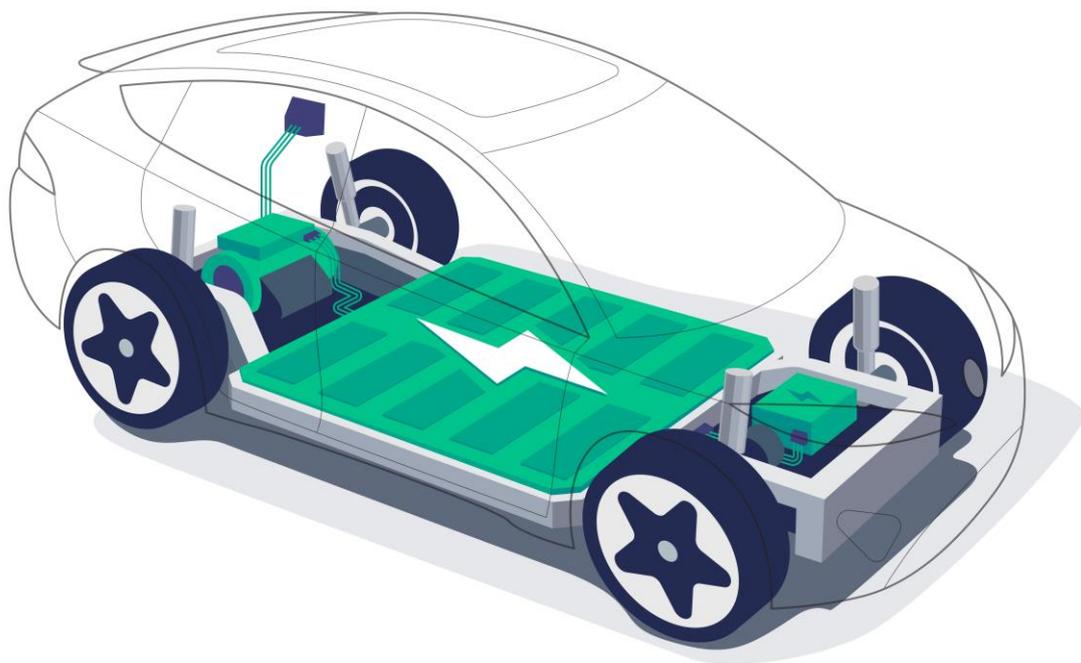


Grundlagendokument, April 2023

# Batterien für Elektrofahrzeuge



**Autorinnen und Autoren**

Roberto Bianchetti, INFRAS  
Hans-Jörg Althaus, INFRAS  
Brian Cox, INFRAS  
Lucas Truniger, INFRAS  
Irina Meyer, INFRAS  
Charles Marmy, Empa  
Andrin Büchel, Empa  
Martin Gasser, Empa  
Roland Hischier, Empa  
Patrick Wäger, Empa

**Projektleitung BFE**

Alois Freidhof, Bundesamt für Energie (BFE)

**Gremium aus Fachexpertinnen und Fachexperten**

Dominic Bresser, Karlsruhe Institute of Technology (KIT)  
Daniel Christen, Auto Recycling Schweiz  
Giovanni D'Urbano, Bundesamt für Umwelt (BAFU)  
Jean-Marc Geiser, Bundesamt für Energie (BFE)  
Markus Kramis, EVTEC  
Karin Mader, HEKS/Fastenaktion  
Anette Michel, Verkehrsclub Schweiz  
Stefan Oberholzer, Bundesamt für Energie (BFE)  
Jodok Reinhardt, Librec  
Christoph Schreyer, Bundesamt für Energie (BFE)  
Andrea Vezzini, Berner Fachhochschule

Diese Studie wurde im Auftrag des Bundesamts für Energie erstellt. Für den Inhalt sind allein die Autorinnen und Autoren verantwortlich. Die enthaltenen Aussagen basieren auf dem Stand des Wissens zur Zeit der Erarbeitung des Berichts (Februar 2023).

# Inhaltsverzeichnis

<b>1.</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>4</b>
<b>2.</b>	<b>Allgemeine Fragestellungen .....</b>	<b>5</b>
2.1	Was sind Lithium-Ionen-Batterien.....	5
2.2	Globaler Markt .....	10
2.3	Ökobilanz Batterien.....	15
2.4	EU-Gesetzgebung .....	19
<b>3.</b>	<b>Rohstoffförderung .....</b>	<b>22</b>
3.1	Überblick Rohstoffförderung .....	22
3.2	Ökologische und soziale Auswirkungen der Rohstoffförderung .....	26
<b>4.</b>	<b>Produktion Batteriezelle und -system .....</b>	<b>35</b>
4.1	Überblick Produktion Batteriezelle und -system .....	35
4.2	Materialien- und Komponentenherstellung.....	39
4.3	Energie- und Materialeffizienz der Produktion.....	41
4.4	Ökologische Auswirkungen der Produktion .....	42
<b>5.</b>	<b>Nutzung der Batterie.....</b>	<b>44</b>
5.1	Dimensionierung der Batterien .....	44
5.2	Lebensdauer der Batterien .....	47
5.3	Reichweite der Batterien.....	51
5.4	Brandrisiko der Batterien .....	53
<b>6.</b>	<b>End-of-Life der Batterie .....</b>	<b>56</b>
6.1	End-of-Life der Batterien.....	56
6.2	Überblick Recycling .....	60
6.3	Recyclingprozesse und -verfahren .....	65
6.4	Wirtschaftliche Aspekte des Recyclings .....	68
<b>7.</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>71</b>
<b>8.</b>	<b>Glossar – Begriffsklärungen und Abkürzungen .....</b>	<b>80</b>

# 1. Einleitung

Die Elektromobilität kann einen wesentlichen Beitrag leisten, die Ziele der Schweizer Energie- und Klimapolitik zu erreichen. Die Nachfrage nach Elektrofahrzeugen und folglich Traktionsbatterien – die wichtigste Komponente eines Elektrofahrzeugs – wird in den nächsten Jahren zunehmend an Bedeutung gewinnen. Traktionsbatterien sind somit Schlüsselkomponenten für die Dekarbonisierung des Verkehrssektors.

Das vorliegende Grundlegendokument adressiert den Bedarf nach Aufklärung zu den Fakten über Traktionsbatterien und leistet einen Beitrag zu einer faktenbasierten Diskussion – basierend auf neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen. Im Dokument werden die wichtigsten Fragestellungen zu verschiedenen Aspekten identifiziert, entlang des Lebenszyklus der Traktionsbatterie abgebildet und faktenbasiert beantwortet. Die Dokumentenrecherche und -analyse fokussierte sich v.a. auf wissenschaftliche Literatur (peer-reviewed articles), graue Literatur (andere Publikationen, Studienberichte aus der Akademie, Verwaltung, NGOs oder dem privaten Sektor) sowie Dokumentationen und Ankündigungen aus der Industrie/Praxis, sofern sie die hohen Anforderungen an Qualität und Transparenz erfüllt haben. Die Ergebnisse wurden durch ein interdisziplinäres Gremium aus Fachexpertinnen und Fachexperten reviewed.

Das Grundlegendokument adressiert folgende Zielgruppen: die Akteure der Mobilitätsbranche, die öffentliche Verwaltung sowie die Medienschaffenden. Zudem soll das Dokument als Grundlage für weitere Kommunikationsmassnahmen von EnergieSchweiz dienen. Das Dokument ist modular aufgebaut und jede Fragestellung wird mit seinen relevanten Aspekten als ein in sich abgeschlossener Baustein behandelt. Die Fragestellungen sind nach Lebenszyklusphasen (vgl. Abbildung 1) klassifiziert. Weitere Unterteilungen, soweit relevant, sind nach technischen, ökologischen, ökonomischen, sicherheitsrelevanten und sozialen Aspekten differenziert.

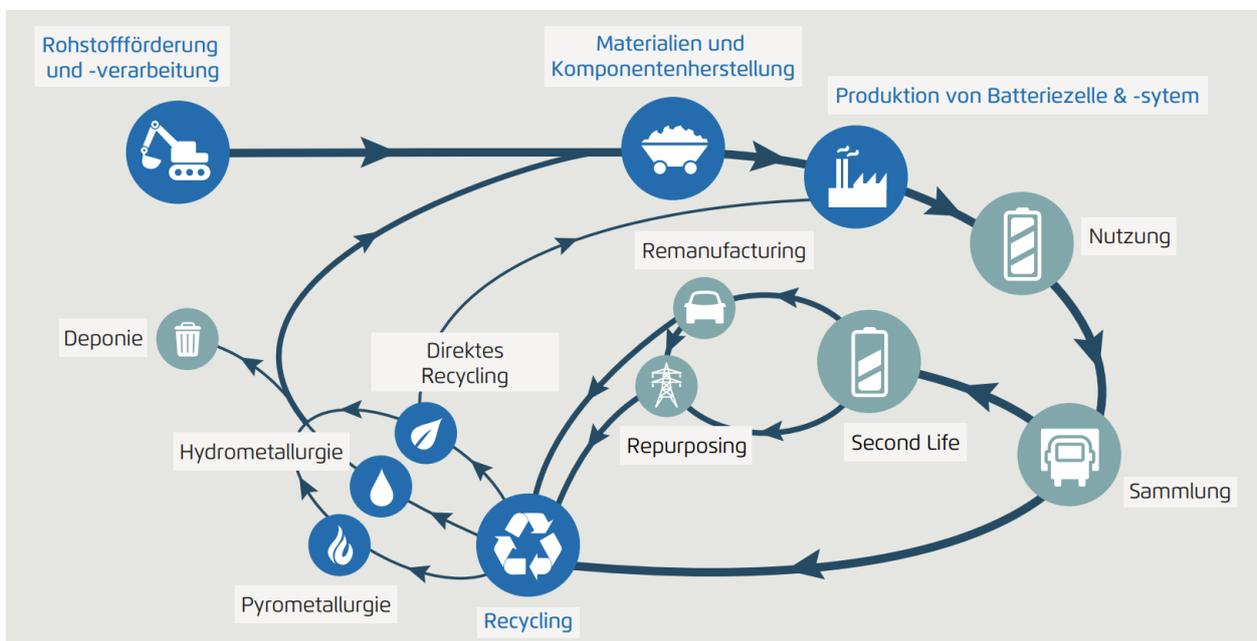


Abbildung 1: Graphische Darstellung der Lebenszyklusphasen einer Traktionsbatterie (Agora Verkehrswende, 2021). Bemerkung: von INFRAS angepasste Graphik (direktes Recycling statt direktes Kathodenrecycling).

Kapitel 2 enthält allgemeine Fragestellungen, die übergeordneter Art sind bzw. nicht einer einzelnen Lebenszyklusphase der Traktionsbatterien zuzuordnen sind. Kapitel 3 bis 6 berücksichtigen die Lebenszyklusphasen Rohstoffförderung, Produktion von Batteriezellen, Nutzung der Batterie und End-of-Life der Batterie. Kapitel 7 zeigt die Quellen auf und Kapitel 8 rundet das Dokument mit einem Glossar ab.

## 2. Allgemeine Fragestellungen

### 2.1 Was sind Lithium-Ionen-Batterien

*Wie ist eine Lithium-Ionen-Batterie aufgebaut und wie funktioniert sie?*

Im vorliegenden Bericht umfasst der Begriff «Batterie» immer das ganze System, das sich aus den eigentlichen elektrochemischen Zellen, einem Batteriemanagementsystem, einer Kühlung und einer Verpackung und Kontaktierung zusammensetzt. Begriffe wie «Kapazität», «Energiedichte» oder «Leistung» beziehen sich darum, wenn nicht anders spezifiziert, auf die Batterie als Ganzes. Wir beschränken uns dabei auf wiederaufladbare Lithium-Ionen-Batterien für den Antrieb von Elektrofahrzeugen (Akkumulatoren, Akkus).

Traktionsbatterien sind meist modular aufgebaut. Einzelne Zellen werden zu Modulen zusammengeschaltet, die wiederum, zusammen mit einem Kühlsystem und allenfalls einem integrierten Batteriemanagementsystem, zu einer Batterie kombiniert werden bzw. zu einem Batteriesystem. Abbildung 2 und Abbildung 3 zeigen den Aufbau eines Batteriemoduls bzw. eines Batteriesystems im Detail auf.

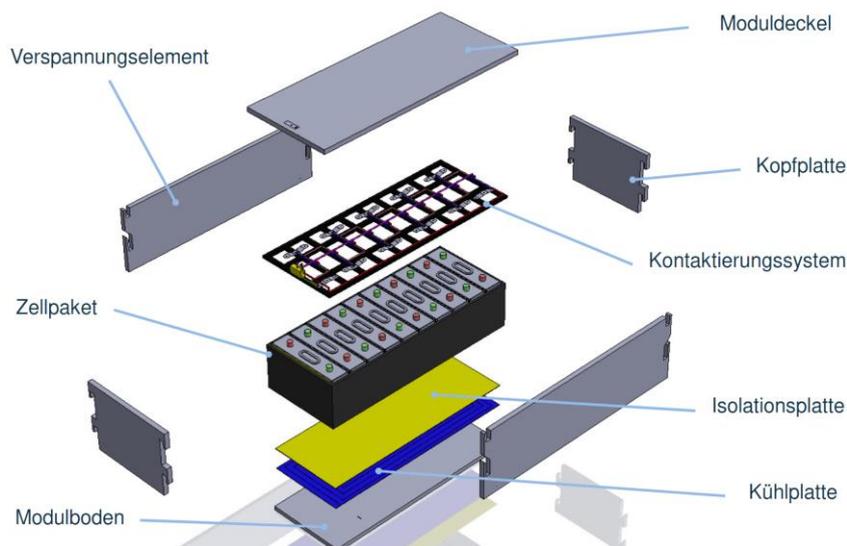


Abbildung 2: Aufbau eines Batteriemoduls (RWTH Aachen, 2022b).

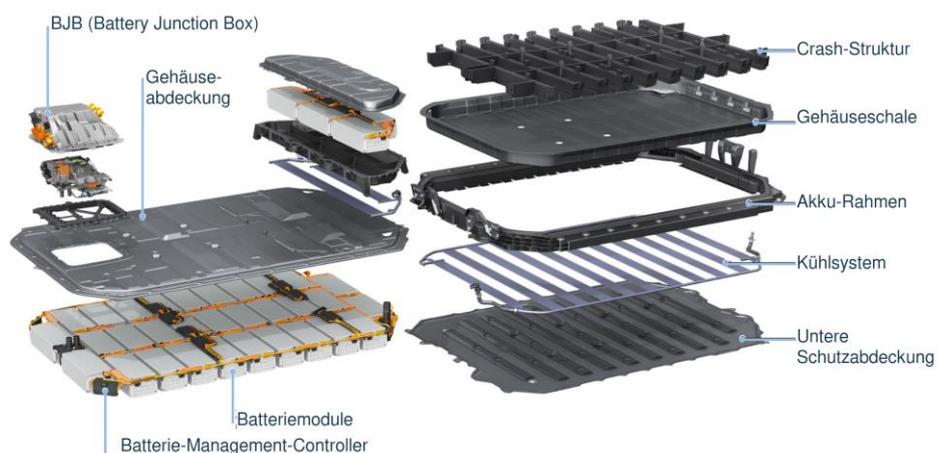


Abbildung 3: Aufbau eines Batteriesystems (RWTH Aachen, 2022b).

Mehr und mehr wird bei Traktionsbatterien aber auch darauf verzichtet, erst Module zu fertigen, die dann weiterverarbeitet werden. Stattdessen werden Zellen direkt in strukturelle Fahrzeugbauteile integriert. Das bringt eine Gewichts- und Kostenersparnis bei Fahrzeugen, stellt aber das Recycling der Batterie vor grössere Herausforderungen, da diese nicht mehr so einfach von den anderen Teilen getrennt werden kann.

Das Herz einer Batterie ist die elektrochemische Zelle. Sie besteht aus zwei Elektroden und einem Elektrolyten. Die positive Elektrode wird Kathode genannt, die negative Elektrode Anode. Da Lithium-Ionen-Batterien dadurch gekennzeichnet sind, dass beim Lade- und Entladevorgang Lithiumionen zwischen den Elektroden ausgetauscht werden, müssen bei einer Lithium-Ionen-Batterie sowohl die Anode als auch die Kathode in der Lage sein, Lithiumionen (positiv geladene Lithiumatome) einzulagern. Die Elektroden sind durch einen Separator getrennt, der für Lithiumionen durchlässig ist, nicht aber für Elektronen. Der Elektrolyt sorgt dafür, dass die Lithiumionen beim Laden von der Kathode zur Anode und beim Entladen von der Anode zur Kathode gelangen können.

Abbildung 4 stellt schematisch den Aufbau einer Zelle sowie die üblichen Zellformen dar. Bei zylindrischen Zellen werden Streifen der Zellen aufgerollt und in eine feste Hülle, meist Stahl, verpackt. Bei Pouch oder prismatischen Zellen hingegen werden mehrere rechteckige Lagen der Zellen übereinandergestapelt. Der wesentliche Unterschied zwischen Pouch- und prismatischen Zellen besteht darin, dass letztere in einer harten Hülle verbaut sind, während Pouch-Zellen in Folien eingeschweisst werden.

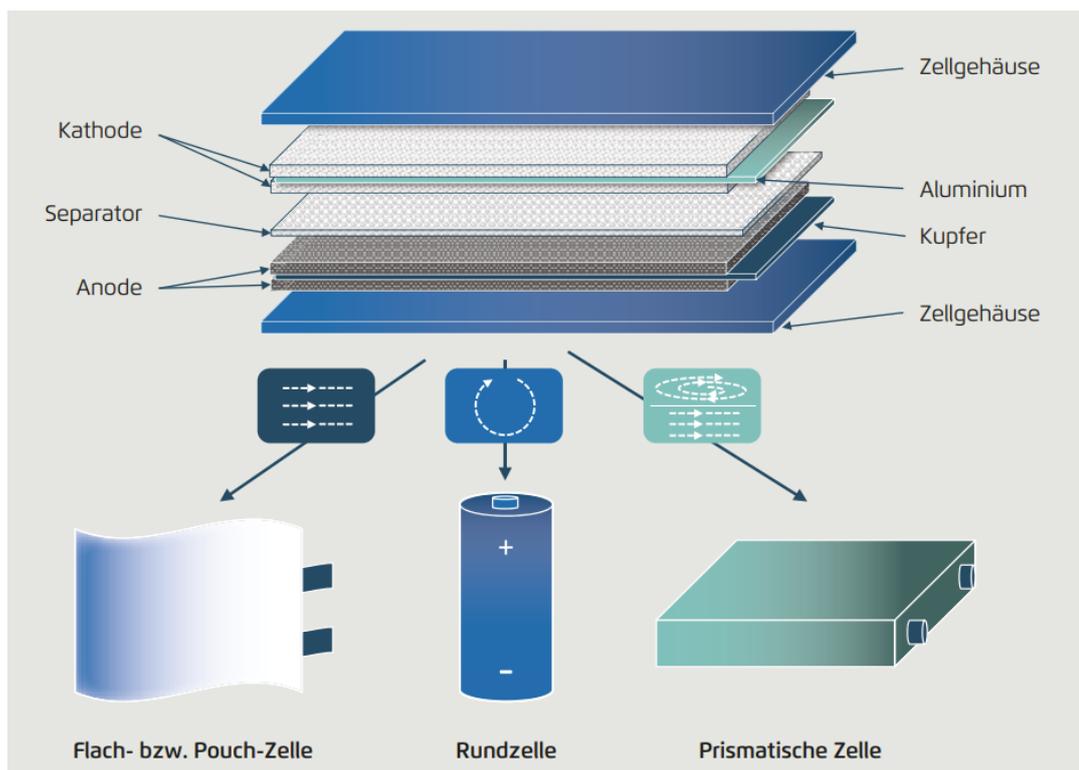


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Aufbaus einer Lithium-Ionen-Batterie-Zelle (Agora Verkehrswende, 2021).

Die Materialpaarung von Anode und Kathode bestimmt weitgehend die Eigenschaften der Zellen und damit der Batterie:

- Die **Anode** von Lithium-Ionen-Batterien besteht heute meist aus Graphit. Die Anode kann aber auch aus Lithiumtitanat ( $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ; LTO) bestehen, was die Zellspannung und die Energiedichte reduziert, aber dafür die Leistungsdichte erhöht. Dank dieser Eigenschaft können LTO-Batterien zwar pro Kilogramm Batterie weniger Energie speichern als Batterien mit Graphitanoden, dafür aber sehr schnell geladen und entladen werden.
- Die **Kathode** von Lithium-Ionen-Batterien kann sehr unterschiedlich sein. Die wichtigsten Kathoden für Traktionsbatterien bestehen aus Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxiden (NMC), aus Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxiden (NCA) sowie aus Lithiumeisenphosphat (LFP). Unter den NMC- und NCA-Kathoden gibt es jeweils sehr unterschiedliche Mengenanteile der verschiedenen Metalle.
- **Klassische Elektrolyte** basieren auf organischen Lösungen von Lithiumsalzen. Alternativ werden bei den sogenannten Lithium-Polymer-Batterien Polymere, die für Lithiumionen durchlässig sind, verwendet. Auch feste keramische (Oxide oder Sulfide) Elektrolyte sind möglich und befinden sich gerade in der Entwicklung, v.a. auch in Kombination mit metallischem Lithium. In letzterem Fall wird dann von Feststoffbatterien gesprochen.

