liegt.
- Um den zusätzlichen Investitionsbedarf für weitere Recyclinganlagen und die damit verbundenen Arbeitplatzeffekte abzuschätzen, wurden Annahmen auf Basis von Experteninterviews abgeleitet (Maximal-, Minimal- und Basis-Szenario).
- Grundsätzlich sind Investitions- und Arbeitsplatzprognosen für ein Land bzw. eine Region (mit langem Zeithorizont) herausfordernd und mit einer gewissen Vorsicht zu betrachten, da die zukünftigen Investitionsvolumina von vielen schwer prognostizierbaren technologischen und wirtschaftlichen (sogar makroökonomischen) Faktoren abhängen.
- Auf Basis der Interviews wurde festgelegt, dass 1 bis 3 Mio. Euro an (Initial)Investitionen und 5 bis 7 Arbeitsplätze pro kt jährliche Recyclingkapazität erforderlich sein werden.
 - Entspricht eher dem Aufbau/Ausbau industrieller Anlagen mit relativ hohen Kapazitäten
 - Die zeitliche Entwicklung des Automatisierungsgrads und damit ggf. einer Reduktion der Arbeitplatzeffekte wurde nicht explizit abgebildet.
- Dass aufgebaute Anlagen/Investitionen/Recyclingkapazitäten nicht unverändert bestehen, sondern erneuert werden müssen (mittels Reinvestitionen) kann durch Angabe von Abschreibungssätzen verdeutlicht werden (z.B. Kwade2012, 5% Abschreibung p.a.).



Investitionsschätzung: Ergebnisse

Batterierücklauf aus xEV und allen LIB-Anwendungsgebieten

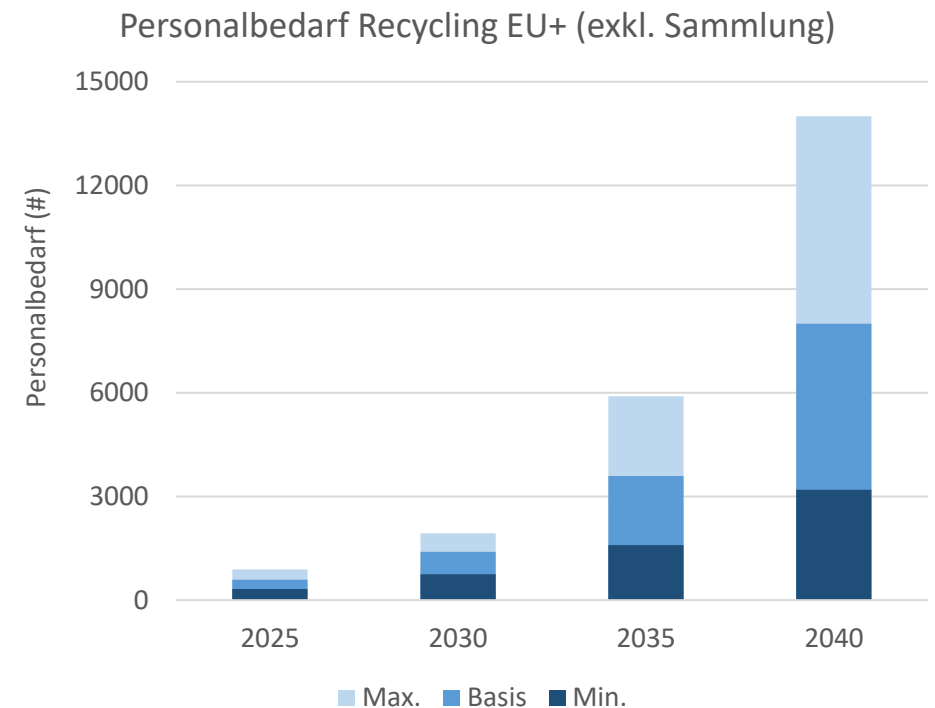
- Das Recycling von Batterien aus den betrachteten LIB-Anwendungsgebieten (xEV, ESS, 3C, Micromobility) inklusive der Ausschüsse europäischer Zellproduktionen erfordert den Aufbau einer Recyclinkapazität zwischen 600 und 2.000 kt/a bis 2040. Die dafür nötigen **Initialinvestitionen** kumulieren sich auf ca. **2,7 Mrd. Euro bis zum Jahr 2040** (Spannbreite ca. 0,6 Mrd. Euro (Min.-Szenario) bis ca. 6 Mrd. 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 aus.
- Die zeitliche Entwicklung des Investitionsbedarfs für die Jahre 2025 bis 2040 ist in der Grafik abgebildet. Dabei sollte berücksichtigt werden, dass die Investitionen zum Teil Jahre früher anfallen, d.h. im Verlauf des Aufbaus der Recyclinginfrastrukturen und nicht, wie hier angenommen, erst zu deren Inbetriebnahme.
- Neben den Initialinvestitionen kann bei einem Abschreibungssatz von 5% von **Reinvestitionen** in die Infrastrukturen ausgegangen werden, welche sich **bis 2040 auf 800 Mio. Euro** kumulieren (Spannbreite ca. 200 Mio. Euro (Min.-Szenario) bis ca. 1,7 Mrd. Euro (Max.-Szenario)).