Tabelle 1 zeigt die massenbezogenen Materialanteile, die in oft verwendeten Traktionsbatterien enthalten sind. Es sind jeweils mehrere Kilogramm Metalle pro Batterie verbaut, die im Idealfall zurückgewonnen werden können (vgl. Kap. 6.2).

Tabelle 1: Merkmale von Batteriematerialien und ihre Mengen in einer durchschnittlichen Batterie.

Element	Durchschnittliche Masse pro Traktionsbatterie <sup>1</sup>				
Kathodenchemie	NMC811 (Nickel 80%, Mangan 10%, Kobalt 10%)	NMC532 (Nickel 50%, Mangan 30%, Kobalt 20%)	NMC622 (Nickel 60%, Mangan 20%, Kobalt 20%)	NCA+ Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxide	LFP Lithiumeisenphosphat
Lithium Li	5 kg	7 kg	6 kg	6 kg	6 kg
Kobalt Co	5 kg	11 kg	11 kg	2 kg	0 kg
Nickel Ni	39 kg	28 kg	32 kg	43 kg	0 kg
Mangan Mn	5 kg	16 kg	10 kg	0 kg	0 kg
Graphit C	45 kg	53 kg	50 kg	44 kg	66 kg
Aluminium Al	30 kg	35 kg	33 kg	30 kg	44 kg
Kupfer Cu	20 kg	20 kg	19 kg	17 kg	26 kg
Stahl	20 kg	20 kg	19 kg	17 kg	26 kg
Eisen Fe	0 kg	0 kg	0 kg	0 kg	41 kg
Batteriegewicht	169 kg	190 kg	180 kg	159 kg	209 kg

<sup>1</sup> Durchschnittliche 60 kWh Traktionsbatterie von 2020. Materialien im Elektrolyt, Binder, Kühlung, Separator und Batteriegehäuse sind nicht enthalten (Bhutada, 2022b).

*Welche Batteriechemien gibt es heute, welche Eigenschaften haben sie und was wird künftig erwartet?*

NMC-, NCA- und LFP-Batterien sind heute dominant im Bereich der Traktionsbatterien. Alle drei Kathodentypen werden heute fast ausschliesslich mit Graphit-Anoden kombiniert.

### **NMC- und NCA-Batterien**

NMC- und NCA-Batterien haben ähnliche Eigenschaften bezüglich Energiedichte und Leistung. Da diese Zellen über eine hohe Energiedichte verfügen, besteht jedoch eine erhöhte Gefahr von Überhitzung und Bränden, wenn die Batterie beschädigt wird. Während der Nutzung dieser Batterien muss darum besonderer Wert auf die Kühlung gelegt werden.

In Kombination mit Graphit-Anoden werden heute Energiedichten im Bereich von 200 Wh/kg erreicht<sup>2</sup>. Dank der hohen Leistungsdichte können diese Batterietypen sehr schnell geladen werden. Bei modernen 800 V Batterien kann in rund 5 Minuten Energie für 100 km Fahrt in die Batterie geladen werden.

### **LFP-Batterien**

LFP-Batterien mit Graphit-Anoden haben deutlich geringere Energiedichten als NMC- oder NCA-Batterien. Dafür sind sie thermisch stabiler und stellen geringere Anforderungen an das Wärmemanagement der Batterie, was eine höhere Packungsdichte der Zellen in der Batterie zulässt. So ist die Energiedichte von LFP-Batterien immer noch tiefer als die von NMC- oder NCA-Batterien, liegt mit rund 160 Wh/kg heute aber in einem ansprechenden Bereich. Auch bezüglich Schnellladefähigkeit sind LFP-Batterien absolut praxistauglich. Bei allen Batterien nehmen der nutzbare Energieinhalt und die Leistung mit sinkender Temperatur ab. Bei LFP-Batterien ist dieser Effekt ausgeprägter als bei den anderen zwei Chemien.

### **LMO- und LCO-Batterien**

Andere Kathodenmaterialien wie Lithium-Mangan-Oxid-Spinell (LMO bzw. LMS) oder Lithium-Kobalt-Oxid (LCO bzw.  $\text{LiCoO}_2$ ) spielen für Traktionsbatterien bei Serienfahrzeugen heute praktisch keine Rolle. Zwar basierte die ursprüngliche Batterie des Nissan Leaf auf LMO-Batterien, doch moderne Elektrofahrzeuge benötigen Batterien mit höherer Energiedichte. Die LMO-Batterie kommt ohne das teure Kobalt aus und ist darum potenziell günstiger, weist aber eine geringere Energiedichte auf. Die LCO-Batterie überzeugt mit einer hohen Energiedichte und wird massgeblich in portablen elektronischen Geräten wie bspw. Smartphones genutzt, hat aber eine vergleichsweise geringere Lebensdauer und ist relativ teuer. Beide Kathodenmaterialien werden wohl auch in Zukunft bei Elektrofahrzeugen keine grosse Rolle spielen.

### **LMNO-Batterien**

Eine Rolle spielen könnten hingegen Lithium-Mangan-Nickel-Oxid-Kathoden (LMNO). Hierbei handelt es sich um kobaltfreie Kathoden, die trotzdem eine hohe Energiedichte aufweisen. Dank des Verzichts auf Kobalt könnten die Materialkosten für solche Batterien tiefer liegen und die Probleme vermieden werden, die im Zusammenhang mit der Gewinnung von Kobalt entstehen. Allerdings muss die Zyklenfestigkeit dieser Batterien noch verbessert werden, bevor sie in Batteriefahrzeugen zum Einsatz kommen können.

### **LTO-Batterien**

Die NMC-Kathode – und vor allem auch die LFP-Kathode – kommt auch in Kombination mit Lithium-Titanium-Oxide-Anoden (LTO) zum Einsatz. Dann spricht man oft von LTO-Batterien. Diese werden aber als Traktionsbatterien für Personenwagen praktisch nicht eingesetzt, weil die spezifische Energiedichte zu gering und der Preis relativ betrachtet (Preis pro kWh) recht hoch ist. Die ca. 5% Marktanteil an LTO-Batterien stammen v.a. aus dem Bus-Bereich, aufgrund der guten Schnellladefähigkeit.

### **Silizium-Anoden-Batterien**

Eine Alternative als Anodenmaterial wäre Silizium. Silizium-Anoden können pro Masse 9-mal mehr Lithiumionen und Elektronen aufnehmen als Graphit, was eine viel höhere spezifische Energiedichte von Lithium-Ionen-Batterien mit Silizium-Anoden ermöglicht. Leider dehnt sich das Silizium aus, wenn es Lithium-Ionen aufnimmt, was die Lebensdauer der Batterie negativ beeinflusst. Wenn es gelingt, dieses

<sup>2</sup> Dieser Wert gilt für die Batterie als Ganzes. Die Energiedichte der Zellen (ohne Batteriemangement, Kühlung, Kontaktierung etc.) liegt rund 50% höher.

Problem konstruktiv zu lösen, könnten künftige Fahrzeuge mit Silizium-Anoden-Batterien ausgerüstet sein, die eine rund 50% höhere Energiedichte aufweisen als eine Batterie mit einer Graphit-Anode. Ein weiterer Vorteil einer solchen Entwicklung wäre, dass eine gute Alternative zu Graphit aus Sicht von Materialkritikalität und Versorgungssicherheit geschaffen würde. Aktuell enthalten einige kommerzielle Batterien bereits ca. 5% Silizium.

### **Natrium-Ionen-Batterien**

Natrium-Ionen-Batterien setzen Natrium statt Lithium ein, also bspw. günstiges und reichlich vorhandenes Kochsalz als Ausgangsstoff. Aufgrund der möglichen Verwendung anderer Elektrolytsysteme funktionieren sie auch bei kalten Temperaturen zuverlässig. Die bislang begrenzte Lebensdauer von Natrium-Ionen-Batterien und vor allem die geringere Energiedichte hat jedoch bisher einen breiten Einsatz verhindert. Natrium-Ionen-Batterien werden derzeit u.a. von CATL entwickelt, einem der grössten Batteriehersteller der Welt. Im Jahr 2021 hat CATL diese kommerziell eingeführt und plant nun bis Ende 2023 eine industrielle Lieferkette aufzubauen.

Aktuelle Forschungsergebnisse aus den USA mit neuer Elektrolytzusammensetzung weisen in Labortests eine deutlich längere Lebensdauer als bisherige Natrium-Ionen-Batterien auf. Die grössten Unsicherheiten beim Einsatz von Natrium-Ionen-Batterien liegen in der Skalierbarkeit der Produktionsprozesse für diese Materialien und in der Zeit, die für die Entwicklung einer Lieferkette im industriellen Massstab erforderlich ist (IEA, 2022).

### **Feststoffbatterien**

Metallisches Lithium kann ebenfalls als Anode, z.B. in Kombination mit NMC-Kathoden, verwendet werden. Möglich wäre auch eine Kombination mit Schwefel oder sogar mit Luft, was bezüglich Materialkosten sehr vorteilhaft wäre. In allen Kombinationen führt dies einerseits zu einer sehr hohen Energiedichte. Die hohe Reaktivität von Lithium stellt andererseits aber auch sehr hohe Anforderungen an die Konstruktion der Batterie, damit eine hohe Lebensdauer und Betriebssicherheit gewährleistet werden können. Metallisches Lithium als Anode ist v.a. im Kontext von Feststoffbatterien ein Thema, weil ein fester Elektrolyt potenziell eine höhere Sicherheit gegen Kurzschlüsse in der Batteriezelle gewährleistet. So gelten Feststoffbatterien heute als sehr vielversprechend bezüglich Energiedichte, die rund 70% höher sein kann als die der derzeit besten Lithium-Ionen-Batterien (IEA, 2022).

Die derzeitige weltweite Kapazität für die Produktion von Polymer-Feststoffbatterien wird auf unter 2 GWh geschätzt, was rund 0.5% des globalen Marktes entspricht. Es wird erwartet, dass diese Kapazität erheblich ansteigen wird, insbesondere mit dem Markteintritt von Feststoffbatterien auf Oxid- und Sulfidelektrolyt-Basis zwischen 2025 und 2030. Die Gesamtkapazität des Marktes von Feststoffbatterien wird im Jahr 2030 auf 15–55 GWh und im Jahr 2035 auf 40–120 GWh geschätzt, was im Vergleich zum gesamten Lithium-Ionen-Batterien-Markt von 1–6 TWh um 2030 und 2–8 TWh im Jahr 2035 gering ist (rund 1%). Dies bedeutet, dass Lithium-Ionen-Batterien mit flüssigen Elektrolyten den Markt auf absehbare Zeit dominieren werden und es einige Zeit dauern dürfte, bis Feststoffbatterien eine wichtige Technologie auf dem Weltmarkt werden (Fraunhofer ISI, 2022).

## 2.2 Globaler Markt

Wie sieht die bisherige und künftige weltweite Entwicklung des Marktes aus?

Aktuell kommen als Traktionsbatterien für Serienfahrzeuge fast nur Lithium-Ionen-Batterien mit Graphitanoden und einem flüssigen oder gelbasierten Elektrolyten zum Einsatz. Für die Kathode, deren chemische Zusammensetzung sowohl die Batterieeigenschaften als auch den Materialbedarf wesentlich bestimmt, sind hingegen verschiedene Materialien marktrelevant. Nickel- und kobaltbasierte Kathodenmaterialien, wie Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxide (NMC) und Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxide (NCA), dominierten im Jahr 2021 den Markt für Traktionsbatterien. Der globale Anteil an der Nachfrage nach Kathodenmaterialien betrug rund 75% (vgl. Abbildung 5 und Abbildung 6). In den letzten zwei Jahren haben zudem Lithiumeisenphosphat-Batterien (LFP) ein starkes Wachstum erlebt und einen Anteil von 25% der Nachfrage nach Kathodenmaterialien per Ende 2021 erreicht. Aktuelle Prognosen gehen davon aus, dass sogar 40% per Ende 2022 erreicht werden (Bloomberg Hyperdrive, 2022), was v.a. auf die zunehmende Verbreitung von Elektrofahrzeugen in China zurückzuführen ist. Weiter setzen auch Tesla und Mercedes bei einigen Modellen LFP-Batterien ein, während Volkswagen und Ford den Einsatz von LFP-Batterien für das Jahr 2023 angekündigt haben (IEA, 2022).

Europe		USA		China	
Top 10 NEV models	Cathode chemistry	Top 10 NEV models	Cathode chemistry	Top 10 NEV models	Cathode chemistry
Tesla Model 3	NCA & LFP	Tesla Model Y	NCA & NCMA	Hongguang mini EV	LFP & NMC
Renault Zoe	NMC 721	Tesla Model 3	NCA & LFP	BYD Qin EV	LFP
VW ID.3	NMC 721	Mustang Mach-E	NMC 811	Tesla China Model Y	LFP, NMC811, NCMA
VW ID.4	NMC 721	Chevy Bolt	NMC 721	Tesla China Model 3	LFP, NMC811, NCMA
Kia eNiro	NMC 622	VW ID.4	NMC 721	BYD Han EV	LFP
Ford Kuga PHEV	NMC 532	Nissan Leaf	NMC 532	BYD Song Plus	LFP
Fiat 500 Electric	NMC 622	Audi E-tron	NMC 622	LiXiang One	NMC
Skoda Enyaq iV	NMC 721	Porsche Taycan	NMC 622	Cherry eQ	LFP & NMC
Hyundai Kona Electric	NMC 622 / NCMA	Tesla Model S	NCA	CCAG Benben EV	LFP
Volvo XC40 PHEV	NMC 532	Hyundai Kona Electric	NMC 622 / NCMA	GAC Aion S	NMC

Abbildung 5: Überblick Top-Verkäufe und Kathodenchemie je Modell in EU, USA und China im Jahr 2021 (Cobalt Institute, 2022).

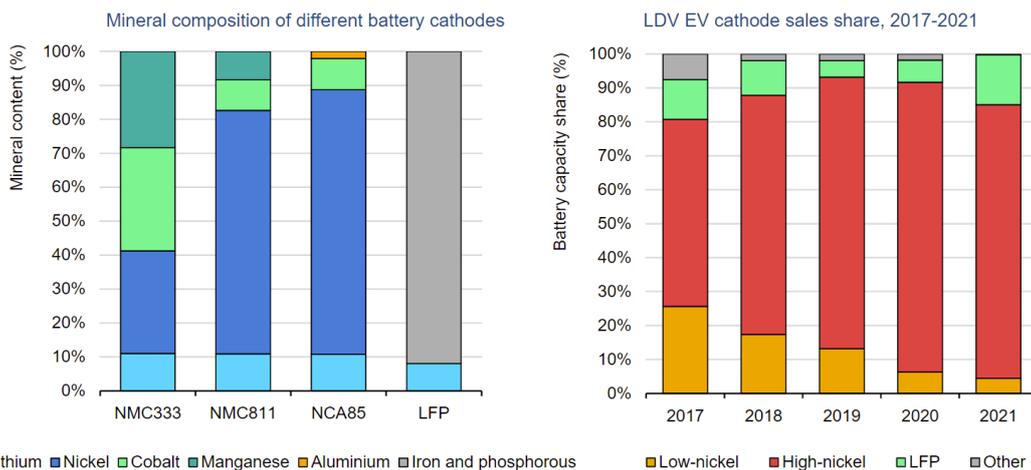


Abbildung 6: Zusammensetzung verschiedener Kathoden von Traktionsbatterien (links) und Anteil an der Batteriekapazität je nach Kathode (rechts) bis 2021 (IEA, 2022). LDV: light-duty vehicle (Personenwagen und leichte Nutzfahrzeuge).

Gemäss der International Energy Agency (IEA) hat sich die globale Nachfrage nach Traktionsbatterien im Jahr 2021 im Vergleich zum Jahr 2020 verdoppelt. Dies ergibt eine Gesamtkapazität von 340 GWh (vgl. Abbildung 7), was mehr als zwei Drittel der gesamten Batterieproduktion entspricht, inkl. stationärer Batterien und elektronischer Geräte. Diese Entwicklung wird v.a. durch den Verkauf von Elektroautos angetrieben. China ist der grösste Markt weltweit mit fast 200 GWh. Danach folgen Europa mit rund 80 GWh und

die USA mit 40 GWh. Die Personenwagen machen global mehr als 80% der Nachfrage nach Traktionsbatterien aus, gefolgt von den Bussen mit ca. 8%. In der Schweiz beträgt die Nachfrage nach Traktionsbatterien im Jahr 2022 rund 2.8 GWh<sup>3</sup>.

Für die künftige Nachfrage nach Traktionsbatterien finden sich in der Literatur zahlreiche Prognosen von diversen Forschungsinstituten. Diese zeigen, dass bis 2030 die Nachfrage nach Lithium-Ionen-Batterien bis um den Faktor 10 wachsen wird. Gemäss IEA wird die Entwicklung der Nachfrage anhand von zwei Szenarien dargestellt. Die globale Nachfrage nach Traktionsbatterien bis 2030 erreicht 2.2 TWh im Szenario STEPS<sup>4</sup>, im ambitionierteren Szenario APS<sup>5</sup> erreicht diese 3.5 TWh (vgl. Abbildung 8). Gegenüber der Produktion im Jahr 2021 bedeutet dies für das Szenario STEPS einen Anstieg der Produktion um mehr als das Sechsfache, für das Szenario APS eine Verzehnfachung. Um ein solches Produktionsniveau zu erreichen, müssten im Szenario STEPS zusätzlich 52 Gigafactories errichtet werden, die über eine jährliche Produktionskapazität von 35 GWh pro Gigafactory verfügen. Im Szenario APS müssten hingegen 90 Gigafactories errichtet werden (siehe auch Kap. 4.1). Damit einhergehend müsste ein massiver Ausbau der Förderung von Rohstoffen wie Lithium, Kobalt und Graphit erfolgen.

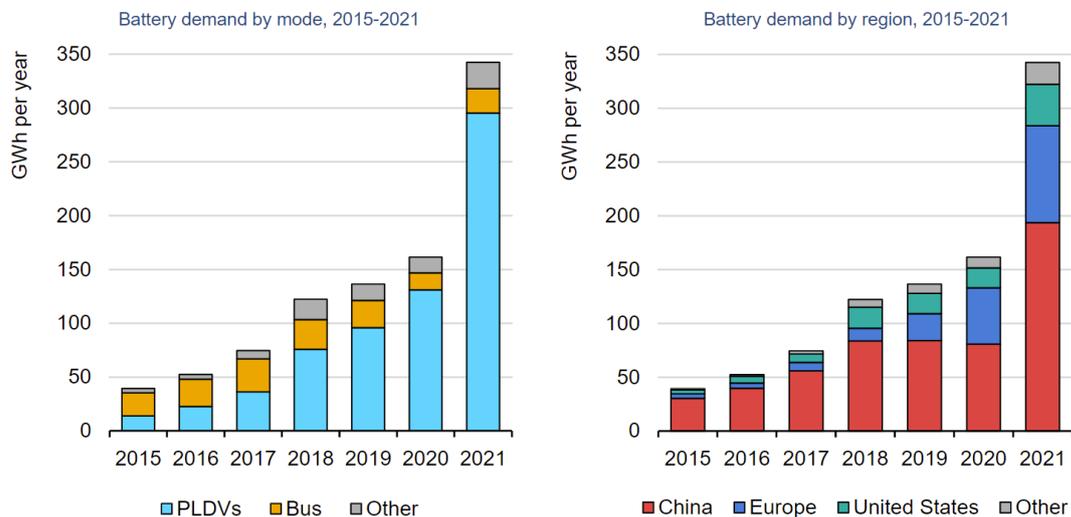


Abbildung 7: Globale Nachfrage nach Traktionsbatterien 2015–2021 (IEA, 2022). PLDV: passenger light-duty vehicle (Personenwagen). Nach Region: gemeint ist das Land, in dem das Auto fährt.

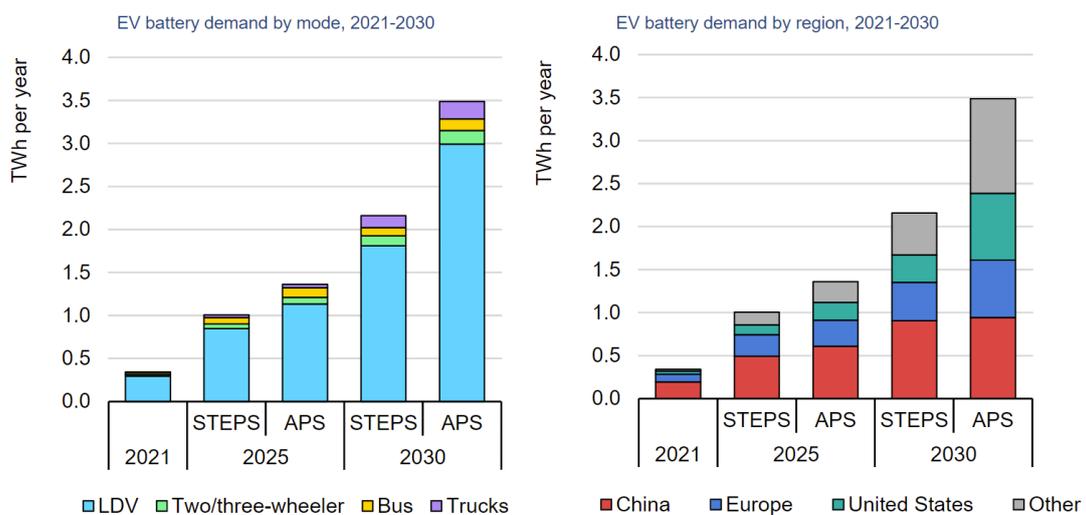


Abbildung 8: Globale Nachfrage nach Traktionsbatterien bis 2030 (IEA, 2022). STEPS = Stated Policies Scenario; APS = Announced Pledges Scenario; LDV = light-duty vehicle.

<sup>3</sup> Berechnung mit durchschnittlicher Batteriekapazität von 70.7 kWh. Betrachtet wurden nur batterieelektrische Fahrzeuge (also keine Plug-in-Modelle).

<sup>4</sup> Das Stated Policies Scenario zeichnet seine Zukunftsprognose nur aufgrund der derzeit tatsächlich ergriffenen Massnahmen und Initiativen.

<sup>5</sup> Das Announced Pledges Scenario beschäftigt sich mit den angekündigten Massnahmen der Staaten und nimmt an, dass die Klimazusagen der Regierungen weltweit vollständig und rechtzeitig umgesetzt werden.

Elektrofahrzeuge sind in der Anschaffung momentan teurer als Verbrennerfahrzeuge. Die Batteriepreise sind jedoch im letzten Jahrzehnt aufgrund von Skaleneffekten und erhöhten Energiedichten stark gefallen. Dies führt zu einer höheren Markttauglichkeit bzw. -attraktivität von Elektrofahrzeugen (vgl. Abbildung 9). Der Preisverfall hat sich jedoch in den letzten Jahren verlangsamt. Der Zeitpunkt der Kostenparität, also wo die Anschaffung eines durchschnittlichen Elektrofahrzeugs gleich viel kostet, wie die eines durchschnittlichen Verbrennerfahrzeugs, wird etwa ab dem Jahr 2026 erreicht (BloombergNEF, 2022b). Fahrzeuge der unteren Kompakt- und Kleinwagenklassen erreichen die Preisparität vermutlich später.

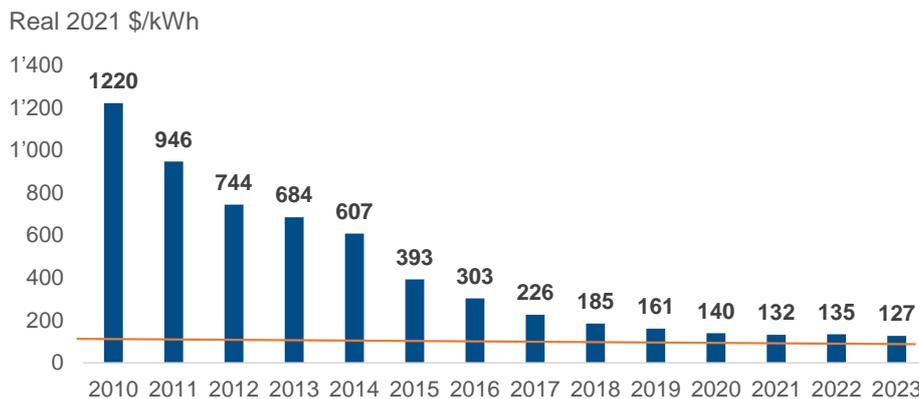


Abbildung 9: Historische und prognostizierte Durchschnittspreise pro kWh für Packungen und Zellen (BloombergNEF, 2022b). Graphik INFRAS. Die orange Linie zeigt den Batteriepreis, bei dem Elektrofahrzeuge die Preisparität mit Verbrennungsfahrzeugen erreichen.

Die Zellpreise haben im Jahr 2021 ein Minimum von ca. 100 \$/kWh erreicht (vgl. Abbildung 10). Für das ganze Batteriepack erreicht der Wert ca. 132 \$/kWh (Bhutada, 2022a). Aufgrund massiv gestiegener Energie- und Rohstoffpreise lagen die Zellpreise im April 2022 wieder höher bei 145–175 \$/kWh. Somit sind diese zum ersten Mal seit 2010 wieder gestiegen (electrive, 2022), was zu einem Anstieg des Batteriepreises von etwa 2% im Jahr 2022 geführt hat (BloombergNEF, 2022b).

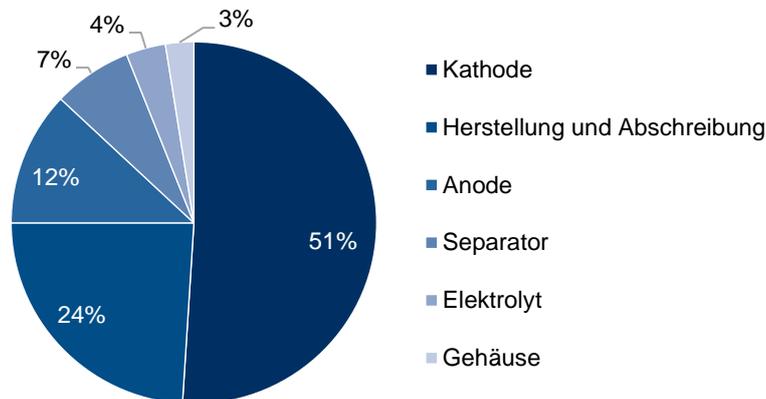


Abbildung 10: Zellpreise aufgeschlüsselt je nach Komponente. Graphik INFRAS. Quelle: Bhutada (2022a).

Die hohe Nachfrage nach Traktionsbatterien hat zu einem erheblichen Anstieg der Nachfrage nach wichtigen Metallen für ihre Herstellung geführt (vgl. Abbildung 11, Abbildung 12 und Abbildung 13). Zwischen Anfang 2021 und Mai 2022 haben sich die Lithiumpreise mehr als versiebenfacht, die Kobaltpreise mehr als verdoppelt und die Nickelpreise fast verdoppelt, wobei bei Kobalt und Nickel die Preise bis Ende 2022 wieder deutlich gesunken sind.



Abbildung 11: Marktpreis von Kobalt, einem Batteriematerial, von 2017 bis 2022, in USD pro Tonne (Tradingeconomics, 2022a).

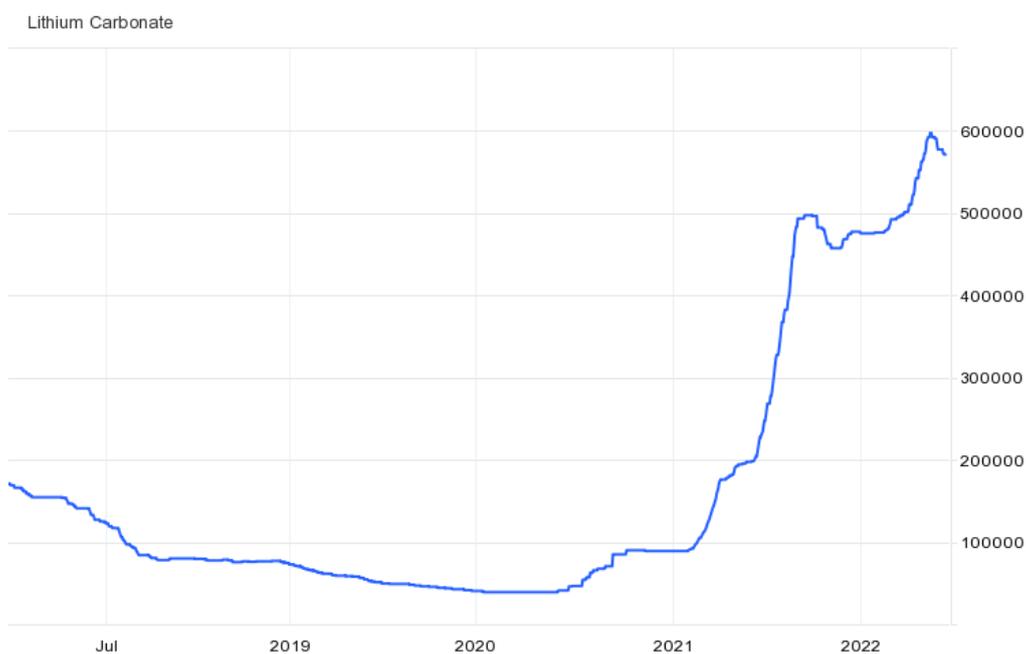


Abbildung 12: Marktpreis von Lithiumcarbonat, dem Vorprodukt von Lithium für die Herstellung von Batterien, in CNY pro Tonne (Tradingeconomics, 2022b).

Der Preisanstieg bei Batteriemetallen ist zurückzuführen auf eine Kombination aus steigender Nachfrage nach Batterien, zunehmendem Druck auf die Lieferketten, Bedenken hinsichtlich einer Verknappung des Angebots und auf Spekulationen. Die Versorgungsengpässe im Jahr 2021 wurden von drei Trends stark beeinflusst: Die durch die Pandemie verursachten Produktionsprobleme, das Bedenken hinsichtlich der Nickelversorgung aus Russland und die strukturellen Unterinvestitionen in neue Lieferkapazitäten in den drei Jahren vor 2021, als die Metallpreise niedrig waren (IEA, 2022).



Abbildung 13: Marktpreis von Nickel, in USD pro Tonne (Tradingeconomics, 2022c).

Es gibt mehrere Faktoren, aufgrund derer sich der Batteriepreis teilweise von den Rohstoffpreiserhöhungen abgekoppelt hat. Die steigenden Preise haben nämlich Anreize für die Umstellung der Chemie gegeben. Viele Autohersteller wechselten zu kostengünstigeren Kathodenchemien mit geringerer Abhängigkeit von den Rohstoffpreisen, wie z.B. LFP. Weiter wurden vermehrt nickelreichere Materialien wie NMC811 verwendet, was den Einsatz des viel teureren Kobalts in Traktionsbatterien deutlich verringert hat (IEA, 2022). Somit dürfte der sinkende Trend der Batteriepreise trotz temporärer Fluktuationen längerfristig gesichert sein. Abbildung 14 zeigt die Prognosen für Batteriechemien in Personenwagen bis 2030 auf. Auffällig ist, dass der Anteil an LFP deutlich steigen wird, bis 35% im «Base» Fall bzw. bis 60% im «Constrained» Fall. Bei NMC-Chemien werden sich v.a. die nickelreicheren Chemien durchsetzen. Weiter werden anderen Chemien wie Natrium-Ionen, LNMO, LNO sowie NMCA eine sekundäre Rolle spielen.

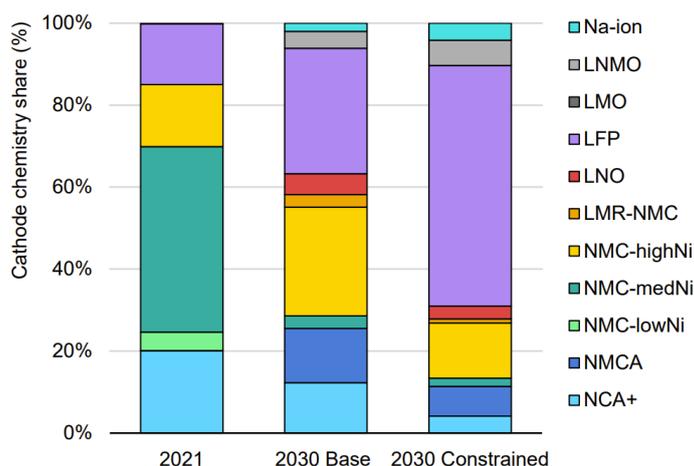


Abbildung 14: Prognosen für Batteriechemien (% Anteil Kathode) in Personenwagen 2021 und 2030. Die Fälle «Base» und «Constrained» beziehen sich auf unterschiedliche Anteile der Batteriechemie im Jahr 2030. Der Basisfall ist das, was unter Berücksichtigung der optimalen Zuweisung von Chemikalien zu geeigneten Anwendungsfällen sowie der jüngsten Preisentwicklung zu erwarten ist. Der Fall der eingeschränkten Chemie zeigt die Folgen einer längeren Periode hoher Rohstoffpreise, verbunden mit starken Reaktionen der Automobilhersteller auf Preissignale. Bemerkungen: NMC-highNi enthält NMC811 und NMC955, NMC-medNi enthält NMC532, NMC622 und NMC721, NMC-lowNi enthält NMC333.

## 2.3 Ökobilanz Batterien

Allgemeine Umweltbilanz von Elektroautos: Welche Rolle spielt die Batterie?

Die Aussagen in diesem Kapitel basieren auf verschiedenen aktuellen Ökobilanzstudien, v.a. aus wissenschaftlicher Literatur (Cox et al., 2018, 2020; Crenna et al., 2021; Dai et al., 2019), dem vom PSI entwickelten *Carculator*<sup>6</sup> sowie auf den neuen Inventaren, die im Auftrag des BAFU durch das PSI für den UVEK Datenbestand erstellt wurden (BAFU, 2023). Für eine bessere Lesbarkeit wird darauf verzichtet, jeder einzelnen Aussage eine Quelle zuzuordnen.

### Anteil der Batterieproduktion über den gesamten Lebenszyklus

Ein durchschnittliches Mittelklasseauto mit etwa 400 km elektrischer Reichweite, das mit Schweizer Strom betrieben wird, hat nach einer totalen Lebensdauer von 200'000 km rund halb so viel klimaschädliche Gase ausgestossen wie ein vergleichbares Diesel- oder Benzinauto. Die Herstellung der Batterie wäre in diesem Beispiel für knapp 20% der Emissionen des Elektrofahrzeuges verantwortlich (vgl. Abbildung 15).

#### Treibhausgasemissionen nach Lebensdauer von 200'000 km

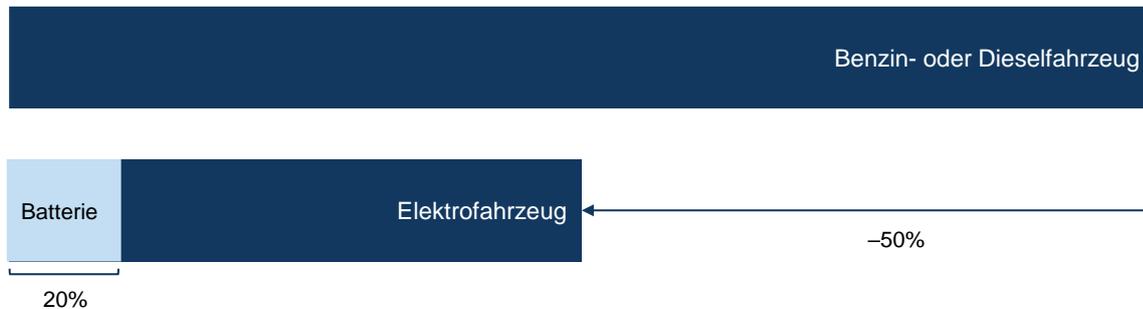


Abbildung 15: Schematische Darstellung der Treibhausgasemissionen eines Mittelklasseautos mit etwa 400 km Reichweite. Graphik INFRAS.

Bei anderen Umweltwirkungen kann das anders aussehen: Bspw. bezüglich der Smogbildung liegt das Elektroauto in einem ähnlichen Bereich wie ein Dieselfahrzeug, beide sind rund 3-mal besser als Benzinautos. Bezüglich der PM10-Emissionen<sup>7</sup> über den gesamten Lebenszyklus liegen die Elektrofahrzeuge leicht über den Ergebnissen von modernen Diesel- oder Benzinautos. Die PM10-Emissionen bei den Elektrofahrzeugen stammen v.a. aus der Gewinnung von Metallen wie Kupfer und Nickel. PM10 wird dabei vor allem in Minen in dünn besiedelten Gebieten emittiert und die Emissionen werden in den nächsten Jahren aufgrund von Verbesserungsmaßnahmen deutlich sinken (vgl. Kap. 4.2). Zurzeit trägt die Batterieproduktion rund 40% zu den PM10-Umweltwirkungen bei, der Rest wird von der Fahrzeugherstellung sowie im Betrieb verursacht. In der Betriebsphase sind allerdings die PM10-Emissionen der Elektrofahrzeuge geringer als bei Diesel- oder Benzinautos (keine gesundheitsschädlichen Auspuffemissionen, vergleichbare Abrieb-Emissionen).

### Anteil der Batterie an der Fahrzeugproduktion

Die Herstellung von Elektrofahrzeugen verursacht rund 25–50%<sup>8</sup> grössere Umweltwirkungen als die Herstellung konventioneller Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren. Zwar benötigen sie keinen Katalysator, der die Platingruppenmetalle Rhodium und Palladium enthält, die pro kg Masse zu den umweltschädlichsten Materialien überhaupt gehören. Dafür benötigen Elektrofahrzeuge mehr Kupfer und mehr (Leistungs-) Elektronik als Verbrenner. In der Fahrzeugproduktion bestimmt v.a. die Herstellung der Traktionsbatterie die potenzielle Umweltwirkung. Bei der Produktion von einem Mittelklasse-PW mit einer Batterie von 42 kWh stammt etwa ein Viertel der Treibhausgasemissionen aus der Batterieproduktion. Bei anderen Umweltwirkungen, wie der Humantoxizität oder dem Bedarf an mineralischen Rohstoffen, verursacht die Batterieproduktion etwa die Hälfte der gesamten Umweltwirkungen aus der Fahrzeugproduktion.

<sup>6</sup> <https://calculator.psi.ch/>

<sup>7</sup> Als PM10 resp. PM2.5 werden Partikel bezeichnet, deren Durchmesser weniger als 10 resp. 2.5 Tausendstel-Millimeter beträgt. Ab PM10 wird auch von «Feinstaub» gesprochen.

<sup>8</sup> Abhängig von der betrachteten Umweltwirkung.

### **Umweltwirkungen aus Betrieb und End-of-Life**

Elektrofahrzeuge verursachen im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren keine direkten Emissionen im Betrieb, ausser Reifen- und Bremsabrieb. Sie sind etwa 4-mal energieeffizienter als vergleichbare Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren. Zudem entstehen geringere Umweltschäden durch die Energiebereitstellung und Umwandlung, weil sie weniger Energie verbrauchen und weil der benötigte Strom mit weniger Umweltwirkungen generiert werden kann, als dies bei Benzin oder Diesel der Fall ist. Auch brauchen Elektrofahrzeuge weniger Betriebsmittel wie z.B. Motorenöl, was ebenfalls eine geringere Umweltwirkung bedeutet.

Ausserdem können die Materialien, die im Fahrzeug und in der Batterie stecken, am Lebensende durch einen Recyclingprozess zurückgewonnen werden. Der Treibstoff, den Verbrennerfahrzeuge verbrauchen, stammt dagegen oft aus umweltschädlicher Produktion und ist danach unwiederbringlich verloren.

### **Umweltwirkungen über den gesamten Lebenszyklus**

Ein Elektroauto startet mit einem grösseren ökologischen Rucksack als ein Verbrenner, addiert aber mit jedem gefahrenen Kilometer weniger Umweltschäden dazu. Nach einer gewissen zurückgelegten Distanz hat das Elektroauto also insgesamt geringere Umweltwirkungen verursacht.

Wie gross die Distanz ist, bei der das Elektroauto und der Verbrenner gleich viel Umweltschäden verursacht haben, hängt von verschiedenen Faktoren ab:

- 1. Untersuchte Umweltwirkung**
- 2. Grösse, Chemie und Herkunft der Batterie**
- 3. Fahrzeugkategorie**
- 4. Stromherkunft für den Betrieb des Fahrzeuges**

#### **1: Untersuchte Umweltwirkung**

Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren verursachen v.a. in ihrem Betrieb Treibhausgasemissionen. So kann der Treibhausgas-Rucksack von Elektrofahrzeugen schon nach rund 25'000 Kilometern (je nach Fahrzeugklasse) kleiner sein als der von Verbrennern. Moderne Verbrennerfahrzeuge stossen jedoch relativ wenig toxische Schadstoffe aus, wie NO<sub>x</sub>, PM oder SO<sub>2</sub>. Dies ist auf den geringen Schwefelgehalt im Treibstoff und die eingesetzten Katalysatoren zurückzuführen. Entsprechend länger dauert es, bis der zusätzliche Toxizitäts-Rucksack von der Produktion des Elektrofahrzeugs ausgeglichen wird. Hier kann es sogar sein, dass die durchschnittliche Lebenserwartung eines Fahrzeugs nicht reicht und so das Elektroauto hinsichtlich potenzieller humantoxischer Effekte insgesamt schlechter abschneiden kann als ein Diesel- oder Benzinfahrzeug.

#### **2. Grösse, Chemie und Herkunft der Batterie**

Je grösser die Batterie eines Elektroautos, desto grösser wird die Umweltbelastung pro gefahrenem km. Die Batteriegrössen der in der Schweiz erhältlichen Elektroautos liegen zwischen 27 und 108 kWh. Damit kann, je nach Modell, auch die Umweltbelastung durch die Batterieproduktion um etwa einen Faktor 4 grösser oder kleiner sein. Das bedeutet aber nicht, dass ein Elektroauto mit grosser Batterie auch viermal weiter fahren muss, bis es ökologisch besser wird als ein Verbrenner. Das kommt daher, dass ein grosses Elektroauto auch mit einem grossen Verbrenner verglichen werden muss und dieser mehr Treibstoff verbraucht als ein kleiner Verbrenner und darum auch mehr Emissionen pro km verursacht (siehe auch Punkt 3).