Personalbedarfsschätzung: Ergebnisse

Batterierücklauf aus xEV und allen LIB-Anwendungsgebieten

- Betrachtet man lediglich die Recyclingmengen aus **Elektromobilitätsanwendungen**, so ist im Basis-Szenario von einem Anstieg der Arbeitsplätze von etwa **60 im Jahr 2025** auf etwa **6.200 im Jahr 2040** auszugehen. In der Extrembetrachtung der Min.- und Max.-Szenarien ergibt sich in 2040 ein Personalbedarf von 2.600 bis 11.000.
- Wird nicht nur der LIB-Rücklauf aus E-Mobilitätsanwendungen berücksichtigt, sondern auch der Rücklauf aus allen anderen LIB-Anwendungsgebieten (ESS, 3C etc.) inklusive der Produktionsausschüsse, so ergeben sich bei gleichen Arbeitsplatzsätzen (5-7 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 Arbeitsplätze von etwa **160 im Jahr 2025** auf ca. **8.000 im Jahr 2040** auszugehen. In der Extrembetrachtung der Min.- und Max.-Szenarien ergibt sich in 2040 ein Personalbedarf von 3.200 bis 14.000.
- Wird zusätzlich die Sammlung berücksichtigt, so könnten in Europa bis 2040 zusätzlich zwischen 6.000 und 16.000 Arbeitsplätze entstehen.



Deutschlands Anteil am europäischen Batterierecycling (1/3)

- 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 Zellproduktionshochlaufs in Europa erlangt Deutschland bis 2030 einen Anteil von 34% bei den angekündigten Kapazitäten etablierter Hersteller (Basis für Min.-Szenario) und unter Hinzurechnung der Hälfte optional oder von neuen Herstellern angekündigten Kapazitäten einen Anteil von 30% (Basis-Szenario). Unter der Annahme eines ortsnahen Recyclings der Abfallprodukte von Zellfabriken, welches in den Experteninterviews als wahrscheinlich eingestuft wurde, könnten damit gerade in den Jahren 2025 bis 2035 hohe Anteile der in Europa entstehenden Recyclingmengen in Deutschland verarbeitet werden. Gemäß den auf Folie 39 angegebenen Größenordnungen könnte die in Deutschland anfallende Recyclingmenge aus der Zellproduktion 2030 zwischen 13 und 35 kt/a und 2040 zwischen 17 und 51 kt/a ausmachen.
- Bezogen auf die Neuzulassungen von PKW in 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. Der genannte Anteil von etwa 30% am europäischen Markt ist somit als absolute (und wenig wahrscheinliche) Obergrenze zum Vergleich der gesamteuropäischen Zahlen auf Folie 39 zu verstehen.

Deutschlands Anteil am europäischen Batterierecycling (2/3)

- Im Falle kleinerer Batterieanwendungen aus den Bereichen Elektronik oder Micromobility ist das Erreichen des Lebensendes für in Deutschland in Verkehr gebrachte Anwendungen ebenfalls in Deutschland wahrscheinlich. Zumindest die Zuführung in die Sammelsysteme sollte somit lokal erfolgen. Wo das Recycling der Batterien letztlich stattfindet könnte sich am Ende aus der Kombination mehrerer Faktoren entscheiden.
- Hohe Logistikkosten und hoher -Aufwand beim Gefahrgut Batterie sprechen für ein lokales Recycling. Vergleichsweise hohe Lohn- und Energiekosten in Deutschland wiederum könnten einen Schrottexport und ein Recycling, z.B. in osteuropäischen Länder, begünstigen.
- Ähnliche Standortfaktoren gelten jedoch auch für andere Industrien, wie z.B. die Batteriezellfertigung. Insbesondere für ein fortgeschrittenes und automatisiertes Batterierecycling ist somit der Aufbau einer entsprechenden Industrie in Deutschland nicht unwahrscheinlich. Am Ende könnten dafür nicht nur die Standortfaktoren, welche die Schrottentstehung und das Recycling selbst betreffen, ausschlaggebend sein, sondern auch die Nähe zu Abnehmern der Rezyklate, welche im Fall vieler Pack-Komponenten in Deutschland zu finden sind und gemäß einiger Industrieankündigungen in Zukunft auch für Batteriezell-Komponenten in Deutschland zu finden sein könnten.



Deutschlands Anteil am europäischen Batterierecycling (3/3)

- Als **Maximalabschätzung** für die möglicherweise in Deutschland dem Recycling zugeführten Materialmengen wurden die in Folie 39 angegebenen europäischen Mengen auf den Marktanteil Deutschlands bei der Inverkehrbringung von Elektroautos und anderen Batterieanwendungen und den Anteil der Zellproduktion heruntergerechnet. Dies unterstellt, dass netto keine Schrotte und Fahrzeuge exportiert werden.
- Als **Minimalabschätzung** wurden lediglich die Neuschrotte aus der Zellproduktion zu 100% angerechnet (keine Exporte), gebrauchte Batterien aus Fahrzeugen und anderen Anwendungen zu 20% (80% Export während oder nach Lebenszeit).
- Für Beschäftigungseffekte in Deutschland bedeutet dies eine Spanne von ca. 130 bis ca. 470 Beschäftigten in 2030 und ca. 300 bis ca. 3.300 Beschäftigten in 2040.
- Um eine Recyclingkapazität in Höhe von 21 bis 78 kt pro Jahr (vgl. den Rücklauf in Deutschland im Jahr 2030) zu erreichen sind Initialinvestitionen in Höhe von 40 bis 160 Mio. Euro notwendig. Eine Recyclingkapazität von 51 bis 543 kt pro Jahr (vgl. den Rücklauf in Deutschland im Jahr 2040) erfordert dagegen Initialinvestitionen in Höhe von ca. 0,1 bis 1 Mrd. Euro.

Rücklauf (kTonnen) DE	2030		2040	
	min.	max.	min.	max.
Zell-, Packproduktion	13	35	18	51
xEV PKW und NFZ	4	26	30	430
3C, eBikes, Scooter, ...	2	17	3	62
Gesamt	21	78	51	543

Quantifizierung Batterierecycling – Inhalt

1. Executive Summary
2. Batteriemärkte und Batterieanwendungen in Europa
3. Die Batteriewertschöpfungskette und Modellannahmen
4. Ergebnisse: Recycling in Europa
 1. 4.1 Quantifizierung der Recyclingmengen
 2. 4.2 Quantifizierung von Investitionen und Beschäftigung
- 5. Zusammenfassung und Implikationen für den Standort Europa / Deutschland**