Die Zellchemie, insbesondere die Zusammensetzung der Kathode, spielt eine gewisse Rolle. Die unterschiedlichen Anteile an Nickel, Mangan und Kobalt in NMC-Batterien können die Umweltwirkungen um einige Prozent verschieben. Die Umweltwirkungen von NCA-Batterien liegen im selben Bereich wie die der NMC-Batterien. Wichtiger wird der Unterschied zwischen NMC- oder NCA-Batterien verglichen mit den LFP-Batterien. Bezogen auf den maximalen Energieinhalt der Batterie kann die Umweltwirkung bei LFP um 20% bis 30% geringer ausfallen.

Die Herkunft der Batterie spielt hierbei eine Rolle, weil die Strombereitstellung in verschiedenen Ländern oder Weltregionen mit unterschiedlichen spezifischen Umweltwirkungen verbunden ist. So kann eine Produktion in China wegen dem hohen Anteil an Kohlekraftwerken eine um etwa 20% schlechtere Klimabilanz der Batterie verursachen als eine Produktion in Europa. Mehr Details zu den Umweltwirkungen der Batterieproduktion finden sich im Kap. 4.4.

### 3. Fahrzeugkategorie

Fahrzeuge mit einer grösseren Batterie sind typischerweise auch grösser und schwerer als die Fahrzeuge mit kleiner Batterie, selbst inklusive der Batterie. So wiegt z.B. ein Mercedes EQS 53 4matic+ mit einer 108.4 kWh grossen Batterie 2.65 Tonnen. Auf der anderen Seite des Spektrums liegt der Dacia Spring mit einer 26.8 kWh Batterie und einem Leergewicht von 1 Tonne. Die Herstellung des Mercedes dürfte eine rund 3-mal höhere Umweltbelastung verursachen als die Herstellung des Dacia. Aber auch bei Verbrennerfahrzeugen gibt es entsprechende Unterschiede und ein Vergleich von einem Elektro-Kleinwagen mit einem Verbrenner-Oberklassefahrzeug wäre nicht fair. So muss also ein Dacia mit einem Kleinwagen verglichen werden, der etwa 4-5 l/100 km Benzin verbraucht, um die Distanz zu berechnen, nach der sich der ökologische Mehraufwand zur Produktion eines Elektroautos gelohnt hat. Für den Mercedes EQS hingegen muss ein Vergleichsfahrzeug mit einem Verbrauch von über 10 l/100 km betrachtet werden.

### 4. Stromherkunft für den Betrieb des Fahrzeuges

Nicht zuletzt kann die Herkunft vom Ladestrom einen grossen Einfluss haben. Strom aus Wasser- oder Windkraft verursacht eine sehr geringe Umweltbelastung, während Strom aus Öl-, Kohle- und Kernkraftwerken pro kWh eine etwa 20-30-fache höhere Umweltbelastung aufweist. Natürlich ist darum der ökologische Rucksack von Elektrofahrzeugen schneller amortisiert, wenn sie mit sauberem Strom betrieben werden. Aber selbst wenn ein durchschnittliches Elektrofahrzeug mit Strom aus einem Kohlekraftwerk betrieben werden würde, läge dessen Beitrag zum Klimawandel am Lebensende noch unter dem eines vergleichbaren Diesel- oder Benzinautos.

Ein durchschnittliches Mittelklasseauto mit etwa 300 km elektrischer Reichweite, das mit Schweizer Strom betrieben wird, muss also rund 30'000 km gefahren werden, bis der ökologische Rucksack im Vergleich zu einem Benzin- oder Dieselauto amortisiert ist. Nach einer totalen Lebensdauer von 200'000 km hat das Elektrofahrzeug rund halb so viel klimaschädliche Gase ausgestossen wie ein Diesel- oder Benzinauto. Ein Elektroauto mit grösserer Batterie, z.B. Oberklasse mit 500 km Reichweite, braucht bis zu 45'000 km, um den ökologischen Rucksack der Herstellung zu kompensieren. Ein leichter Kleinwagen mit nur etwa 150 km Reichweite braucht dafür nur etwa 25'000 km.

*Wo entsteht die Umweltwirkung in der Batterieproduktion?*

Ökobilanzen betrachten sämtliche Prozesse von der Rohstoffgewinnung über die Metallherstellung oder die Energiebereitstellung bis zum letzten Produktionsschritt einer fertigen Batterie. Verschiedene Studien fassen jedoch die tausende Prozesse, die in der gesamten Produktionskette benötigt werden, unterschiedlich zusammen. Das kann dazu führen, dass gewisse Prozesse unterschiedlich gewichtet werden und je nach Studie wichtiger oder unwichtiger erscheinen. In Crenna et al. (2021) werden die Umweltwirkungen jeweils aufsummiert über alle Produkte und Prozesse. So betrachtet, macht die Herstellung der Batteriezellen je nach Wirkungskategorie zwischen 50% und 90% der Umweltwirkung der Batterieproduktion aus (vgl. Abbildung 16).

Der Rest kommt aus der Herstellung der Materialien, in denen die Zellen eingepackt sind, aus der Herstellung des Batteriemanagementsystems, aus der Herstellung der Kontaktierungsmaterialien, der Kühlflüssigkeit und aus dem Strombedarf für das Zusammensetzen der Batterie. Bei der Zellproduktion wiederum sind die Produktion der Kathode und des Kupferkollektors am wichtigsten, v.a. bezüglich potenziell toxischer Wirkung. Zusammen machen sie rund 60% bis 80% der Umweltwirkungen der Zellproduktion aus. Weiter ist auch die Herstellung von Graphit und Aluminium für die Anode von Bedeutung. Bei der Produktion der Kathode ist die Herstellung des Kathodenpulvers für 70% bis 90% der Umweltwirkung verantwortlich und bei der Herstellung dieses Pulvers wiederum ist die Herstellung des jeweiligen Hydroxids für

50%–60% der Umweltwirkung verantwortlich. Die Publikation löst nicht weiter auf, woher die Umweltwirkungen der Hydroxidproduktion stammen. Jedoch zeigt sich, dass die Strom- und Wärmebereitstellungsprozesse in allen Produktionsschritten nur knapp 20% zur gesamten Klimawirkung einer Batterie beitragen (Crenna et al., 2021). Dai et al. (2019) hingegen fanden leicht andere Anteile, die Hauptaussagen stimmen jedoch überein.



Abbildung 16: Schematische Darstellung der Umweltauswirkungen in der Batterieherstellung. Graphik INFRAS.

Ältere Studien gingen oft von noch höherem Energiebedarf in der Produktion aus. Daher kamen sie entsprechend auf viel grössere Umweltwirkungen pro kWh Batterie und auf viel höhere Beiträge der Energiebereitstellung. Die verwendeten Grundlagen dieser Studien stammen meist aus Laborprozessen, die jedoch mit den grossindustriellen Produktionen nicht viel zu tun haben, die Dai et al. (2019) und Crenna et al. (2021) als Datengrundlage genutzt haben.

### Fazit / Ausblick auf künftige Entwicklung

Die Batterieproduktion (und Entsorgung) verursacht einen gewichtigen Teil der Umweltwirkung von Elektrofahrzeugen. Obwohl E-Autos weniger Klimawandel verursachen als Benzin- oder Dieselfahrzeuge und die übrigen Umweltschäden auch tiefer oder zumindest nicht signifikant höher sind, muss das Ziel sein, möglichst kleine Batterien zu benutzen und deren Herstellung möglichst umweltfreundlich zu gestalten. Wenn künftig Strom und Wärme für die Produktion der aktiven Materialien von Batterien aus erneuerbaren Quellen stammen, könnten zwischen 20 und 40% Treibhausgasemissionen eingespart werden. Zusätzliche Einsparungen können durch die Wahl anderer aktiver Materialien oder durch Verbesserungen der Prozesse (Lernen und Skaleneffekte) erreicht werden. Insgesamt ist eine Halbierung der Umweltwirkungen pro kWh Batterie in den nächsten ein bis zwei Jahrzehnten durchaus realistisch.

## 2.4 EU-Gesetzgebung

*Welche Rolle spielt die angekündigte Verordnung des Europäischen Parlaments und des Europarats über Batterien und Altbatterien?*

Die nachfolgende Zusammenfassung basiert auf den Dokumenten «New EU regulatory framework for batteries: Setting sustainability requirements» aus der Serie «Briefing: EU Legislation in Progress» des Europäischen Parlamentes vom März 2022 (Halleux, 2022) sowie dem Schreiben des Generalsekretärs des EU-Rates in dieser Sache von Anfang 2023 (Council of European Union, 2023). Im Jahr 2018 wurde der strategische Aktionsplan für Batterien verabschiedet. Dies geschah im Rahmen des dritten Mobilitätspakets «Europa in Bewegung» (European Commission, 2021). Am 10. Dezember 2020 wurde der darauf aufbauende Vorschlag für eine neue Verordnung über Batterien und Altbatterien angenommen. Dieser will die EU-Rechtsvorschriften im «End-of-Life»-Bereich modernisieren. Damit sind Nachhaltigkeit und Wettbewerbsfähigkeit innerhalb der europäischen Batteriewertschöpfungskette zu gewährleisten. Der Vorschlag ist Teil des europäischen «Green Deal» und den damit verbundenen Initiativen, einschliesslich des Aktionsplans für die Kreislaufwirtschaft und der neuen Industriestrategie. Im Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft wurden Batterien als einer der ressourcenintensiven Sektoren mit hohem Potenzial für die Kreislaufwirtschaft genannt, die vorrangig behandelt werden müssen.

Die vorgeschlagene neue Verordnung über Batterien und Altbatterien (Council of European Union, 2023) soll die Batterierichtlinie von 2006 (European Parliament, 2006) ersetzen. Sie verfolgt drei miteinander verbundene Ziele:

- (I) die Stärkung eines funktionierenden Binnenmarktes (einschliesslich Produkte, Verfahren, Altbatterien und deren Rezyklate) durch die Gewährleistung gleicher Wettbewerbsbedingungen sowie durch ein gemeinsames Regelwerk,
- (II) die Förderung einer Kreislaufwirtschaft, sowie
- (III) eine Reduktion der (negativen) ökologischen und sozialen Auswirkungen entlang aller Phasen im Lebenszyklus von Batterien.

Die Verordnung legt daher Anforderungen für die folgenden Bereiche fest: die Nachhaltigkeit, die Sicherheit sowie die Kennzeichnung hinsichtlich der Inverkehrbringung und der Inbetriebnahme von Batterien sowie deren Entsorgung am Ende des Lebenszyklus. Die wichtigsten Eckpunkte der neuen Verordnung in Bezug auf Batterien von Elektrofahrzeugen sind<sup>9</sup>:

- **Batterieklassifizierung:** Einführung von zwei neuen Klassen für Batterien aus Elektrofahrzeugen, sowie Batterien von leichten Transportmitteln (wie z.B. E-Bikes oder E-Scooter) neben den bereits bestehenden Klassen für Geräte-, Starter- und Industriebatterien;
- **Carbon Footprint:** Progressiv steigende Anforderungen für eine Minimierung des Carbon Footprint bei Batterien aus Elektrofahrzeugen, aus leichten Transportmitteln sowie wiederaufladbaren Industriebatterien. Für Batterien aus Elektrofahrzeugen wird es 18 Monate nach dem Inkrafttreten dieser Verordnung Pflicht sein, den Carbon Footprint auszuweisen; 36 Monate nach Inkrafttreten eine Einstufung in unterschiedliche Leistungskategorien und eine entsprechende Kennzeichnung («Label») zu machen; und ab dem 54. Monat kommen Höchstwerte für den Carbon Footprint über den gesamten Lebenszyklus von diesen Batterien zur Anwendung;
- **Sekundäranteil:** Verpflichtung zur Deklaration des Anteils an benutztem Sekundärmaterial 5 Jahre nach Inkrafttreten dieser Verordnung für alle Batterien, welche Kobalt, Blei, Lithium oder Nickel als Teil des aktiven Materials enthalten. Progressiv treten verbindliche Mindestwerte für den Sekundäranteil dieser Materialien in Kraft: 16% Kobalt, 85% Blei, 6% Lithium und 6% Nickel nach 8 Jahren – mit Erhöhung auf 26% Kobalt, 12% Lithium und 15% Nickel 13 Jahre nach dem Inkrafttreten dieser Verordnung;
- Einführung von **Sicherheitskriterien** bei stationären Batteriespeichersystemen;
- **Verantwortungsvolle Lieferketten:** Obligatorische «Due Diligence» durch unabhängige, staatlich anerkannte Prüfinstanzen, basierend auf internationalen Standards für «Due Diligence», für alle Wirtschaftsakteure, die in Europa Batterien auf den Markt bringen;

<sup>9</sup> Basierend auf den letzten Informationen, publiziert am 18. Januar 2023 durch den Generalsekretär des EU-Rates (Council of European Union, 2023).

- Progressiv **ansteigende Sammelquoten** für Geräte-Alt-Batterien von 45% Ende 2023 auf 73% bis Ende 2030, für Batterien von leichten Transportmitteln auf 61% bis Ende 2030. Für die Batterien aus Elektrofahrzeugen muss ein Sammelsystem – ohne Kostenfolgen für Kund/-innen – bereitgestellt werden, so dass diese Batterien vollständig gesammelt werden können;
- **Recyclingrate**: neue Zielvorgaben für Batterien auf Lithiumbasis (65% bis 2025, 70% bis 2030). Verwertungsquoten von 90% für Kobalt, Kupfer, Blei und Nickel sowie 50% für Lithium bis Ende 2027 und von 95% für Kobalt, Kupfer, Blei und Nickel und 80% für Lithium bis Ende 2030;
- **«Second Life»**: Definition der Anforderungen betreffend Wiederverwendung und Wiederaufbereitung von Industrie- und Elektrofahrzeugbatterien für ein zweites Leben;
- **Kenzeichnungs- und Informationsanforderungen**: 3 Jahre nach dem Inkrafttreten dieser Verordnung sollen Batterien mit einem Etikett gekennzeichnet sein, welches alle erforderlichen Informationen zur Identifizierung der Hauptmerkmale einer Batterie enthält. Verschiedene Etiketten, auf der Batterie oder der Batteriepackung, werden Informationen über die Lebensdauer, die Ladekapazität, Anforderungen an eine getrennte Sammlung, das Vorhandensein gefährlicher Stoffe sowie Sicherheitsrisiken enthalten. Bei gewissen Batterietypen wird ein QR-Code den Zugang zu diesen Informationen ermöglichen. Zudem müssen die Batterien ein Batterie-Management-System enthalten, welches jene Daten speichert, die zur Bestimmung des Gesundheitszustands und der erwarteten Lebensdauer der Batterien erforderlich sind;
- **«Battery Passport»**: Einrichtung bis 42 Monate nach dem Inkrafttreten dieser Verordnung eines elektronischen Austauschsystems für Batterieinformationen mit der Erstellung eines elektronischen Batteriepasses für jede in Verkehr gebrachte oder in Betrieb genommene Industriebatterie, Batterie für Elektrofahrzeuge sowie Batterie für leichte Transportmittel.

Der Vorschlag sieht auch die Entwicklung von verbindlichen Mindestkriterien/-zielen für die umweltfreundliche öffentliche Beschaffung vor. Am 9. Dezember 2022 erzielten das EU-Parlament und der Rat eine vorläufige Einigung über die Überarbeitung der EU-Batterievorschriften im Rahmen des «Trilog»-Verfahrens, welches seit Frühjahr 2022 zwischen Kommission, Parlament sowie dem Ministerrat der Mitgliedsstaaten im Gange war<sup>10</sup>. In einem nächsten Schritt müssen EU-Parlament und -Rat formal dieser Einigung noch zustimmen, womit die Verordnung erst in einigen Monaten in Kraft treten dürfte. Als Verordnung ist sie in allen EU-Mitgliedstaaten direkt wirksam und bedarf keiner Umsetzung durch nationale Gesetze.

*Was sind die Implikationen der neuen Richtlinie betreffend Nachhaltigkeitsberichterstattung – auch als EU-Lieferkettengesetz bezeichnet – für den Bereich Traktionsbatterien?*

Die Richtlinie über die Nachhaltigkeitsberichterstattung von Unternehmen (engl. Corporate Sustainability Reporting Directive, CSRD), auch als EU-Lieferkettengesetz bezeichnet, wurde im Februar 2022 von der Europäischen Kommission verabschiedet und per 5. Januar 2023 in Kraft gesetzt<sup>11</sup>. In einem nächsten Schritt haben jetzt alle Mitgliedstaaten der Europäischen Union zwei Jahre Zeit, diese Richtlinie in ihren nationalen Gesetzgebungen aufzunehmen. Inhaltlich geht es bei der CSRD darum, ein nachhaltiges und verantwortungsvolles unternehmerisches Verhalten in allen globalen Wertschöpfungsketten zu fördern. Unternehmen sollen verpflichtet werden, negative Auswirkungen ihrer Tätigkeit zu ermitteln und erforderlichenfalls zu verhindern, abzustellen oder zu vermindern. Hierzu gehören Auswirkungen auf die Menschenrechte, wie Kinderarbeit und Ausbeutung von Arbeitnehmenden, aber auch auf die Umwelt, wie Umweltverschmutzung und Verlust an biologischer Vielfalt.

Betroffen davon sind alle EU-Firmen mit mehr als 500 Mitarbeitenden sowie mit einem generierten Umsatz von mehr als 150 Mio. EUR. Für ressourcen-intensive Unternehmen gilt diese Richtlinie bereits ab 250 Mitarbeitenden und 40 Mio. EUR Umsatz. Aber auch alle nicht EU-Firmen, also z.B. CH-Firmen, wel-

<sup>10</sup> <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-5469-2023-INIT/en/pdf>

<sup>11</sup> [https://finance.ec.europa.eu/capital-markets-union-and-financial-markets/company-reporting-and-auditing/company-reporting/corporate-sustainability-reporting\\_en](https://finance.ec.europa.eu/capital-markets-union-and-financial-markets/company-reporting-and-auditing/company-reporting/corporate-sustainability-reporting_en)

che mehr als 150 Mio. EUR Umsatz innerhalb der EU erzielen, unterliegen dieser Richtlinie. Die Vorschriften beziehen sich dabei auch auf Tochtergesellschaften sowie auf die Wertschöpfungsketten der betroffenen Firmen.

Diese Vorschriften umfassen u.a. folgende Aspekte/Themen:

- die Sorgfaltspflicht zu einem integralen Bestandteil der Unternehmenspolitik zu machen,
- tatsächliche oder potenzielle negative Auswirkungen auf die Menschenrechte sowie auf die Umwelt zu ermitteln, wobei potenzielle Auswirkungen zu verhindern oder abzuschwächen sind und tatsächliche Auswirkungen abzustellen, resp. auf ein Minimum zu reduzieren sind,
- sowie die Wirksamkeit dieser Strategien und Massnahmen zur Erfüllung der Sorgfaltspflicht zu kontrollieren und öffentlich über diese Wahrnehmung ihrer Sorgfaltspflicht zu kommunizieren.

Inhaltlich geht es bei der CSRD darum, dass besser über Auswirkungen von Unternehmen auf die Bereiche Menschenrechte und Umwelt informiert wird und damit mehr Transparenz für Öffentlichkeit, Konsument\*innen und Anlegende geschaffen wird. Ziel ist es, einen wirksameren Schutz der Menschenrechte zu erreichen, wie z.B. die Gewährung von sicheren und gesunden Arbeitsbedingungen und negative Umweltauswirkungen zu vermeiden, welche gegen die wichtigsten internationalen Umweltübereinkommen verstossen. Dazu gehört auch, dass die Unternehmen über einen Plan verfügen müssen, welcher aufzeigt, dass Ihre Geschäftsstrategie im Einklang ist mit der Begrenzung der Klimaerwärmung auf 1.5 °C, gemäss dem Pariser Abkommen.

Die vom Unternehmen bereitgestellten Informationen sollen damit einfacher und besser lesbar werden, so dass die Unternehmen ihrer Rolle in der Gesellschaft in vollem Umfang gerecht werden. Zentrale und neue Elemente der CSRD sind u.a.

- detailliertere Berichtspflichten, welche grosse Unternehmen dazu verpflichten, Informationen zu Nachhaltigkeitsfragen wie Umweltrechten, sozialen Rechten, Menschenrechten und Governance-Faktoren zu veröffentlichen,
- eine Zertifizierungspflicht für die Nachhaltigkeitsberichterstattung,
- eine Präzisierung der von den Unternehmen bereitzustellenden Informationen und das Erfordernis ihrer Bereitstellung im Einklang mit verbindlichen, in der gesamten EU geltenden Standards für die Nachhaltigkeitsberichterstattung,
- sowie die Vorgabe, dass alle Informationen in einem gesonderten Abschnitt der Lageberichte der Unternehmen veröffentlicht werden.