Zusammenfassung

Modell und Quantifizierung

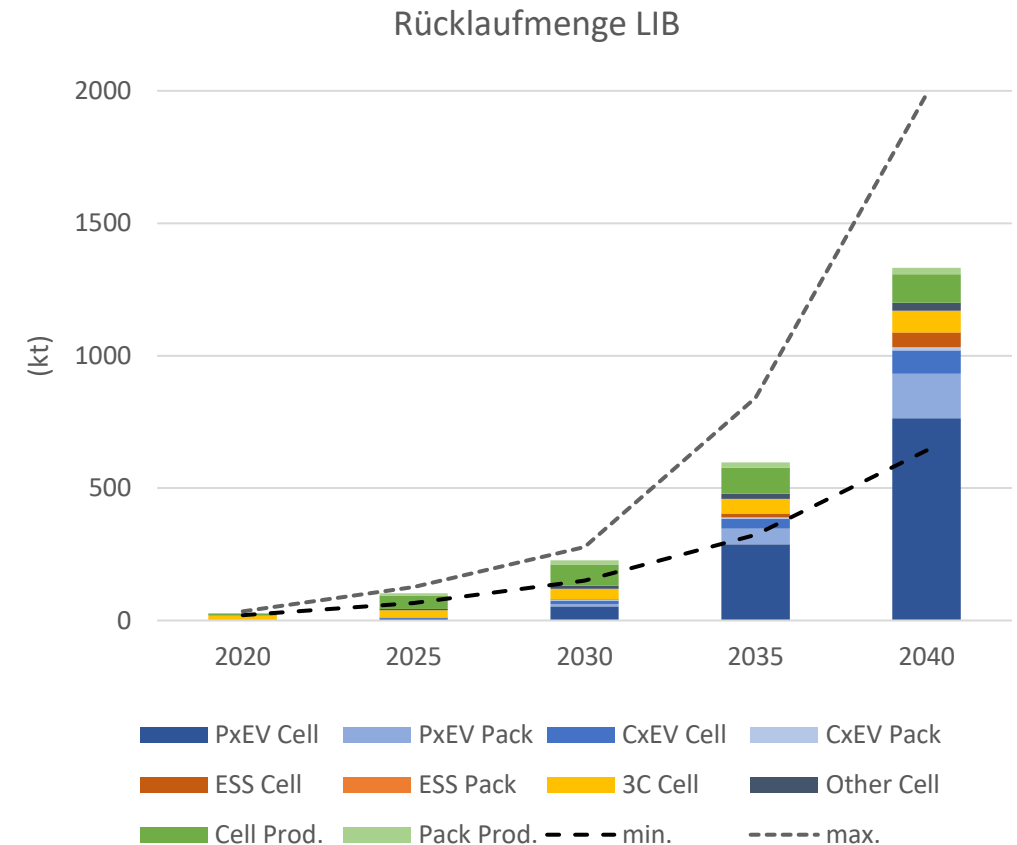
- Die hier aufgestellten Min.- und Max.-Szenarien für Recyclingmengen, Investitionen und Beschäftigungseffekte in Europa stellen jeweilige Extrembetrachtungen dar. Die Quantifizierung sollte damit als Abschätzung möglicher Grenzen der zukünftigen Entwicklung, nicht jedoch als eine strikte Prognose interpretiert werden. Das Basis-Szenario stellt demgegenüber eine Einschätzung anhand moderater Annahmen dar. Aufgrund der Unsicherheiten, die aus dem Zusammenspiel von Regulierung, Nachfrage- und Industrieentwicklung resultieren, sind jedoch auch deutliche Abweichungen zum hier aufgestellten Basis-Szenario zu erwarten.
- Für die Quantifizierung wurden verschiedene Annahmen aufgestellt, welche sich in unterschiedlichem Grad auf die Ergebnisse auswirken. Häufig lagen dabei keine Realdaten vor, somit basieren viele der Annahmen auf (guten) Experteneinschätzungen. Für die Untersuchung wurde weiterhin teilweise stark auf Daten für Verbrennerfahrzeuge zurückgegriffen. Eine Übertragbarkeit auf Elektrofahrzeuge ist jedoch nicht unbedingt sinnvoll. Daher wurden verschiedene Szenarien formuliert und sofern möglich neben den die Verbrennerdaten widerspiegelnden Szenarien auch Szenarien verwendet, die die Abweichungen zwischen Elektrofahrzeugen und Verbrennern mitberücksichtigen.
- Die aus heutiger Sicht größten Unsicherheiten betreffen die folgenden Aspekte:
 - Exportquoten von Fahrzeugen und Schrotten
 - Lebensdauer von Anwendungen und Quoten für eine Zweitnutzung
- Im Vergleich zu anderen Untersuchungen (Drabik2018, Bernhart2019, P32021, Phalpher2021) liegen die Ergebnisse zu Recyclingmengen unserer Untersuchung im unteren Mittelfeld und können als konservativ bis realistisch eingestuft werden.

Zusammenfassung

Marktentwicklung

Markt-
entwicklung

- Ergebnis der Quantifizierung ist, dass Neuschrotte aus der Batterieproduktion bis jenseits 2035 einen größeren Anteil am Recyclingaufkommen ausmachen werden als der Rücklauf aus alten Fahrzeugbatterien. Altbatterien aus Elektronik und anderen 3C-Anwendungen sind bereits heute relevant, dürften aber noch vor 2030 einen kleineren Anteil ausmachen als der Rücklauf aus alten Fahrzeugbatterien. In 2040 dürfte die in Europa zu recycelnde Batteriemenge **mehr als 1,000 Kilotonnen/Jahr** betragen.
- Das für das LIB-Recycling benötigte technische Know-How ist in Europa vorhanden und es befinden sich Pilotanlagen unterschiedlicher Unternehmen mit einer Gesamtkapazität von min. 33 Kilotonnen/Jahr Altbatterien in Betrieb oder Planung. 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.

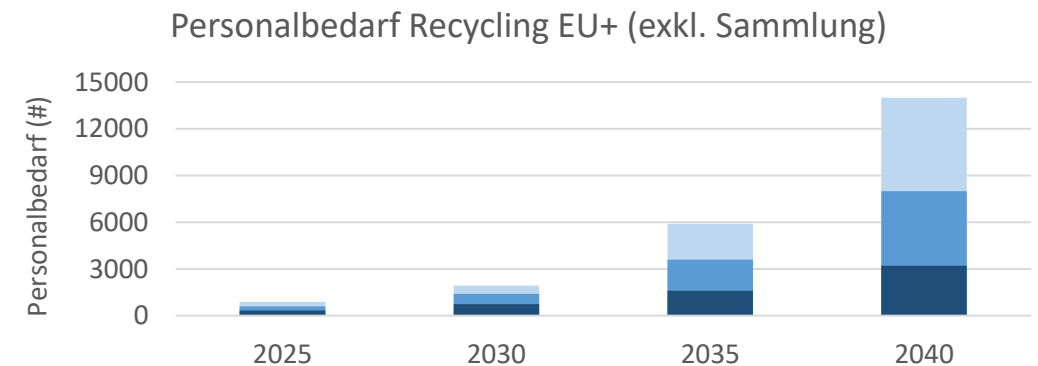
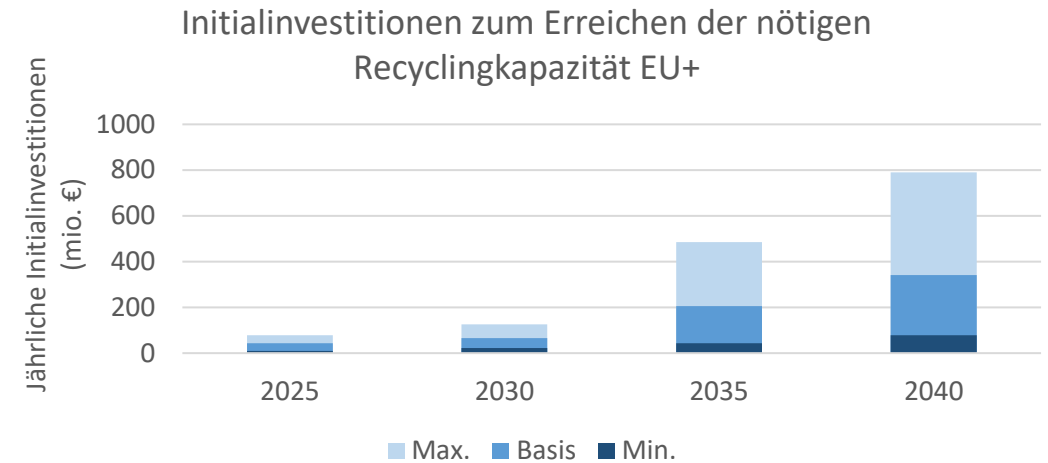


Zusammenfassung

Marktentwicklung

Markt-
entwicklung

- Die geschätzten **(Initial)Investitionen** im Recyclingbereich (kumuliert bis 2040) sind in der Größenordnung von **2,7 Mrd. Euro** (Basis-Szenario, 0,6 bis 6 Mrd. Euro min./max.) für den Betrachtungsraum EU+. In der Industrie könnte ein Arbeitsplatzbedarf (exklusive Sammlung) von ca. **8.000 Arbeitsplätzen** (Basis-Szenario, 3.000 bis 14.000 Arbeitsplätze min./max.) im Jahr 2040 entstehen.
- 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 für Li, Ni, Cu und von > 20% für Co sind die Rezyklatmengen aber absolut signifikant. Ein lokales Recycling hätte damit einen wirklichen Einfluss auf die Rohstoffverfügbarkeit in Europa.
- Eine hohe Rohstoffverfügbarkeit in Europa könnte wiederum die lokale Batteriematerialindustrie aktivieren / stärken.



Zusammenfassung

Regulatorische Bedingungen

Regulatorische
Bedingungen

- Der Regulierungsvorschlag der EU-Kommission umfasst verschiedene Aspekte, die positiv von den befragten Experten beurteilt wurden. So verhindert der EU-weite Geltungsbereich Intra-EU-Unterschiede mit möglichen Wettbewerbsverzerrungen. Die *verpflichtende* Due Diligence der Produzenten legt Verantwortlichkeiten für Sozial- und Umweltwirkungen der Batterieproduktion fest. Der Vorschlag adressiert den gesamten Lebenszyklus der Batterie (nicht nur die Entsorgung). 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.
- Ebenso wurden Herausforderungen genannt, welche durch den Regulierungsvorschlag entstehen könnten. So ist unklar, worauf genau sich die geforderten Recyclingeffizienzen beziehen (Systemgrenze), d.h. es wird Raum gelassen für "Pseudo-Recycling-Verfahren" (z.B. nur Recycling bis zur Schwarzmasse). Zudem bedeuten Regulierungen auch grundsätzlich zusätzliche „Lasten“ für die Batterieindustrie, jedoch nicht für die Konkurrenztechnologien (Wasserstoff, synthetische Kraftstoffe, Biodiesel).
- Wirtschaftliche Hemmnisse für das LIB-Recycling bestehen derzeit in den hohen Prozesskosten der Recyclingbetriebe, welche jedoch durch steigendes Know-How und Skaleneffekte in Zukunft reduziert werden könnten. Regulatorische Hemmnisse bestehen durch lange und aufwändige Genehmigungsprozesse.
- Die effektive Sammlung von Altbatterien aus Fahrzeugen als Ausgangsstoff der sekundären Rohstoffförderung für die Batterieproduktion ist notwendig und könnte durch Pfand- oder Leasingsysteme für LIB erreicht werden.