Diese Richtlinie gilt auch für alle Nicht-EU-Unternehmen, welche in der EU einen Umsatz von mehr als 150 Mio. EUR erzielen und über mindestens eine Tochtergesellschaft oder Zweigniederlassung in der EU verfügen. Auf politischer Ebene ist die Schweiz für den Moment am «beobachten». Auf eine Interpellation zu diesem Thema vom Dezember 2020 hat der Bundesrat im Februar 2021 geantwortet, dass der Bundesrat die Diskussionen im Ausland um das Thema der verantwortungsvollen Unternehmensführung verfolge und die Entwicklungen genau beobachte, insbesondere diejenigen in der Europäischen Union und in Deutschland<sup>12</sup>. In seiner damaligen Antwort bringt der Bundesrat zum Ausdruck, dass allfällige neue Richtlinien in dieser Hinsicht zuerst analysiert werden müssten, bevor Massnahmen ergriffen würden – wobei die Schweiz klar ja sagte hinsichtlich der Erarbeitung von internationalen Standards in dieser Angelegenheit. Mit dem indirekten Gegenvorschlag zur Konzernverantwortungsinitiative, welche im November 2020 mit 50.7% «Ja-Stimmen» am Ständemehr gescheitert ist, hatte der Bundesrat seine Absicht für ein solches, international abgestimmtes Vorgehen bekräftigt; ein Thema, welches mit dem Inkrafttreten der CSRD in der EU an Aktualität gewonnen hat.

<sup>12</sup> <https://www.parlament.ch/de/ratsbetrieb/suche-curia-vista/geschaefft?AffairId=20204682>

## 3. Rohstoffförderung

### 3.1 Überblick Rohstoffförderung

*Wo werden welche Rohstoffe gewonnen? Wie hoch sind die weltweiten Reserven? Ist eine Knappheit für Rohstoffe mit steigender Nachfrage zu erwarten?*

Die wichtigsten Rohstoffe für NMC-Zellen von Traktionsbatterien sind Kobalt, Lithium, Nickel, Kupfer, Graphit und Mangan. LFP-Batterien kommen dagegen ohne Nickel, Mangan und Kobalt aus. Für die Batterie als Ganzes ist auch Stahl und/oder Aluminium relevant, als stromleitendes Substrat der Kathode und für die Verpackung (Fraunhofer ISI, 2020). Seltene Erden werden in Batterien nicht benutzt, sind aber für die Produktion einiger Elektromotoren relevant.

Rohstoffe wie Kobalt, Lithium, Nickel, Kupfer, Graphit und Mangan gelten mit Blick auf eine zukünftige Elektrifizierung der Mobilität global betrachtet als ausreichend vorhanden. Die Rohstoffsituation für Kobalt wird sich aufgrund der Entwicklung hin zu kobaltreduzierten und nickelreichen Batterien sehr wahrscheinlich entschärfen. Bei Lithium dürfte die Rohstoffverfügbarkeit weiterhin unkritisch bleiben, bzgl. Nickel bestehen noch Unsicherheiten. Jedoch können für einzelne Rohstoffe temporäre Verknappungen, Lieferengpässe oder kurzfristige Preissteigerungen nicht ausgeschlossen werden. Bspw. bei der Erschliessung von neuen Förderstätten, falls die Rohstoffe zeitlich nicht entsprechend der Nachfrage gefördert werden können oder ein Export aus den Förderländern nicht garantiert werden kann. Für Lithium, Kupfer, Kobalt, und Nickel werden ausgereifte Recyclingverfahren im industriellen Massstab künftig relevanter (Fraunhofer ISI, 2020).

#### **Zunahme der Ressourcen bzw. Reserven**

Es ist ein bekanntes Phänomen, dass mit steigender Nachfrage die Ressource bzw. Reserve meist nicht kleiner, sondern grösser wird (H. J. Althaus et al., 2015). Die Reserven – also das bestätigte Vorkommen eines Rohstoffs, das mit heutiger Technik wirtschaftlich förderbar ist – wurden in der Vergangenheit ständig durch steigende Metallpreise und durch zuvor nicht entdeckte und identifizierte Ressourcen – das potenziell abbaubare Vorkommen eines Rohstoffs – erhöht. Dies ist das Ergebnis des derzeitigen wirtschaftlichen Verhaltens. Bergbauunternehmen investieren i.d.R. nur so viel, wie sie kurzfristig benötigen, um Reserven nachzuweisen und damit Investitionsentscheidungen über einen Zeitraum von z.B. 20 Jahren zu rechtfertigen. Sie zielen nicht unbedingt darauf ab, den gesamten Erzkörper nachzuweisen (Europäische Kommission, 2010).

#### **Kobalt**

Im Jahr 2021 erreichte die Kobaltweltproduktion mit 170'000 Tonnen ihren bisherigen Höchststand, nachdem diese 2019 noch bei 144'000 Tonnen gelegen hatte (USGS, 2022b). Treibende Kraft für diese Zunahme war das weltweite Wachstum der Elektromobilität. Mehr als 70% der globalen Kobalterze stammen aus der Demokratischen Republik Kongo – vorwiegend als Nebenprodukt der Kupfer- und Nickelminen – mit einer Produktion von 120'000 Tonnen im Jahr 2021. Geschätzte 12% bis 30% davon werden in kleinen artisanalen Minen gewonnen, wo mit sehr einfachen mechanischen Methoden gearbeitet wird. Der Rest wird industriell gefördert (Cobalt Institute, 2022). Andere wichtige Produzenten sind Russland mit 7'600 Tonnen, Kanada mit 4'300 Tonnen, Kuba mit 3'900 Tonnen und Australien mit 5'600 Tonnen (USGS, 2022). Kobalt wird fast ausschliesslich zusammen mit anderen Metallen wie Kupfer, Nickel, Platingruppenmetalle und Zink gefördert. Die Verarbeitung der Erze zu metallischem Kobalt findet zum grössten Teil in China statt, wo auch ein grosser Teil der Erze aus dem Kongo verarbeitet wird. Wichtige Anwendungen für Kobalt sind Superlegierungen, speziell harte Werkstoffe für Schneidwerkzeuge, Katalysatoren, Pigmente und magnetische Legierungen, letztere kommen in Elektromotoren zum Einsatz. Rund 34% des globalen Kobalts wurde im Jahr 2021 für die Produktion von Traktionsbatterien eingesetzt (Cobalt Institute, 2022).

Bis 2026 deutet sich für die Lithium-Ionen-Batterien im Rahmen der Elektromobilität mindestens eine Verdoppelung des heutigen globalen Kobaltbedarfs an (Buchholz, 2021). Prognostizierte Berechnungen vom Fraunhofer ISI ergeben einen globalen Bedarf für Kobalt, unter Berücksichtigung von kobaltreduzierten Materialien, von 150'000 bis 250'000 Tonnen für das Jahr 2050. Die Prognosen zum globalen Bedarf von

Bloomberg bewegen sich am unteren Rand der Spannweite mit rund 100'000 Tonnen im Jahr 2030 (BloombergNEF, 2022a). Kumuliert wären das 6 bis 9 Mio. Tonnen Kobalt – als Primärmaterial – ab heute bis ins Jahr 2050 (Fraunhofer ISI, 2020). Die weltweiten Reserven von Kobalt wurden im Jahr 2021 auf 7.6 Mio. Tonnen geschätzt (USGS, 2022b). Das entspricht der 45-fachen Fördermenge des Jahres 2021. Die landgebundenen Ressourcen liegen bei 25 Mio. Tonnen und weitere 120 Mio. Tonnen Kobaltreserven könnten sich in Manganknollen auf dem Grund des Atlantiks, des Indischen sowie des Pazifischen Ozeans befinden (VDI/VDE, 2021). Um diese Ressourcen profitabel zu nutzen, braucht es aber noch einige Entwicklungen in der Abbautechnologie. Zudem gibt es Vorbehalte v.a. aus ökologischer Sicht.

Kobalt kann zu über 90% aus gesammelten Batterien zurückgewonnen werden (Fraunhofer ISI, 2020; VDI/VDE, 2021). Aktuell ist die EU auf Kobaltimporte angewiesen. Jedoch verfügt Finnland sowohl über Kobaltreserven wie auch Raffineriekapazitäten. Der finnische Anteil am globalen Kobaltabbau beträgt zurzeit lediglich ca. 0.8% (VDI/VDE, 2021).

### **Lithium**

Die globale Jahresproduktion im Jahr 2021 belief sich auf 104'800 Tonnen. Davon stammten 55'000 Tonnen aus Australien, 26'000 Tonnen aus Chile, 14'000 Tonnen aus China, 6'200 Tonnen aus Argentinien und 3'600 Tonnen aus drei weiteren Ländern (USGS, 2022b). Bis 2026 deutet sich für die Lithium-Ionen-Batterien im Rahmen der Elektromobilität eine Verdreifachung des heutigen globalen Lithiumbedarfs an (Buchholz, 2021). Im Jahr 2021 wurde ca. 75% der Lithiumproduktion für Batterien verwendet, wovon fast zwei Drittel auf die Elektromobilität fielen (statista, 2022c). Die Verwendung in Keramik und Glas machten weitere 14% aus und der Rest verteilte sich auf unterschiedliche Anwendungen (statista, 2022a).

Für 2050 wird ein globaler Bedarf für Lithium von 1 bis 1.3 Mio. Tonnen prognostiziert. Kumuliert bis ins Jahr 2050 wären das 14 bis 20 Mio. Tonnen Lithium (Fraunhofer ISI, 2020). Die weltweiten bekannten Lithiumreserven werden derzeit auf ca. 21 Mio. Tonnen beziffert, was der 256-fachen Fördermenge des Jahres 2020 entspricht. Bezüglich der aktuellen weltweiten Ressourcen liegen die Angaben und Schätzungen weit auseinander. Nach Angaben der U.S. Geological Survey (USGS) aus dem Jahr 2021 liegen die weltweiten Lithiumressourcen aktuell bei etwa 89 Mio. Tonnen.

Zurzeit ist die EU stark auf Lithiumimporte angewiesen. Allerdings verfügt Europa über eigene Ressourcen, wie z.B. in Serbien, Portugal, Spanien, Finnland, Österreich, Deutschland und Frankreich (VDI/VDE, 2021). Aktuell spielt die Gewinnung von Lithium durch das Recycling von Batterien noch keine massgebende Rolle. Allerdings entwickeln sich die industriellen Kapazitäten für das Batterierecycling einschliesslich der Rückgewinnung von Lithium in Europa und der Schweiz schnell. Lithium aus dem Batterierecycling könnte einen signifikanten Anteil des jährlichen Bedarfs bis 2050 decken. Voraussetzung dafür ist, dass hohe Sammelquoten und genügend hohe Rückgewinnungsraten von 25% bis 50% des Lithiums aus den Altbatterien sichergestellt sind (Fraunhofer ISI, 2020).

### **Nickel**

Wichtigstes Abbauland ist Indonesien mit 771'000 Tonnen, gefolgt von den Philippinen mit 334'000 Tonnen, Russland mit 283'000 Tonnen, Neukaledonien mit 200'000 Tonnen, Kanada und Australien mit je knapp 170'000 Tonnen und China mit 120'000 Tonnen im Jahr 2021 (USGS, 2022b). Es resultierte eine globale Produktion von rund 2.7 Mio. Tonnen für das Jahr 2021.

Durch die Entwicklung hin zu kobaltreduzierten und nickelreichen Hochenergie-Batterien wird sich die Rohstoffsituation für Nickel in den folgenden Jahren mit grosser Sicherheit verändern. Wie gross diese Veränderung ist, ist momentan schwierig einzuschätzen und temporäre Verknappungen bzw. Lieferengpässe oder kurz- bis mittelfristige Preissteigerungen sind nicht auszuschliessen. Prognostizierte Berechnungen vom Fraunhofer ISI für das Jahr 2050 ergeben einen globalen Bedarf an Nickel von 4 bis 6 Mio. Tonnen pro Jahr. Dieser Wertebereich könnte jedoch etwas niedriger ausfallen durch gegebenenfalls verfügbare nickelreduzierte Batteriesysteme bzw. hohen Anteil an LFP-Batterien. Kumuliert läge der Nickelbedarf ab heute bis 2050 bei ca. 70 bis 110 Mio. Tonnen (Fraunhofer ISI, 2020). Die heutigen globalen Reserven werden auf 95 Mio. Tonnen geschätzt (USGS, 2022b) und die Ressourcen auf

130 Mio. Tonnen (Fraunhofer ISI, 2020). Das benötigte Nickel kann mehrheitlich aus gesammelten Batterien zurückgewonnen werden. Sofern die Batterien gesammelt bzw. recycelt werden, kann dies in Zukunft zur Sicherheit der Rohstoffversorgung beitragen.

### **Kupfer**

Zu den grössten Kupferproduzenten in der Minenproduktion gehören im Jahr 2021 Chile mit ca. 5.6 Mio. Tonnen, Peru mit ca. 2.2 Mio. Tonnen, Kongo und China mit je ca. 1.8 Mio. Tonnen sowie die USA mit ca. 1.2 Mio. Tonnen. In der Kupferraffinerie führt China aktuell mit ca. 10 Mio. verarbeiteten Tonnen Kupfer pro Jahr, weit vor Chile mit ca. 2.2 Mio. Tonnen.

Die aktuellen globalen Kupferreserven belaufen sich auf ca. 880 Mio. Tonnen, wobei die totalen weltweiten Kupfervorkommen im Jahr 2015 auf ca. 2.1 Mrd. Tonnen Kupfer geschätzt wurden. Die unentdeckten Ressourcen werden auf ca. 3.5 Mrd. Tonnen geschätzt (USGS, 2022a). Basierend auf den aktuellen Reserven würde die Kupferverfügbarkeit bei gleichbleibender Produktion für ca. 40 Jahre sichergestellt sein. Rechnet man die bekannten globalen Kupfervorkommen mit hinzu, kann eine zukünftige Rohstoffknappheit ausgeschlossen werden. Allerdings muss davon ausgegangen werden, dass sich die Nachfrage nach Kupfer bis 2040 verdoppeln könnte, aufgrund eines Ausbaus zusätzlicher Stromnetze (Lepesant, 2021).

Bis 2025 beträgt die prognostizierte mögliche Ausbeute von Kupfer durch das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien ca. 99% (WIFO, 2021). Aktuell kann in Europa bzgl. Lithium-Ionen-Batterien von einer Kupferrecyclingquote von ca. 45% ausgegangen werden. Die Recyclingindustrie für Traktionsbatterien entwickelt sich laufend weiter. Daher wird die Kupferrückgewinnungsleistung voraussichtlich viel höher sein und mindestens den anderen zuvor genannten Kupferrecyclingströmen von ~99% entsprechen (Lepesant, 2021).

### **Graphit**

Der mit Abstand grösste Produzent von Graphit war im Jahr 2021 China mit 820'000 Tonnen, gefolgt von Brasilien mit 68'000 Tonnen sowie Mosambik und Russland mit je knapp 30'000 Tonnen. Ca. 7% der Produktion wurde für Lithium-Ionen-Batterien verwendet, bis 2025 dürfte es bis 30% sein (VDI/VDE, 2021). Graphit wird in offenen Minen oder im Bergbau gefördert, gemahlen und über einen relativ einfachen Prozess angereichert. Neben der Nutzung von Graphit als Anoden in Batterien wird es auch als Anode bei Elektrolysen eingesetzt. Andere Anwendungen sind Feuerfestmaterialien, Bleistifte und Schmiermittel. Graphit kann als Erz (natürlicher Graphit) gewonnen oder auch synthetisch hergestellt werden.

Im Jahr 2021 betrug die weltweite Produktion von natürlichem Graphit etwa 1 Mio. Tonnen. Die aktuellen Graphitreserven werden auf ca. 320 Mio. Tonnen geschätzt (USGS, 2022b), was der 320-fachen Fördermenge des Jahres 2021 entspricht. Die ausgewiesenen globalen Ressourcen lagen 2021 bei rund 800 Mio. Tonnen (USGS, 2022b). Derzeit werden nur ca. 2% des weltweiten Graphits in Europa abgebaut, daher gilt Europa als stark von Graphitimporten abhängig. Im Jahr 2018 wurde ca. 175'000 Tonnen natürlicher Graphit in die EU eingeführt. Aufgrund des vorliegenden Versorgungsrisikos hat die EU natürlichen Graphit als kritischen Rohstoff eingestuft. Bis 2030 werden global schätzungsweise jährlich zwischen 400'000 und 1.6 Mio. Tonnen Graphit benötigt, im Jahr 2050 bis zu 5 Mio. Tonnen (AT, 2021). Ein Recycling von Graphit aus Lithium-Ionen-Batterien findet derzeit aus wirtschaftlichen Gründen nicht statt (VDI/VDE, 2021), wird aber bereits erforscht.

### **Mangan**

Mangan wird hauptsächlich in Form von Erz im industriellen Tagebau oder Tiefbau abgebaut. Im Jahr 2021 belief sich die globale Produktion auf rund 20'000 Tonnen. Davon stammten 7'400 Tonnen aus Südafrika, 3'600 Tonnen aus Gabun, 3'300 Tonnen aus Australien, 1'300 Tonnen aus China und 640 Tonnen Ghana (USGS, 2022b). Die weltweiten Reserven werden auf ca. 1.5 Mio. Tonnen geschätzt, was der 75-fachen Fördermenge des Jahres 2021 entspricht. Aktuell wird auf globalem Niveau von nahezu unbegrenzten Manganressourcen ausgegangen (BGR, 2019). Bis 2025 wird mit einer möglichen Recyclingausbeute von Mangan von ca. 30% gerechnet, die durch das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien zurückgewonnen werden kann. Bis 2030 wird mit einer Ausbeute von 70% gerechnet (WIFO, 2021).

## Wie wird sich die globale Nachfrage nach Batteriemetallen durch Elektrofahrzeuge entwickeln?

### Ausblick und Entwicklung der globalen Nachfrage

Traktionsbatterien waren im Jahr 2021 für fast die Hälfte der weltweiten Nachfrage nach Lithium verantwortlich. Die allgemeine Lithiumnachfrage wird sich bis 2030 vervierfachen und der entsprechende Anteil am Bedarf für Traktionsbatterien wird sich auf 70% bis fast 80% – je nach Szenario – erhöhen (IEA, 2022). Da die vorherrschende Kathode für Elektrofahrzeuge derzeit aus hochnickelhaltigen Chemikalien besteht, wird die Nachfrage nach Nickel bis 2030 weiter stark ansteigen, trotz Erhöhung des Anteils an LFP-Batterien. Für Kobalt ist das Gegenteil der Fall, da die Batteriehersteller vermehrt Chemien mit geringerem Kobaltgehalt einsetzen. Dennoch wird der Anstieg der weltweiten Nachfrage nach Traktionsbatterien die Gesamtnachfrage nach Kobalt in diesem Jahrzehnt weiter erhöhen.

Die Versorgung mit Batteriemetallen scheint gemäss Prognosen ausreichend zu sein, um die Nachfrage im Szenario STEPS<sup>13</sup> der International Energy Agency zu decken, wenn die angekündigte Produktionskapazität wie geplant in Betrieb geht. Dennoch sind für die ambitionierteren Szenarien APS<sup>14</sup> und NZE<sup>15</sup> höhere Investitionen erforderlich (vgl. Abbildung 17). Langfristig wird das Recycling einen erheblichen Beitrag zur Versorgung leisten. Bis zum Jahr 2030 werden jedoch nur geringe Beiträge aus dem Recycling erwartet (< 1% der prognostizierten Gesamtnachfrage bei Lithium und Nickel, resp. ca. 2% für Kobalt) (IEA, 2022). Siehe auch Kap. 6.

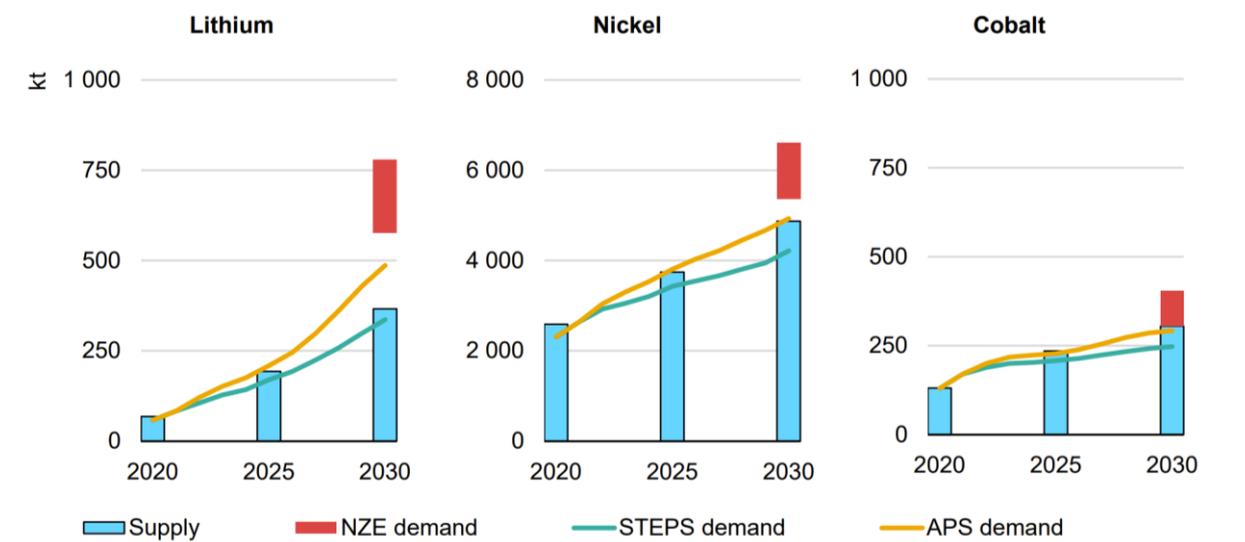


Abbildung 17: Gesamtnachfrage und -angebot für Lithium, Nickel und Kobalt, 2020 bis 2030 (IEA, 2022).