Zusammenfassung

Internationaler Wettbewerb

Internationaler
Wettbewerb

- Innerhalb Europas ist das nötige Know-How und die für die industrielle Umsetzung des LIB-Recyclings relevanten Industriesparten wie der Anlagenbau vorhanden. Inwieweit eine Recyclingindustrie aufgebaut werden kann, wird jedoch wesentlich von weiteren Standortfaktoren und den Import-/Exportströmen von Fahrzeugen noch während ihrer Lebenszeit abhängen.
- Es ist wahrscheinlich, dass das 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, weshalb hohe Lohnkosten keine entscheidenden Standortnachteile bedeuten müssen.
- Im internationalen Vergleich ist heute China mit den größten Recyclingkapazitäten Weltmarktführer. In den USA werden aktuell Möglichkeiten zur Stärkung eines inländischen Batterierecyclings geprüft. Zur Zeit scheinen europäische oder deutsche Regularien noch eine Herausforderung für Anlagenbauer oder Betreiber aus China darzustellen. Eine Wettbewerbsgefahr für die europäische Recyclingindustrie wird somit aktuell eher durch den Export von in Europa anfallenden Schrotten gesehen.

Zusammenfassung

Ökologischer Fußabdruck

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.
- Wesentliche Faktoren des ökologischen Fußabdruckes 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 Arbeitsschutzauflagen.
- Durch die Verringerung des Imports von Rohstoffen, bzw. durch die vermehrte Nutzung von 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, d.h. die Materialindustrie in Europa. Auch hier gelten die genannten ökologischen Argumente zur Verwendung grüner Energieträger.

Quantifizierung Batterierecycling – Inhalt

1. Executive Summary
2. Batteriemärkte und Batterieanwendungen in Europa
3. Die Batteriewertschöpfungskette und Modellannahmen
4. Ergebnisse: Recycling in Europa
 1. 4.1 Quantifizierung der Recyclingmengen
 2. 4.2 Quantifizierung von Investitionen und Beschäftigung
5. Zusammenfassung und Implikationen für den Standort Europa / Deutschland
6. **Anhang**

Abkürzungsverzeichnis

Fahrzeuge	
BEV	Battery electric vehicle
PHEV	Plug-in hybrid electric vehicle
HEV	Hybrid electric vehicle
xEV	Electric vehicle (ohne Angabe der genauen Antriebstechnologie)
ICE	(Vehicle with) internal combustion engine
NFZ / CV	Nutzfahrzeug / Commercial vehicle
LCV	Light commercial vehicle (<3,5 t)
HCV	Heavy commercial vehicle (>3,5 t)

Einheiten	
GWh	Gigawatt hours
kWh	Kilowatt hours
kt	Kilotons
a	Annum (Jahr)
wt%	Weight-% (Gewichtsprozent)

Materialien	
NG	Natural graphite
SG	Synthetic graphite
EL	Electrolyte
NMC	Li(Ni,Mn,Co)O ₂
NCA	Li(Ni,Co,Al)O ₂
LFP	LiFePO ₄
LNO	LiNiO ₂
LCO	LiCoO ₂
LMO	LiMn ₂ O ₄
LMNO	Li(Mn,Ni) ₂ O ₄
LLO / HE-NMC	Li-rich layered oxide / High energy NMC (Hier Synonym verwendet für Li-Überschuss Materialien)
Other	Andere Materialien, je nach Kontext z.B. passive Zellkomponenten oder Kunststoffe
Elemente wie nach Periodensystem	

Weitere	
3C	Computing, consumer, communication
ESS	Energy storage system
EoL	End of life

Quellen

Avicenne	Avicenne Energy Michael Sanders, The Rechargeable Battery Market_Value Chain and Main Trends 2019 to 2030; Christophe Pillot, The Worldwide rechargeable Battery Market 2019 – 2030, 28th Edition, 2020
Bernhart2019	W. Bernhart, Zukunftsmarkt Batterie-Recycling: Verpasst Europa (wieder) den Anschluss?, 2019, https://www.rolandberger.com/de/Insights/Publications/Zukunftsmarkt-Batterie-Recycling-Verpasst-Europa-(wieder)-den-Anschluss.html
Bernhart2020	W. Bernhart, D. Gabaldon, R. Zheng, P. Schmitt, T. Hotz, S. Braun, A. Kampker, C. Offermanns, S. Krämer, Roland Berger Report: Rising opportunities for battery equipment manufacturers, 2020
Bloomberg	Andrew Cosgrove, Bloomberg Intelligence Benchmark World Tour 2019 North-America, 2019
BMI	Benchmark Mineral Intelligence: 2020 Cost challenges for NCAM and the benefits of more supply, 2020 Nickel-intensive cathodes and the longer-term challenge of supply
BNEF	BNEF Press Release 2020, https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-cited-below-100-kwh-for-the-first-time-in-2020-while-market-average-sits-at-137-kwh/
B3	B3 Corporation, Chapter 11 LIB Materials Market Bulletin (21Q1), Chapter 11 LIB Materials Market Bulletin (20Q1), Chapter 11 LIB Materials Market Bulletin (19Q1), Chapter 7 LIB Market Bulletin (20Q4)
Dai2018	Q. Dai, J. C. Kelly, J. Dunn, and P.T. Benavides, Update of Bill-of-materials and Cathode Materials Production for Lithium-ion Batteries in the GREET Model, Argonne National Laboratory, October 2018
Drabik2018	E. Drabik, V. Rizos, CEPS Research Report No 2018/05, Prospects for electric vehicle batteries in a circular economy, 2018
EAFO	European Alternative Fuels Observatory https://www.eafo.eu/
Elwert2020	Elwert, Tobias; Frank, Julia (2020): Auf dem Weg zu einem geschlossenen Stoffkreislauf für Lithium-Ionen-Batterien. In: Elisabeth Thomé-Kozmiensky, Olaf Holm, Bernd Friedrich und Daniel Goldmann (Hg.): Recycling und Sekundärrohstoffe, Band 13. Nietwerder: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH (Recycling und Rohstoffe, 13).
Elwert2012	Elwert, Tobias; Goldmann, Daniel; Schirmer, Thomas; Strauß, Karl (2012): Recycling von Li-Ionen-Traktionsbatterien – Das Projekt LiBRi –. In: Karl J. Thomé-Kozmiensky und Daniel Goldmann (Hg.): Recycling und Rohstoffe. Neuruppin: TK-Verl.
EU2020	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. Link: https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/4b5d88a6-3ad8-11eb-b27b-01aa75ed71a1/language-en
Fan2020	Fan, Ersha; Li, Li; Wang, Zhenpo; Lin, Jiao; Huang, Yongxin; Yao, Ying et al. (2020): Sustainable Recycling Technology for Li-Ion Batteries and Beyond: Challenges and Future Prospects. In: Chemical reviews 120 (14), S. 7020–7063.
FEV	FEV Group, Malli Veeramurthy, Madhura Medikeri, Development and production challenges for the success of automotive battery systems to be Announced, AABC US 2020
F&S	Frost & Sullivan, Global Li-ion Battery Materials Market, Forecast to 2026, 2020
Hagelücken2018	Hagelücken, Christian (2018): Stoffkreisläufe nachhaltig schließen - Recycling von Elektronikprodukten und Lithium-Ionen Batterien. Zukunftskongress Logistik - 36. Dortmunder Gespräche. Dortmund.
Hanisch2014	Hanisch, Christian; Diekmann, Jan (2014): Recycling of Lithium-Ion Batteries (from Electric Vehicles). Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/280644244_Recycling_of_Lithium-Ion_Batteries_from_Electric_Vehicles , zuletzt geprüft am 21.05.2021.
Harper2019	Harper, Gavin; Sommerville, Roberto; Kendrick, Emma; Driscoll, Laura; Slater, Peter; Stolkin, Rustam et al. (2019): Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. In: Nature 575 (7781), S. 75–86.
IEA2021	IEA (2021), Global EV Outlook 2021, IEA, Paris https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021