<sup>13</sup> Das Stated Policies Scenario zeichnet seine Zukunftsprognose nur aufgrund der derzeit tatsächlich ergriffenen Massnahmen und Initiativen.

<sup>14</sup> Das Announced Pledges Scenario beschäftigt sich mit den angekündigten Massnahmen der Staaten und nimmt an, dass die Klimazusagen der Regierungen weltweit vollständig und rechtzeitig umgesetzt werden.

<sup>15</sup> Das Net Zero Emissions bis 2050 Szenario der IEA.

## 3.2 Ökologische und soziale Auswirkungen der Rohstoffförderung

*Welche ökologischen und sozialen Auswirkungen sind mit der Rohstoffgewinnung verbunden?*

Die Gewinnung von Rohstoffen ist – unabhängig von der Antriebstechnologie – mit ökologischen und sozialen Risiken behaftet. Die Europäische Kommission definiert den Begriff der nachhaltigen Batterien wie folgt: Nachhaltige Batterien sollen «[...] mit möglichst geringen Umweltauswirkungen und unter Verwendung von Materialien hergestellt werden, die unter vollständiger Einhaltung sozialer und ökologischer Standards gewonnen wurden. Die Batterien sind langlebig und sicher und können repariert, wiederverwendet und umgenutzt werden» (VDI/VDE, 2021).

Die Rohstoffförderung für Traktionsbatterien findet häufig in Ländern mit hoher Armut und niedrigen Umwelt- und Sozialstandards statt. Die Sicherheitsstandards bezüglich Arbeit und Gesundheit vor Ort sind oft unzureichend und es fehlen geeignete Kontroll- und Regulierungsmechanismen. Der künftige Anstieg der Batterieproduktion wird die weltweite Nachfrage nach Rohstoffen substanziell erhöhen, was zu einer Intensivierung des Bergbaus führen wird. Es ist breit dokumentiert, dass die Förderung von Rohstoffen mit negativen und weit verbreiteten ökologischen und sozialen Auswirkungen verbunden ist (Conde, 2017). Der *Transition Minerals Tracker*, der dem *Business and Human Rights Resource Centre* angehört, (BHRRC, 2022) erfasst Menschenrechtsverletzungen der Rohstoffindustrie. Seit 2010 sind 495 Klagen gegen 103 Unternehmen verzeichnet, die Lithium, Kobalt, Kupfer, Mangan und Nickel für Low-Carbon-Technologien fördern. Zu diesen Technologien gehört auch die Elektromobilität.

Der *Environmental Justice Atlas* dokumentiert hunderte von Konflikten im Zusammenhang mit Umweltfragen bei Rohstoffprojekten, die zu ökologischen und sozialen Auswirkungen führen (EJAtlas, 2022). Im Rohstoffsektor werden u.a. folgende Menschenrechtsverletzungen und negative Auswirkungen festgestellt: limitierter Zugang zu Wasser, Verschmutzung von Wasser, Boden und Luft, Beeinträchtigung von Sicherheit und Gesundheit, Repression von Rechten indigener Völker, begrenzte Arbeitssicherheitsstandards, Umsiedlung ganzer Dörfer wegen Minenkonzessionen, Zerstörung landwirtschaftlicher Anbauflächen sowie Korruption (BHRRC, 2022).

### **Kobalt**

In Bezug auf den Kobaltabbau gelten folgende Bereiche als umweltproblematisch: mangelnde Rekultivierung der Abbaugelände, ein hoher Verbrauch an Frischwasser sowie Kontaminationen von Grundwasser, Oberflächen- und Küstengewässern im Umfeld von Abbau- und Aufbereitungsanlagen. Weitere problematische Elemente sind Staub- und Schwefeldioxidemissionen (BGR, 2021a).

Kobalt gehört ebenfalls zu den sulfidischen Erzen wie Nickel, Kupfer, Gold, Silber, etc. Daher entsteht auch bei der Gewinnung von Kobalt eine grosse Menge an Abraummateriale, die Sulfide enthalten. Diese sulfidischen Mineralien verwittern zum Teil durch eine Kombination aus abiotischer und mikrobieller Oxidation zu Schwefelsäure («acid rock drainage», ARD). Diese Versauerung führt dazu, dass sich Metalle und Halbmetalle aus dem Abraum lösen und so ins Wasser gelangen. Selbst nach der Schliessung einer Mine werden noch tausende Jahre lang toxische Metallemissionen ausgewaschen. Ecoinvent berücksichtigt die kumulierten Emissionen über die nächsten 80'000 Jahre und weist diese der Rohstoffförderung zu, natürlich mit sehr grosser Unsicherheit (H.-J. Althaus & Classen, 2004).

Diverse Studien weisen auf die verbreitete Kinderarbeit im handwerklichen Kobaltabbau hin (vgl. Kap. 3.1). Diese Art des Bergbaus ist informell und teilweise auch illegal. Entsprechend gibt es keine Regulierung und/oder Kontrolle bezüglich Arbeitssicherheit, Kinderarbeit und anderen sozialen Aspekten. Das Kobalt aus dem Kongo wird überwiegend nach China exportiert. Europäische Unternehmen beziehen wiederum einen Grossteil ihrer Werkstoffe und Materialien aus China. Folglich ist nicht auszuschliessen, dass die Produkte von europäischen Herstellern Kobalt enthalten, das mithilfe von Kinderarbeit gefördert worden ist. Die entsprechenden Lieferketten sind oft sehr undurchsichtig und daher ist es nicht möglich, den Anteil aus artisanalem Abbau zu quantifizieren. Das macht es für Verbraucher/-innen schwer, sich über die Inhaltsstoffe bzw. die Herkunft von Waren zu informieren (earthlink, 2022). In diesem Zusammenhang

sollen jedoch die EU-Batterieverordnung mit der Einführung des Batteriepasses sowie das geplante Lieferkettengesetz der EU die Transparenz entlang der Batterielieferkette wesentlich verbessern (siehe auch Kap. 2.4).

Aufgrund fehlender Arbeitsschutzmassnahmen im Kleinbergbau resultieren u.a. der direkte Kontakt mit radioaktiven Schwermetallen im Gestein, insbesondere mit Uran, sowie tödliche Unfälle (Bamana et al., 2021; BGR, 2017; earthlink, 2022). Diesen Missständen gegenüber steht die Tatsache, dass der Kleinbergbau den beteiligten Menschen eine existenzsichernde Erwerbstätigkeit ermöglichen kann (Bamana et al., 2021; BGR, 2017; Fraunhofer ISI, 2020). Weiter ist Korruption bei der Vergabe von Abbaukonzessionen oft ein Problem (Bamana et al., 2021; VDI/VDE, 2021).

Kobalt ist auch direkt toxisch, v.a. wenn es in grösseren Mengen eingeatmet wird. Obwohl es relativ einfach wäre, die Arbeiter/-innen in den Minen vor dem Staub zu schützen, wurde in mehreren Studien nachgewiesen, dass Arbeiter/-innen, die im handwerklichen Bergbau tätig sind, erhöhte Kobaltkonzentrationen in Blut oder Urin aufweisen (Bamana et al., 2021; Banza Lubaba Nkulu et al., 2018).

### **Lithium**

Die Rohstoffgewinnung von Lithium findet überwiegend in dünn besiedelten Gebieten im so genannten Lithium-Dreieck zwischen Bolivien, Chile und Argentinien sowie in Australien statt, wobei rund die Hälfte der weltweiten Lithiumproduktion auf Australien entfällt (Köllner, 2021). Lithium wird in Südamerika hauptsächlich aus Salzsee-Solen und in Australien hauptsächlich aus Festgestein gewonnen. Dabei zeigen beide Produktionsweisen starke Unterschiede bezüglich ihrer möglichen Umweltauswirkungen (Köllner, 2021). Hervorzuheben ist, dass Australien über vergleichsweise strenge Umweltschutzbestimmungen verfügt (Oeko-Institut, 2020). Für die Produktion von Lithium aus salzhaltigem Wasser, genannt Sole, werden dem Untergrund grosse Mengen an Salzwasser entnommen, welches anschliessend in grossen Becken verdunstet. Solche Gewinnungsanlagen können dazu beitragen, dass sich der Grundwasserspiegel absenkt und Flussläufe und Feuchtgebiete austrocknen. In den umliegenden Gebieten kann es zu Wasserknappheit kommen. Wird das Abwasser aus dem Abbauprozess unbehandelt abgeleitet, entsteht eine Kontamination des Bodens und das Trinkwasser wird verseucht. Dies kann zu negativen Auswirkungen auf Flora und Fauna führen sowie auch auf die ansässige, grösstenteils indigene Zivilbevölkerung (VDI/VDE, 2021).

Chile, dessen Lithiumminen grösstenteils im Norden des Landes konzentriert sind, leidet generell unter Wassermangel. Hauptgrund dafür ist der Klimawandel. Die Temperaturen steigen stetig, während Regen- und Schneefälle abnehmen und Gletscher schmelzen. Chile hat sechs seiner 16 Regionen zu landwirtschaftlichen Notstandszonen erklärt, mehr als drei Viertel der Fläche von Chile sind seit über zehn Jahren von Dürre betroffen. Die grosse Wasserknappheit wird dadurch verschärft, dass grosse landwirtschaftliche Betriebe von Bergbauunternehmen übernommen werden, um so deren Wasserrechte zu bekommen. Chiles Wasservergabesystem gilt als marktorientiert und kaum staatlich reguliert. Die Nachfrage nach sauberem Trinkwasser bildet die Grundlage von Konflikten zwischen Minenbesitzern und der Zivilbevölkerung in Chile (E+Z, 2020; Landherr & Graf, 2022; Lepasant, 2021; VDI/VDE, 2021).

Eine neue Studie hat den Einfluss der Lithiumgewinnung auf den lokalen Wasserhaushalt in Chile untersucht (Moran et al., 2022). Etwa zwei Drittel des vorhandenen Süsswassers befindet sich unterirdisch als Grundwasser und ein Drittel an der Oberfläche. Die Ergebnisse zeigen auf, dass die Entnahme von Süsswasser das System deutlich stärker beeinflusst als die Entnahme der Lithiumsole. Hauptsächlich wird das Süsswasser zu ca. 50% für die Förderung von Kupfer und zu ca. 30% für die Landwirtschaft verwendet. Wo beides zusammenkommt, entsteht der höchste Verlust von Grundwasser. Der Lithiumabbau ist für rund 8% des Süsswasserverbrauchs zuständig, der Tourismus für ca. 1%.

In Australien gelten sehr hohe Arbeitssicherheitsstandards für den Abbau von Festgestein. Menschenrechtsverletzungen im Zusammenhang mit der Lithiumproduktion sind in Australien darum eher unwahrscheinlich. Allerdings gibt es Berichte über Probleme im Zusammenhang mit dem Bergbau auf Aborigine-Gebiet bezüglich der Zerstörung von Stätten australischer Ureinwohner/-innen (Albeck-Ripka, 2020).

## **Nickel**

Der Nickelabbau hat weitreichende ökologische Auswirkungen, v.a. auf die betroffenen Regionen. Der terrestrische Bergbau benötigt grosse Flächen einer Region und verbraucht grosse Mengen Grundwasser. Die anschliessende Salzwasserintrusion kann zur Verseuchung des Trinkwassers führen. Zudem gelangen Schwermetalleinträge ins Grund- und Oberflächengewässer. Emissionen von schwermetallhaltigen, diffusen Stäuben belasten die Atmosphäre, wie bspw. in Norilsk Russland, einer der grössten, weltweiten Produktionsstandorte von Nickel. Die Schwefeloxidemissionen könnten das Pflanzenwachstum verändern sowie die Ökosysteme stören, während die lokale Biodiversität unter dem Nickelabbau wegen der direkten Entwaldung leidet. Für die Erzeugung von 1 kg Nickel entstehen zwischen 13–45 kg CO<sub>2</sub>eq (BGR, 2021b). Bei der Gewinnung aus sulfidischen Erzen ist auch das ARD («acid rock drainage») ein Thema (vgl. Kobalt).

## **Kupfer**

Fast ein Drittel der weltweiten Kupferproduktion entfällt auf Chile. Die Kupferminen in Chile sind im Norden des Landes konzentriert, in der trockenen Provinz Antofagasta nahe der Atacama-Wüste. Wie oben bei der Rohstoffförderung von Lithium beschrieben, leidet Chile seit Jahren chronisch unter Wassermangel. Die grosse Wasserknappheit wird dadurch verschärft, dass grosse landwirtschaftliche Betriebe von Bergbauunternehmen übernommen werden, um so deren Wasserrechte zu bekommen, wie z.B. in der Region der Kleinstadt Tierra Amarilla. Die Landwirtschaftsbetriebe liegen seitdem brach, die kleinere Land- und Subsistenzwirtschaft gilt ohne Wasserzugangsrechte als nicht mehr überlebensfähig. Der gesetzliche Rahmen soll in den letzten Jahren zwar verbessert worden sein, aber der Umgang mit den Wassereinzugsgebieten bzw. Wasserrechten gilt für den Kupferbergbau weiterhin als problematisch (Landherr & Graf, 2022; Lepesant, 2021).

## **Graphit**

Die Gewinnung und Weiterverarbeitung von Graphit ist mit hohem Energieverbrauch und hohen Umweltbelastungen verbunden. Zudem findet diese vorwiegend in Ländern mit niedrigen Umweltstandards statt, hauptsächlich in China (Köllner, 2021; VDI/VDE, 2021). Graphit gilt zwar als ungiftig, allerdings kann die verfahrensbedingte Staubbelastung zu ökotoxischen und gesundheitlichen Problemen führen, sowohl im direkten Arbeitsumfeld als auch in umliegenden Siedlungen. Mineralien wie Eisensulfide, Pyrit und Pyrrhotin, die Teil einer Graphitlagerstätte sein können, können gelöst werden und ins Grundwasser gelangen. Eine schwerwiegende Versauerung des Grundwassers ist die Folge (Oeko-Institut, 2020). Oftmals werden sogenannte Abraumhalden erstellt, die – je nach Bergwerk – problematische Stoffe wie z.B. Eisensulfid, Uran, Nickel und Quecksilber enthalten (Oeko-Institut, 2020).

Zur Aufreinigung des Graphits werden zum Teil anorganische Säuren, wie z.B. die Flusssäure, verwendet, die zu einer Belastung des Grundwassers führen, falls diese unbehandelt in die Umwelt gelangen (Köllner, 2021; VDI/VDE, 2021). Weiter sind für die Produktion von künstlichem Graphit Temperaturen von über 2.500 °C über mehrere Tage notwendig, was aktuell nur durch spezielle elektrische Öfen möglich ist. Die damit verbundenen Treibhausgasemissionen hängen stark vom dafür eingesetzten Energiemix ab (Köllner, 2021).

## **Mangan**

Das aktuell grösste bekannte Manganvorkommen befindet sich in Südafrika. Dort führt der Bergbau zu Wassermangel und Verschmutzung von Wasser, Luft und Böden. Die lokalen Gemeinden leiden unter Gesundheitsproblemen wie z.B. Lungenkrankheiten. Umweltgefährdungspotenziale bestehen u.a. in der Konzentration von radioaktiven Stoffen und Schwermetallen in Lagerstätten (PowerShift, 2021). Ein Abbau von sogenannten Manganknollen in der Tiefsee wird als Alternative diskutiert (Koschinsky, 2021; PowerShift, 2021). Dabei müsste aber, aufgrund der Abbauprozesse, von einer Schädigung des maritimen Ökosystems ausgegangen werden.

## Vergleich zu Erdöl

Nicht nur die Gewinnung von Rohstoffen für die Batterieproduktion hat negative Auswirkungen auf die Umwelt und die Menschen. Auch andere im Fahrzeugbau verwendete Rohstoffe sowie die Förderung und Aufbereitung von Erdöl haben negative Einflüsse. Die Umweltwirkungen werden in Ökobilanzen erfasst und so zwischen Antriebsarten vergleichbar gemacht. Die sozialen Auswirkungen werden hingegen kaum aus einer Lebenszyklusperspektive betrachtet und können so nicht für verschiedene Fahrzeuge quantitativ verglichen werden.

Derzeit werden Öl und Gas in Offshore-Anlagen aus grossen Tiefen von mehr als 200 Metern gefördert. Diese befinden sich in den folgenden Regionen: Arktis, nördlicher Nordatlantik, Ost- und Westafrika, Golf von Mexiko, Südamerika, Indien, Südostasien und Australien (Cordes et al., 2016). Nebst den negativen Umweltauswirkungen des Baus einer solchen Anlage ist v.a. produziertes Wasser als problematisch einzustufen. Dieses ist ein relevantes Nebenprodukt der Offshore-Erdöl- und Erdgasförderung und wird nach allfälliger Aufbereitung in die Lagerstätten zurückgeführt oder ins Meer eingeleitet. Produziertes Wasser enthält u.a. dispergiertes Rohöl, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), Alkylphenole (AP), (Schwer-) Metalle und viele andere umweltrelevante Bestandteile. Trotz Regulationsmassnahmen gilt produziertes Wasser als die grösste betriebsbedingte Ursache für die marine Ölverschmutzung, die von der Offshore-Erdölindustrie verursacht wird und sich massgeblich negativ auf die marine Flora und Fauna auswirkt (Beyer et al., 2020; Cordes et al., 2016).

Die Fracking Methode, die für terrestrische Ölförderung angewandt wird, führt zu negativen Auswirkungen auf Luft, Grundwasser, Boden, Gestein, Vegetation, Wildtiere, Menschen und weitere Bestandteile des Ökosystems. Dafür benötigte Infrastrukturen sind mit Umweltbelastungen verbunden, wie z.B. Lärmemissionen, Austrocknung der lokalen Böden, Methanemissionen sowie hohem Wasserverbrauch und damit Änderungen im lokalen Wasserkreislauf. Bis 2015 war Fracking in den USA auf Bundesebene mässig reguliert, die Abfälle und Abwässer wurden im Rahmen des *Resource Conservation and Recovery Act* als nicht gefährliche Abfälle behandelt. Aktuell bleibt es den Bundesstaaten überlassen, ob sie Fracking im Hinblick auf das Trinkwasser und seine Qualität regeln oder nicht (Meng, 2017, 2017; Tulane University, 2021).

Erdölraffinerien sind eine relevante Quelle für Luftschadstoffe wie BTEX-Verbindungen aus Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylol, Feinstaub (PM), Stickoxide (NO<sub>x</sub>), Kohlenmonoxid (CO), Schwefelwasserstoff (H<sub>2</sub>S) und Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>). Sie setzen zudem Methan und andere leichtflüchtige Brennstoffe und Öle frei (EPA, 2003). Arbeiter/-innen in der Ölraffination können polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) exponiert sein, welche als Umweltschadstoffe klassifiziert sind. Diesen werden toxische, erbgutverändernde und/oder krebserregende Eigenschaften zugesprochen (Abdel-Shafy & Mansour, 2016).

Die drei prominentesten Ölkatastrophen sind die des Öltankers Exxon Valdez, des Öltankers Hebei Spirit und der Ölbohrplattform Deepwater Horizon. Deren ökologische Auswirkungen sind auf Unfälle bei der Ölförderung zurückzuführen. Die Ölkatastrophe Deepwater Horizon begann am 20. April 2010 und setzte innerhalb von 87 Tagen 507 Mio. Liter Rohöl aus 1'600 m Tiefe in den Golf von Mexiko frei. Dadurch wurden Tiefseekorallen nachhaltig geschädigt, die Vermehrung von Austern blieb über mehrere Jahre hinweg aus, Feuchtgebiete an der nahegelegenen Küste wurden beeinträchtigt und Delfin-, Meeresschildkröten- und Seevogelbestände sind im betroffenen Gebiet zurückgegangen (Barron et al., 2020). Es ist zu bemerken, dass die Auswirkungen solcher Katastrophen in den Ökobilanzen nicht berücksichtigt werden.

Vergleicht man die sozialen Auswirkungen der Öl-, Bergbau- und Gasindustrie mit der Rohstoffgewinnung für Batterien, lassen sich durchaus Parallelen herstellen. Erdöl ist für die Wirtschaft vieler Entwicklungsländer von zentraler Bedeutung. Gleichzeitig führen solche Industrietätigkeiten häufig zu so schwerwiegenden Menschenrechtsproblemen, dass sie vulnerable Gemeinschaften in den wirtschaftlichen und sozialen Ruin treiben können. Beispiele dafür finden sich in den Jahren 1995 in Äquatorialguinea, 2003 im Irak oder 2021 in Myanmar (Human Rights Watch, 2009, 2022; The Guardian, 2014).

In Afrika, wo die Erdölförderung seit ihrer Entdeckung Mitte des 19. Jahrhunderts eine wichtige Einnahmequelle für Handel und Investitionen darstellt, haben unethische Praktiken einiger multinationaler Ölkonzerne zu sozialen Bewegungen seitens der Bevölkerung und Menschenrechtsgruppen geführt. Machtmissbräuche und Korruption gehen mit einem Mangel an Infrastruktur, landwirtschaftlich nutzbaren Böden und sauberem Trinkwasser einher, ohne angemessene Entschädigungen und Abhilfemassnahmen seitens Ölgesellschaften und Regierungen (Adeola et al., 2021). Aktuell dokumentiert der Environmental Justice Atlas weltweit rund 350 soziale Konflikte, die im Zusammenhang mit der Erdölproduktion stehen (EJAtlas, 2022). Insbesondere werden Klagen der indigenen Bevölkerung gegen Pipeline-Projekte in den USA und in Russland genannt sowie ethnische und religiöse Konflikte in Afrika wegen der Ölexploration.