Quellen

IHS	IHS Markit Communication 2021
ITRI	Industrial Technology Research Institute, Mark Lu, Chinese xEV Market: Vehicle, Battery and Materials Impact in 2021~2025, AABC EU 2021
Kwade2016	Kwade, Arno; Diekmann, Jan; Hanisch, Christian; Spengler, Thomas; Thies, Christian; Herrmann, Christoph et al. (2016): LithoRec 2. Recycling von Lithium-Ionen-Batterien. Hg. v. TU Braunschweig. Braunschweig. Online verfügbar unter https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2017-01/Abschlussbericht_LithoRec_II_20170116.pdf , zuletzt geprüft am 21.05.2021.
Kwade2012	Kwade, Arno; Bärwaldt, Gunnar (2012): LithoRec. Recycling von Lithium-Ionen-Batterien. Braunschweig. Online verfügbar unter https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/publications/abschlussbericht-lithorec_1.pdf , zuletzt geprüft am 21.05.2021.
Kwade2020	Circular Economy Initiative Deutschland (Hrsg.): <i>Ressourcenschonende Batteriekreisläufe – mit Circular Economy die Elektromobilität antreiben</i> , Kwade, A., Hagelüken, C., Kohl, H., Buchert, M., Herrmann, C., Vahle, T., von Wittken, R., Carrara, M., Daelemans, S., Ehrenberg, H., Fluchs, S., Goldmann, D., Henneboel, G., Hobohm, J., Krausa, M., Lettgen, J., Meyer, K., Michel, M., Rakowski, M., Reuter, M., Sauer, D.U., Schnell, M., Schulz, M., Spurk, P., Weber, W., Zefferer, H., Blömeke, S., Bussar, C., Cerdas, J., Gottschalk, L., Hahn, A., Reker-Gluhic', E., Kobus, J., Muschard, B., Schliephack, W., Sigel, F., Stöcker, P., Teuber, M. und Kadner, S., acatech/SYSTEMIQ, München/London 2020.
Marklines	Marklines Co L Automotive Industry Portal http://www.marklines.com
Martens2016	Martens, Hans; Goldmann, Daniel (2016): Recyclingtechnik. Fachbuch für Lehre und Praxis. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg.
Mayyas2018	A. Mayyas, D. Steward, M. Mann, The case for Recycling: Overview and challenges in the material supply chain for automotive li-ion batteries, Sustainable Materials and Technologies 17, 2018, https://doi.org/10.1016/j.susmat.2018.e00087
Mordorintelligence	Mordorintelligence: https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/europe-e-bike-market https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/e-bike-market
P3	P3 Group, M. Hackmann, Large-scale automotive cell manufacturing in Europe – Overview AABC EU 2020; M. Hackmann, Blue-print for a Li-Ion Battery recycling factory in Europe – A must-have for sustainable electric mobility, AABC EU 2021
Phalpher2021	Li-Cycle, K. Phalpher, Creating a local critical battery materials supply chain, AABC EU 2021
Smekens2016	Jelle Smekens, Rahul Gopalakrishnan, Nils Van den Steen, Noshin Omar, Omar Hegazy, Annick Hubin, Joeri Van Mierlo, Influence of Electrode Density on the Performance of Li-Ion Batteries: Experimental and Simulation Results, Energies 2016, 9(2), 104; https://doi.org/10.3390/en9020104
SNE	SNE Research, Lithium Ion Battery Manufacturing Equipment Technology Trend and Market Outlook ~2030, 2020
Sojka2020	Sojka, Reiner Thomas (2020): Sichere Aufbereitung von Lithium-basierten Batterien durch thermische Konditionierung. In: Elisabeth Thomé-Kozmiensky, Olaf Holm, Bernd Friedrich und Daniel Goldmann (Hg.): Recycling und Sekundärrohstoffe, Band 13. Nietwerder: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH (Recycling und Rohstoffe, 13).
Statista2020	Statista, Consumer Electronics Report 2020, https://www.statista.com/study/55488/consumer-electronics-market-report/ Statista, Consumer Electronics, https://www.statista.com/outlook/cmo/consumer-electronics/Europe
Syrah	Syrah Resources Shaun Verner, Joe Williams, Natural Graphite Active Anode Material (AAM) for global electric vehicle demand, AABC EU 2021
Roskill	Roskill Li-ion batteries 4th Edition Update 1 – August 2020
UBS	Patrick Hummel, Tim Bush, Paul Gong, Kenji Yasui, Taewoo Lee, Julian Radlinger, Colin Langan, David Lesne, Kohei Takahashi, Eugene Jung, Lachlan Shaw, Geoff Haire, UBS Q-Series Tearing down the heart of an electric car: Can batteries provide an edge, and who wins?, UBS Limited, 2018; Tearing down the heart of an electric car: Can batteries provide an edge, and who wins, UBS Limited, 2020

Quellen

VDA2020	https://www.vda.de/de/services/zahlen-und-daten/jahreszahlen/automobilproduktion.html
VDMA2020	VDMA: Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau, Michaelis et al., Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030 – Update 2020
Weyhe2013	Weyhe, Reiner (2013): Recycling von Lithium-Ion-Batterien. In: Karl J. Thomé-Kozmiensky und Daniel Goldmann (Hg.): Recycling und Rohstoffe. Neuruppin: TK-Verl.
Yano	Yano Research Institute: 2019-2020 Current Status and Future Prospects of LiB Material Market ~Major Four Materials
Yole	Yole Development Li-ion Battery Pack for Automotive and Stationary Storage Applications, 2020; Status of Rechargeable Li-ion Battery Industry, 2019
Zhang2018	J. Zhang, B. Li, A. Garg, Y. Liu, A generic framework for recycling of battery module for electric vehicle by combining the mechanical and chemical procedures, Int J Energy Res, 2018, 1-10, DOI: 10.1002/er.4077



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Verkehr und
digitale Infrastruktur

Wir bedanken uns bei den Teilnehmern der Expertenbefragung für die hilfreiche Unterstützung bei der Durchführung der Untersuchung:

Accurec Recycling, BASF, BMW, Circular Economy Initiative Deutschland, Fraunhofer IKTS, Fraunhofer ISC, Kummer Umwelt:Kommunikation, Redwood Materials, SYSTEMIQ, TU Clausthal (IFAD), TU München (Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik), Umicore, Webasto

Autoren:

Dr. Andreas Bittner | Dr. Andreas Flegler | Dr. Christoph Neef | Leon Rostek | Dr. Denis Stijepic | Dr. Luis Alberto Tercero Espinoza | Dr. Axel Thielmann

Kontakt:

Dr. Christoph Neef | Competence Center Neue Technologien

Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Telefon +49 721 6809-350 | E-mail: christoph.neef@isi.fraunhofer.de