*Welche Massnahmen werden aktuell diskutiert, um die ökologischen und sozialen Auswirkungen zu verbessern? Welche alternativen Materialien haben das Potenzial, negative Auswirkungen zu reduzieren?*

Die Umweltauswirkungen und die negativen sozialen Aspekte der Rohstoffgewinnung sollen verringert werden. Als zentrale Elemente gelten die Weiterentwicklung von Technologien im Bereich der Rohstoffförderung, die Substitution von Rohstoffen mit unbedenklicheren Materialien, staatliche Regulierung und Sorgfaltspflichten sowie die Förderung des Recyclings. Aktuell investieren viele Hersteller von Fahrzeugen und Traktionsbatterien in den Aufbau von transparenten Lieferketten. Damit soll einerseits die Versorgungssicherheit gewährleistet werden, andererseits sollen auch die Produktionsbedingungen der verwendeten Materialien nachvollziehbar werden. Weiter kann der Rohstoffbedarf mit dem Einsatz von kleineren Batterien begrenzt werden.

### **Fokus auf Europa**

Die im Jahr 2020 verabschiedete EU-Nachhaltigkeitsstrategie *Green Deal* beschreibt den Zugang zu Ressourcen als «strategische Sicherheitsfrage». Zudem hat sie einen Aktionsplan verabschiedet, der die folgenden Bereiche fördern soll: die Wiederbelebung des Bergbaus in Europa, eine Förderung der Recyclingquote, die Erforschung von Alternativlösungen sowie eine Diversifizierung der Importländer. Weiter hat die Europäische Kommission das als «European Battery Innovation» bezeichnete Vorhaben zur Förderung von Forschung und Innovation in der Batterie-Wertschöpfungskette genehmigt. Zwölf Mitgliedstaaten werden dafür in den kommenden Jahren bis zu 2.9 Mrd. EUR an Finanzmitteln bereitstellen<sup>16</sup>. Die bisherige Schwierigkeit, alternative Lösungen zu finden, spricht für eine Neubelebung der Bergbautätigkeiten in Europa. Einerseits kann so die Attraktivität der europäischen Industriestandorte gestärkt und andererseits können soziale und ökologische Bedingungen bzgl. Gewinnung von Metallen besser kontrolliert und reguliert werden (Lepesant, 2021).

### **Erhöhung Recyclingrate**

Rohstoffe für die Traktionsbatterien sollen künftig vermehrt rezykliert und dadurch die Nachfrage nach primären Rohstoffen reduziert werden, um die negativen ökologischen und sozialen Auswirkungen in den derzeit betroffenen Abbauregionen zu verringern (Brot für alle, Fastenopfer, VCS, 2020). Siehe dazu die neue EU-Verordnung im Kap. 2.4. Allerdings ist klar, dass in einem Markt, der so rasch wächst wie der Batteriemarkt, und in dem die Produkte für 10 bis 20 Jahre genutzt werden, selbst bei sehr hohen Recyclingraten vorerst nur ein kleiner Teil der Materialnachfrage durch Recyclingmaterial gedeckt werden kann. Darum wird die Primärproduktion für die nächsten Jahrzehnte weiter steigen müssen, um die prognostizierten Produktionszahlen für Elektrofahrzeuge realisieren zu können (VDI/VDE, 2021). Allgemein wird von einem starken Anstieg der verfügbaren Mengen wiederverwertbarer Metallabfälle ausgegangen. Die Rentabilität des Metallrecyclings nimmt derart zu, dass voraussichtlich im Jahr 2060 der monetäre Ertrag aus dem Recycling den des Bergbausektors übertreffen mag. Die Zahl der industriellen Recyclinganlagen im Sektor der Automobilindustrie wächst jährlich. Manche Autohersteller haben bereits Verträge mit europäischen Unternehmen abgeschlossen, die sich auf die Rückgewinnung von Kupfer, Kobalt und Nickel aus Lithium-Ionen-Batterien spezialisiert haben (Lepesant, 2021). Siehe dazu auch Kap. 6.

<sup>16</sup> [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/IP\\_21\\_226](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/IP_21_226)

## Alternativen zu Lithium-Ionen-Batterien und Fortschritte in der Batterietechnologie

Die Nutzung von kobalt- und nickelfreien Lithium-Ionen-Batterien – insbesondere Lithium-Eisenphosphat (LFP)-Akkumulatoren – stellt eine gute und bereits recht weit verbreitete Option dar, wobei die geringere Energiedichte im Vergleich zu NMC und NCA durch niedrigere Herstellungskosten marktwirtschaftlich ausgeglichen werden kann. Ein allgemeiner Trend besteht zudem darin mehr Nickel einzusetzen und gleichzeitig den Kobaltanteil zu senken, wobei die Förderung von Nickel ebenfalls mit Umweltschäden und Menschenrechts-Risiken verbunden ist (Köllner, 2021; Lepesant, 2021).

Aktuell sind auch erste Alternativen zur Lithium-Ionen-Technologie zu beobachten, wie z.B. Feststoff-Batterien, Lithium-Schwefel-Batterien, und Natrium-Ionen-Batterien. Aktuell steht eine grossangelegte industrielle Umsetzung für die meisten Technologien noch nicht unmittelbar bevor. Dennoch sind Natrium-Ionen-Batterien bspw. vom amerikanischen Unternehmen Natron bereits kommerziell erhältlich. Weiter hat auch das chinesische Unternehmen CATL die kommerzielle Produktion für 2023 angekündigt. Im Folgenden sind Alternativen bzgl. ausgewählten Rohstoffen kurz erläutert:

- **Kobalt:** In den letzten Jahren hat sich, aus Kosten- und Imagegründen, ein Trend zur Reduzierung des Kobaltanteils zugunsten von Nickel etabliert. In der Tat kommen einige Zellen mit deutlich weniger Kobalt aus als die herkömmlichen NMC-Zellen<sup>17</sup>. Es wird erwartet, dass der Gewichtsanteil von Kobalt in Traktionsbatterien künftig noch stärker reduziert wird (Fraunhofer ISI, 2020). In den letzten Jahren wurde auch in Europa die Kathodenzellchemie Lithium-Eisenphosphat (LFP) relevanter, wie z.B. bei Tesla, VW Group, Stellantis; u.a. mit dem Ziel, Kobalt gänzlich zu ersetzen. Im Jahr 2018 haben noch 86% aller Traktionsbatterien Kobalt enthalten, im Jahr 2022 nur noch 60%. Die Herausforderungen bleiben jedoch gross, da der Kobaltbedarf weltweit zunimmt wegen der stark steigenden Nachfrage nach elektrischen Fahrzeugen, die nach wie vor kobaltbasierte Batterien verwenden (BloombergNEF, 2022b). Zahlreiche Fahrzeughersteller haben Lieferverträge mit Bergbaukonzernen abgeschlossen, um zu verhindern, dass Kobalt aus nicht zertifizierten Quellen in die Lieferketten des Konzerns kommt, und um den Zugang zu zertifizierten Rohstoffen langfristig zu sichern (VDI/VDE, 2021). Dies ist ein Schritt in die richtige Richtung. Denn wie sich zeigt, würde ein Boykott – bspw. des problematischen Kobalts aus dem kongolesischen Kleinbergbau – die Situation der beteiligten Menschen jedoch nicht verbessern. Vielmehr müssen die Bedingungen verbessert, der Kleinbergbau entsprechend formalisiert und reguliert sowie die Transparenz der Lieferketten erhöht werden (Fraunhofer ISI, 2020).
- **Lithium:** In Chile wurde in den letzten Jahren der gesetzliche Rahmen bzgl. Wassernutzung zwar angepasst, der Umgang mit den Wassereinzugsgebieten bleibt jedoch sowohl für den Lithium- als auch für den Kupferbergbau problematisch (Lepesant, 2021). Bei der Gewinnung von Lithium könnten die ökologischen und sozialen Auswirkungen verbessert werden, indem u.a. technische Verbesserungen im Bereich wassersparender Technologien erfolgen. Künftig sollten verstärkt neue Technologien eingesetzt werden, wie z.B. die Wasserrückgewinnung durch Kondensation des verdunsteten Wassers, das Zurückpumpen der Sole nach der Lithiumgewinnung sowie die Membrantechnologien zur direkten Abscheidung von Lithium aus der Sole. Bspw. hat BMW angekündigt, Lithium künftig von einer Firma zu beziehen, die ein Verfahren verwendet, welches die Sole nach der Lithiumtrennung wieder direkt in den Untergrund zurückpumpt (VDI/VDE, 2021). Kürzlich hat eine deutsche Firma bei Versuchen erfolgreich Lithiumhydroxid in hochreiner Form direkt aus Restsole gewonnen. Restsole galt bis dato als Abfallprodukt der Lithiumproduktion. Bei diesem Prozess muss keine zusätzliche Sole gefördert werden und der Grundwasserspiegel wird somit nicht zusätzlich abgesenkt. Ein geplantes Projekt zur Industrialisierung dieser Technologie soll in Bolivien in Vorbereitung sein, das über ein Drittel der weltweiten Lithiumreserven verfügt (Elektroauto-News, 2022; VDI/VDE, 2021). Europa verfügt über umfangreiche Lithiumvorkommen, v.a. in Serbien, Portugal, Spanien, Finnland, Österreich und Frankreich (Lepesant, 2021). Derzeit fördert eine portugiesische Mine jährlich über 1'000 Tonnen Lithium für die Keramikindustrie. Die Europäische Kommission möchte den Abbau auf europäischem Boden verstärkt fördern und sie hält es für möglich, 80% des totalen europäischen Lithiumbedarfs bis 2025 zu decken. Diesbezüglich wurden zahlreiche Projekte eingeleitet: in Spanien in der Nähe von San Jose, in Südösterreich, in Portugal, in der Tschechischen Republik, in Westfinnland und in Deutschland (Zinnwald-Projekt im Erzgebirge und Oberrheingraben in Süddeutschland). Jedoch hat

<sup>17</sup> Siehe Kap. 2.1 für verschiedene Zusammensetzungen von NMC-Batteriezellen bezüglich Kobaltanteil.

im Jahr 2021 noch keines dieser Projekte den kommerziellen Grossbetrieb erreicht. Ernstzunehmende Hindernisse für eine Intensivierung der europäischen Bergbautätigkeit sind die soziale Akzeptanz der umliegenden Bevölkerung, mögliche Umweltrisiken oder auch Fragen der Rentabilität (Lepesant, 2021).

- **Graphit:** Graphit kann synthetisch hergestellt werden, was eine Alternative zum aktuell weit verbreiteten Graphitbergbau darstellt. Synthetischer Graphit wird erzeugt, durch das Erhitzen von Kohle und Teerrückständen auf hohe Temperaturen bis über 2'500 °C. Dies geschieht über mehrere Tage hinweg und unter Luftabschluss. Dank der synthetischen Herstellung können die negativen Umweltauswirkungen reduziert werden, die sonst durch den zumeist oberirdisch abgebauten Graphitbergbau und dessen Aufreinigung entstehen. Zudem kann die Produktion vom Erzvorkommen entkoppelt werden und theoretisch überall auf der Welt aufgebaut werden. Natürlich entstehen dafür aber auch Emissionen aus der Produktion des synthetischen Graphits (vgl. Kap. 4.2). Derzeit wird der Einsatz nachwachsender Rohstoffe als Kohlenstoffquelle erforscht. Der CO<sub>2</sub>-Fussabdruck einer solchen Produktion hängt massgeblich vom eingesetzten Energiemix ab. Der Marktanteil von künstlichem Graphit in Lithium-Ionen-Batterien lag im Jahr 2018 bei etwa 30 bis 50% (Öko-Institut e.V., 2020; VDI/VDE, 2021). Eine andere Möglichkeit wäre, die Anode aus Graphit durch andere Materialien zu ersetzen. Silizium kann aus Sand gewonnen werden und würde zudem zu einer allgemeinen energetischen Kapazitätserhöhung von Lithium-Ionen-Batterien beitragen (Köllner, 2021). Allerdings benötigt auch die Herstellung von Silizium sehr hohe Temperaturen von über 2'000 °C. Zudem weisen Batterien mit Siliziumanoden noch zu geringe Zyklenfestigkeiten auf. Lithium als Anodenmaterial könnte dereinst auch eine Möglichkeit darstellen, Graphit zu ersetzen.

### Neue Rohstoffquellen

Derzeit ist der Tiefseebergbau eine Möglichkeit in Bezug auf zukünftige Gewinnung von Kupfer, Kobalt, Mangan und Nickel vom Meeresboden. Dabei ist eine der zentralen Herausforderungen – nebst technischen Herausforderungen – der Umgang mit möglichen Umweltauswirkungen. Bevor eine solche Abbaustrategie beginnt, sollte ein besseres Verständnis der Ökosysteme und ihrer Zusammenhänge erlangt werden. Mögliche ökologisch nachteilige Auswirkungen würden sich jedoch erheblich von denjenigen des Landbergbaus unterscheiden. Grundsätzlich bezieht sich der Tiefseebergbau auf die Gewinnung von drei Typen von Mineralvorkommen am Meeresboden: Manganknollen und Eisenmangankrusten, die v.a. wegen ihres hohen Gehaltes an Kupfer, Kobalt und Nickel interessant sind, sowie Massivsulfide (Koschinsky, 2021).

### Bestehende Labels und Initiativen

Die Rohstoffgewinnung für die Batteriezellfertigung erfolgt hauptsächlich ausserhalb Europas, fern von regulatorischen Auflagen europäischer Länder, und die Lieferketten bei Rohstoffen sind oft intransparent (VDI/VDE, 2021). Trotz diesen Umständen müssen die Batterieproduzenten gemäss internationalen Richtlinien dafür sorgen, dass soziale und ökologische Missstände in ihren Lieferketten verhindert und behoben werden. Wie die Ergebnisse einer Untersuchung zu den sozialen Herstellungsbedingungen zeigen, kommen die grossen Player der Branche ihrer Verantwortung bisher nur beschränkt nach (Brot für alle, Fastenopfer, VCS, 2020). Die meisten Batterieproduzenten verweisen in ihren Strategien auf international vereinbarte Richtlinien wie die *Internationale Menschenrechtscharta* und die *Kernanliegen der Internationalen Arbeitsorganisation*. Die UNO-Leitprinzipien für Wirtschaft und Menschenrechte sowie die OECD-Leitsätze für multinationale Unternehmen setzen wiederum auf freiwillige Massnahmen der Unternehmen, die in den meisten Fällen nicht ausreichend sind (Brot für alle, Fastenopfer, VCS, 2020).

Darüber hinaus existieren bereits zahlreiche weitere freiwillige Initiativen, welche die sozialen Aspekte adressieren, wie z.B.:

- **Global Battery Alliance (GBA):** Die GBA ist eine Industrie-Initiative mit 70 Mitgliedern und wurde am WEF 2017 gegründet. Ziel ist es, eine nachhaltige, verantwortungsvolle Batterie-Wertschöpfungskette bis 2030 zu schaffen (WEF, 2019).
- **Responsible Minerals Initiative (RMI):** Ziel der Initiative ist die Unterstützung einer verantwortungsvollen Mineralienproduktion und -beschaffung auf der ganzen Welt. Mit Ausnahme der chinesischen

BYD und CATL sind fast alle Batterieproduzenten Mitglieder der Initiative. Die RMI deckt neben den klassischen Konfliktmineralien auch Kobalt ab. Allerdings wird oft die Verantwortung für die Überwachung der Bedingungen von den Unternehmen an die RMI delegiert, deren Kontrolle jedoch nicht bis zum Abbau in den Minen reicht (Brot für alle, Fastenopfer, VCS, 2020).

- **Responsible Mining Assurance (IRMA):** IRMA ist ein Projekt aus über 30 Unternehmen, Non-Profit-Organisationen, Gewerkschaften und Bergbaubetrieben aus der ganzen Welt. Ziel ist es, im industriellen Bergbausektor mehr Transparenz sowie möglichst umfangreiche soziale und ökologische Arbeitsbedingungen zu etablieren. BMW, Volkswagen, Mercedes-Benz, GM, Ford und Tesla sind Mitglieder der Initiative.
- **Responsible Cobalt Initiative (RCI):** Die Initiative wurde von der chinesischen Handelskammer für Metalle, Mineralien und Chemikalien ins Leben gerufen. Ziel ist die Förderung der Zusammenarbeit mit der Regierung der Demokratischen Republik Kongo, der Zivilgesellschaft und den betroffenen lokalen Gemeinschaften, um Massnahmen zu ergreifen, um die Risiken und Herausforderungen in der Kobaltlieferkette zu bewältigen.

### **Sorgfaltspflicht und Rolle der Politik**

Internationale Initiativen zur unternehmerischen Sorgfaltspflicht, inklusive ihrer gesetzlichen Verankerung, gelten als mögliche Ansatzpunkte, um die ökologischen und sozialen Auswirkungen zu minimieren. Starke staatliche Institutionen in den Bergbauländern könnten die Umwelt- und Sozialstandards massgeblich verbessern. Der vielversprechendste Ansatz, die Missstände zu bekämpfen, ist die Etablierung von verpflichtenden unternehmerischen Sorgfaltspflichten (Fraunhofer ISI, 2020).

Die Sorgfaltspflichten stellen sicher, dass Unternehmen ökologische und soziale Risiken in ihren Wertschöpfungsketten erkennen und durch Massnahmen minimieren. Erste gesetzliche Vorgaben dazu gibt es für die sogenannten Konfliktmaterialien, wie Gold, Zinn, Wolfram, Tantal aus der Demokratischen Republik Kongo und aus angrenzenden Ländern. Diese Vorgaben werden geregelt im US-amerikanischen *Dodd-Frank-Act*, den Chinese Due Diligence Guidelines und der EU-Regulierung 2017/821 (Fraunhofer ISI, 2020). Weiter bezieht sich die EU-Regulierung auf den *OECD-Leitfaden für die Erfüllung der Sorgfaltspflicht zur Förderung verantwortungsvoller Lieferketten für Minerale aus Konflikt- und Hochrisikogebieten* (OECD, 2019). Der Fokus bei der Sorgfaltspflicht liegt v.a. auf Kobalt und den Konfliktmaterialien. Weitere Rohstoffe für die Batterieproduktion und deren soziale Auswirkungen werden ausgeblendet.

Freiwillige Initiativen und Bemühungen zur Verbesserung der sozialen Auswirkungen stellen möglicherweise nicht sicher, dass sämtliche Batterieproduzenten weltweit dieselben Mindestvorschriften einhalten. Die europäische Politik fordert in diesem Zusammenhang verbindliche Regeln, um die Einhaltung von Sorgfaltspflichten in der Rohstoffgewinnung und -verarbeitung sicherzustellen, weil freiwillige Bemühungen zu wenig effektiv sind. Die Europäische Union (EU) hat eine Verordnung verabschiedet, die mit der Entwicklung eines digitalen Produktpasses für Batterien in diese Richtung zieht. Die neue Nachhaltigkeitsberichterstattung für Unternehmen und das geplante Lieferkettengesetz der EU sollen die Transparenz entlang der Batterielieferkette wesentlich verbessern (siehe auch Kap. 2.4).

### Wo wird durch die Rohstoffförderung das Erreichen der Sustainable Development Goals beeinflusst?

Die 17 Nachhaltigkeitsziele bzw. Sustainable Development Goals (SDGs) der Vereinten Nationen wurden auf dem Weltgipfel im Jahr 2015 im Rahmen der *Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung* definiert. Die Bergbauindustrie ist durch ihre Aktivitäten eng mit Themen verbunden, die in den SDGs vorkommen. Für die Rohstoffförderung sind insbesondere folgende Ziele relevant (VDI/VDE, 2021):

- Nr. 3 Gesundheit und Wohlergehen
- Nr. 6 Sauberes Wasser und Sanitäreinrichtungen
- Nr. 7 Bezahlbare und saubere Energie
- Nr. 8 Menschenwürdige Arbeit und Wirtschaftswachstum
- Nr. 9 Industrie, Innovation und Infrastruktur
- Nr. 11 Nachhaltige Städte und Gemeinden
- Nr. 12 Nachhaltiger Konsum und Produktion
- Nr. 13 Massnahmen zum Klimaschutz

Der Bergbau weist v.a. zahlreiche Herausforderungen hinsichtlich SDGs auf, wie etwa Menschenrechtsverletzungen, schlechte Arbeitsbedingungen, soziale Ungleichheiten, Korruption und Umweltzerstörung. Eine aktuelle Studie hat die Integration der SDGs in die Strategien von 38 Bergbauunternehmen untersucht (RMF, 2020). Die grosse Mehrheit der Unternehmen hat bis jetzt keine grossen Anstrengungen zur Integration der SDGs in ihre Geschäftsstrategie unternommen. Allerdings gibt es einige Vorreiter, die bei der Integration der SDGs besser abschneiden als ihre Mitbewerber. Ein Grossteil der SDG-Berichterstattung besteht jedoch nur aus einer Zuordnung der SDGs zu Nachhaltigkeitsindikatoren oder aus der Einführung vom SDG-Logo, ohne weitere Erläuterungen. Weiter beschränkt sich die Berichterstattung häufig auf bestimmte Standorte und Initiativen, um die positiven Massnahmen der Unternehmen zu bestimmten SDGs aufzuzeigen. Nur in wenigen Fällen sind auch die negativen Auswirkungen erwähnt, welche sich zudem meistens nur auf mögliche Auswirkungen auf Branchenebene und nicht auf die vom Unternehmen selbst verursachten Auswirkungen beziehen. Schliesslich berichtet nur eine Minderheit der Unternehmen über die Fortschritte bei den Indikatoren oder Zielen, die sie zur Überwachung ihrer Leistung festgelegt haben (RMF, 2020). In diesem Zusammenhang stellt die fehlende Transparenz – die im Industriesektor wettbewerbsrelevant ist – das grösste Problem bezüglich SDGs dar.

Weiter besteht eine Diskrepanz zwischen der Anzahl angekündigter Massnahmen zu bestimmten SDGs und deren Priorisierung durch die Bergbauunternehmen. Bspw. gehören SDG Nr. 3 *Gesundheit und Wohlbefinden* und SDG Nr. 6 *Sauberes Wasser und Sanitärversorgung* zu den am häufigsten erwähnten SDGs, weisen aber die schwächsten Massnahmen der Bergbauunternehmen auf (RMF, 2020).

## 4. Produktion Batteriezelle und -system

### 4.1 Überblick Produktion Batteriezelle und -system

Wer sind die weltweiten Hersteller von Batteriezellen und welche Entwicklungen zeichnen sich ab? Welche Rolle wird Europa spielen?

#### Globale Lieferkette

Aktuell dominiert China alle Schritte der Lieferkette für Traktionsbatterien, ausser dem Bergbausektor (Mining) (vgl. Abbildung 18). Dazu gehören die Materialverarbeitung, die Herstellung von Zellenkomponenten, wie der Kathode und der Anode, sowie die Produktion von Batteriezellen und Elektrofahrzeugen (IEA, 2022).

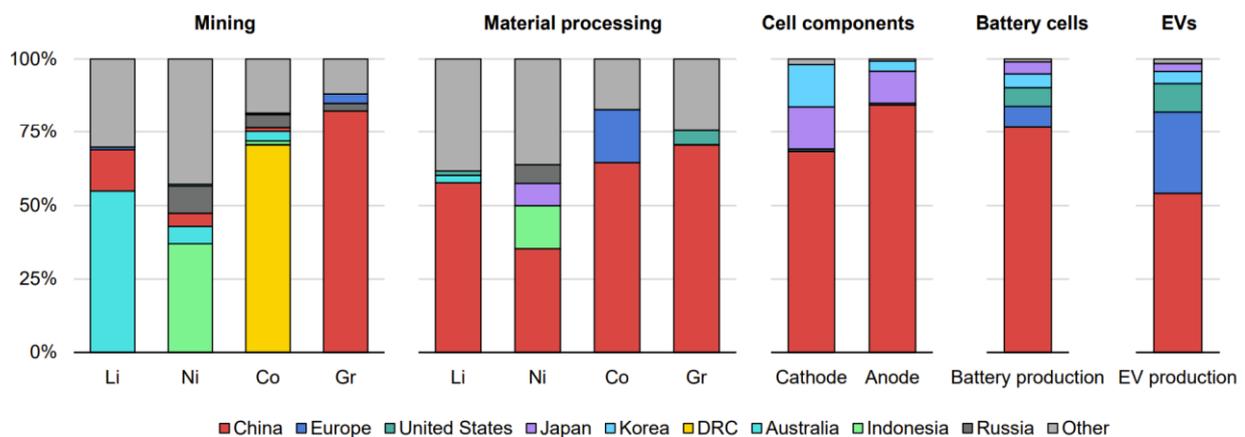


Abbildung 18: Geografische Verteilung der globalen Traktionsbatterien-Lieferkette (IEA, 2022). Bemerkungen: Li = Lithium; Ni = Nickel; Co = Kobalt; Gr = Graphit; DRC = Demokratische Republik Kongo. Die geografische Aufschlüsselung bezieht sich auf das Land, in dem die Produktion stattfindet. Der Bergbau basiert auf Produktionsdaten. Die Materialverarbeitung basiert auf den Daten zur Raffinerieproduktionskapazität. Die Produktion von Zellkomponenten basiert auf den Daten zur Produktionskapazität von Kathoden- und Anodenmaterial. Die Produktion von Batteriezellen basiert auf den Daten zur Produktionskapazität von Batteriezellen. Die EV-Produktion basiert auf den EV-Produktionsdaten.

#### Globale Produktion von Batteriezellen und -systemen

Im Jahr 2021 konzentrierte sich knapp 80% der Zellherstellung auf asiatische Unternehmen, gefolgt von europäischen mit 10% und nordamerikanischen mit 6%. Die Unternehmen CATL, BYD, Panasonic, LG und Samsung gehörten Ende 2021 zu den fünf weltweit führenden Herstellern von Lithium-Ionen-Batteriezellen in Bezug auf die Kapazität (vgl. Abbildung 19). Sämtliche Hersteller planen, die künftige Produktion deutlich zu erhöhen. Auffällig sind die ambitionierten Ziele von SVOLT und CALB: diese kündigten an, bis im Jahr 2025 ihre Produktionen auf 500 GWh bzw. 600 GWh zu erhöhen (Global X, 2022).

China war im Jahr 2021 bei weitem führend im Batteriewettbewerb mit fast 80% der weltweiten Lithium-Ionen-Produktionskapazitäten, was einer Gesamtkapazität von 558 GWh entspricht. Zudem erreichte China einen dominanten Anteil am Abbau des Graphits und an der Raffination von Batteriematerialien wie Lithium und Kobalt. Die USA folgen China mit etwa 6%, also 44 GWh Gesamtkapazität, im Jahr 2021. Der grösste Teil davon entfällt auf Giga Nevada von Tesla und Panasonic mit einer Jahreskapazität von 37 GWh. Auf die europäischen Länder zusammen entfielen im Jahr 2021 ca. 68 GWh oder rund 10% der weltweiten Batterieproduktionskapazität. Auch Ungarn und Polen gehören zu den fünf führenden Ländern, in denen Werke grosser Batteriehersteller wie SK Innovation und LG Chem angesiedelt sind. In naher Zukunft, bis 2025, werden Länder wie Deutschland, Frankreich, Schweden und England ihre Manufakturkapazitäten für Lithium-Ionen-Batterien deutlich steigern (siehe Abbildung 20 sowie nächster Abschnitt) (Visualcapitalist, 2022).

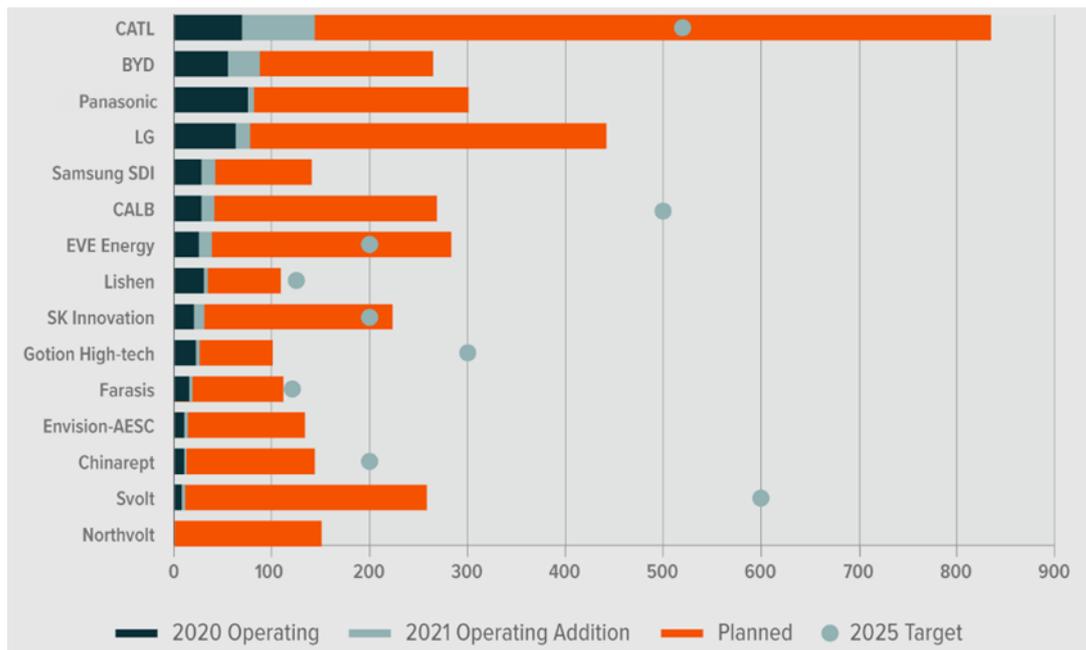


Abbildung 19: Batteriezellenmanufakturkapazität in GWh nach Hersteller und Jahr. CATL und BYD sind chinesische Unternehmen, Panasonic ist in Japan ansässig und LG ist ein Südkoreanisches Unternehmen (Global X, 2022).

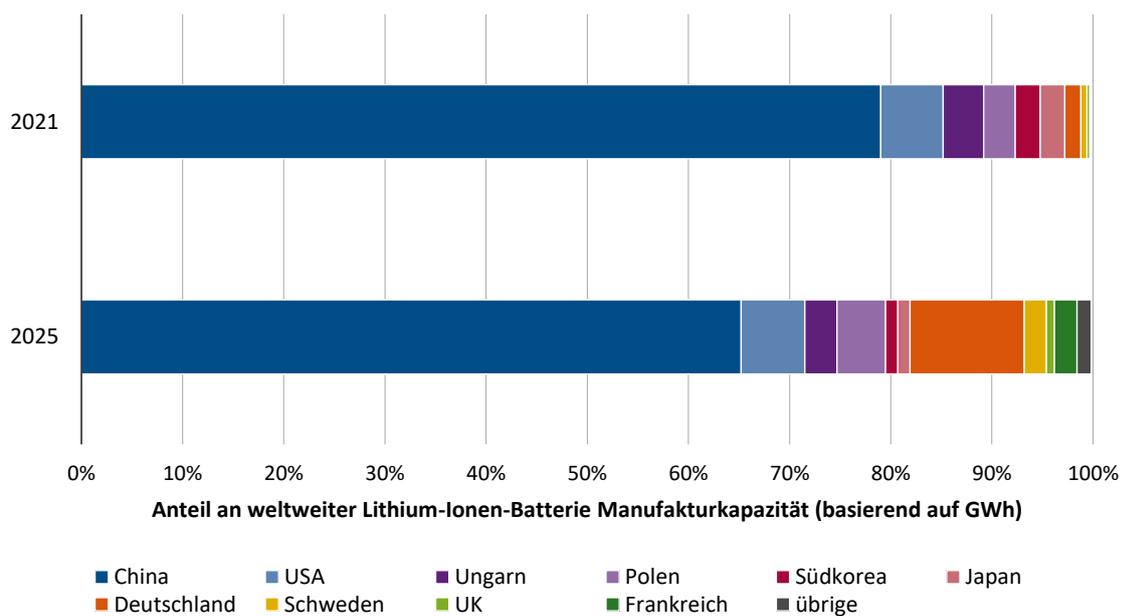


Abbildung 20: Anteil an weltweiter Manufakturkapazität für Lithium-Ionen-Batterien (basierend auf GWh) nach betroffenen Produktionsländern (Visual-capitalist, 2022).

### Geplante Produktionskapazität in Europa

Im Batteriezellenmarkt herrscht zurzeit viel Dynamik. Rund 40 Fabriken zur Herstellung von Batteriezellen sind geplant oder befinden sich bereits im Bau (RWTH Aachen, 2022a). Abbildung 21 veranschaulicht die aktuell geplante Produktion von Batteriezellen in Europa, gemäss Ankündigungen bis 2030. Insgesamt sind mehr als 1'400 GWh geplant, gegenüber rund 68 GWh Produktionskapazität im Jahr 2021 (RWTH Aachen, 2022a). Deutschland wird sich mit knapp 500 GWh zum Batterie-Hotspot entwickeln, da sich dort die meisten Zellhersteller, die meisten Modul- und Systembauer sowie die meisten Testzentren befinden. Auf Deutschland folgen das Vereinigte Königreich und Norwegen. Andererseits haben nordische Länder einen grösseren Marktanteil bei der Herstellung von Aktivmaterial bzw. der Materialförderung und beim Recycling. Bei den Zellherstellern sind drei Gruppen zu unterscheiden (RWTH Aachen, 2022a; swissquote, 2022):

- die grossen etablierten Hersteller,
- die Zusammenschlüsse von Automobilherstellern mit Technologie-Partnern, wie z.B. die Partnerschaft von VW und Northvolt oder die Joint Venture von Total, Stellantis und Mercedes,
- und Startups wie etwa Britishvolt.

Fast alle Automobilhersteller, eine bemerkenswerte Ausnahme ist General Motors, entwickeln und montieren das Batteriepaket selbst. In einigen Fällen wird die Montage des Batteriepacks von einem Joint Venture oder einem Unternehmen durchgeführt, an dem der Automobilhersteller beteiligt ist. Auf dem europäischen Markt gibt es bisher noch kein Generalunternehmen, das die gesamte Batterieproduktion abdeckt (RWTH Aachen, 2022a).

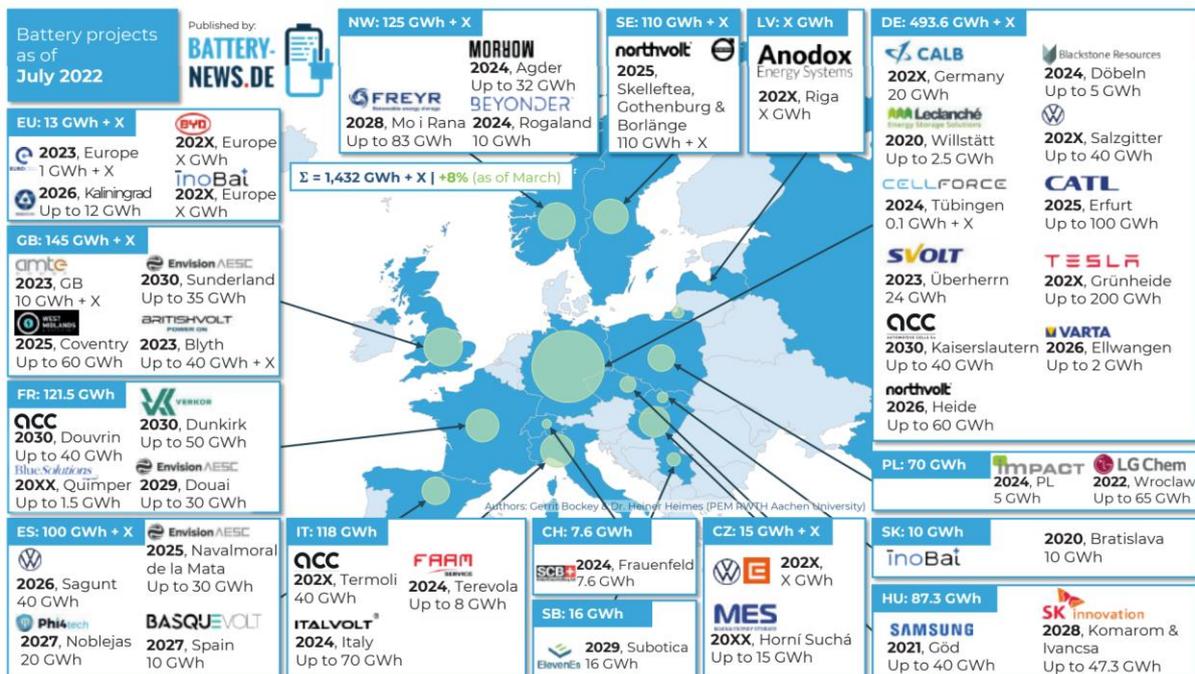


Abbildung 21: Überblick bestehende und geplante Produktion von Batteriezellen in Europa (inkl. CH, Norwegen und UK), Stand Juli 2022 (RWTH Aachen, 2022a). Bemerkung: die Grösse der Punkte steht für die geplante, künftige Produktion.

## Die Rolle der EU

Bis vor kurzem spielte Europa keine wichtige Rolle als Produktionsstandort für Batteriezellen. Technische Innovationen und stabile sowie förderliche politische Rahmenbedingungen machen Europa jedoch zunehmend attraktiver als neuen Marktplatz für die Batterieproduktion. Auf europäische Unternehmen entfallen rund 840 GWh der geplanten Aktivitäten. Im Vergleich dazu planen asiatische Unternehmen ca. 390 GWh und US-Unternehmen 200 GWh zu installieren (RWTH Aachen, 2022a).

Asiatische Hersteller wie CATL sind ebenfalls vermehrt in Europa anwesend. Die Präsenz von aussereuropäischen Herstellern ist u.a. auf regulatorische Rahmenbedingungen zurückzuführen. Ob Europa in absehbarer Zeit mit Asien im Hinblick auf Produktion und Innovation gleichziehen kann, ist noch unklar: Die asiatischen Hersteller haben nach wie vor einen deutlich erkennbaren Vorsprung und dürften auch in den nächsten 10 Jahren weiterhin führend bleiben. Hinter den sich in Europa formierenden Joint Ventures stehen allerdings grosse Automobilhersteller, die das nötige Kapital mitbringen und das Potenzial haben, mit den Asiaten gleichziehen zu können (RWTH Aachen, 2022a). China dürfte mit 88 der 115 in Planung befindlichen Fabriken auch in den nächsten 10 Jahren führend bleiben hinsichtlich der Produktionskapazität. Aktuell weist jedoch Europa die höchste Wachstumsrate auf (Benchmark Mineral Intelligence, 2019).

*Welche Engpässe bestehen bei der Produktionskapazität?*

### **Gründe für die Lieferengpässe**

Temporäre Lieferengpässe entlang der gesamten Lieferkette sind immer wieder möglich und auf unterschiedliche Gründe zurückzuführen. Die Frage nach bestehenden und zukünftigen Lieferengpässen lässt sich nicht pauschal beantworten und betrifft gegebenenfalls nur einzelne Unternehmen, Rohstoffe oder Komponenten (Fraunhofer ISI, 2020).

Diverse Akteure sind in den gesamten Herstellungsprozess von Lithium-Ionen-Batterien involviert. Lieferverzögerungen zum Endkunden können daher ebenso auftreten, wie Engpässe zwischen den Fahrzeugherstellern und deren Zulieferern für Zellen bzw. Batteriesystemen. Für einzelne Rohstoffe können temporäre Verknappungen, Lieferengpässe oder kurzfristige Preissteigerungen nicht ausgeschlossen werden, v.a. aufgrund des beschränkten Angebots auf dem Markt sowie aufgrund von geopolitischen Instabilitäten. Dies kann z.B. bei der Erschliessung von neuen Förderstätten auftreten, falls die Rohstoffe zeitlich nicht entsprechend der Nachfrage gefördert werden können oder ein Export aus den Förderländern nicht garantiert werden kann. Wie in Kap. 3.1 erwähnt, bestehen bei Nickel bzgl. zukünftiger Rohstoffverfügbarkeit noch Unsicherheiten. Daher sind temporäre Verknappungen bzw. Lieferengpässe nicht auszuschliessen (Fraunhofer ISI, 2020).

### **Auswirkungen des Ukraine-Kriegs**

Der Chip- und Rohstoffmangel sowie die globale Pandemie haben in den letzten Jahren grosse Auswirkungen gehabt und zu Verzögerungen bei Fahrzeuglieferungen geführt. Der im Frühjahr 2022 begonnene Ukraine-Krieg hat die Lieferschwierigkeiten am Fahrzeug-Markt weiter verschärft. Bspw. fehlten Zulieferprodukte aus Fabriken in der Ukraine, wie etwa Kabelbäume (autoschweiz, 2022). Die Lieferketten für Lithium, Kobalt und Graphit sind von der Versorgungsunterbrechung weniger betroffen. Besorgniserregend ist jedoch die Situation bei Nickel: Russland ist der drittgrösste Produzent, der 2021 etwa 9% des weltweiten Nickels geliefert und etwa 6% verarbeitet hat. Noch kritischer ist jedoch, dass Russland etwa 20% des weltweiten Nickels der Klasse 1 mit einem Nickelgehalt von mindestens 99.8% für Batterien produziert (IEA, 2022).

### **Strategien zur Minimierung der Risiken**

Um die Risiken zu minimieren und die Lieferabhängigkeiten der Industrie zu reduzieren, verfolgen die Unternehmen unterschiedliche Strategien: Diversifikation der Lieferanten, strategische Industriekooperationen entlang der Wertschöpfungskette, wie z.B. BMW mit CATL, VW mit Northvolt, BMZ mit Samsung oder BASF mit Nornickel, sowie Priorisierung von Forschungsk Kooperationen, Joint Ventures und Eigenfertigung (Fraunhofer ISI, 2020). Weiter schliessen Automobilhersteller Verträge direkt mit Lieferanten von Batterierohstoffen ab. Im Jahr 2022 hat z.B. Mercedes eine Kooperation mit Rohstoffproduzenten angekündigt, um Kapazitäten zu sichern (electrive, 2022). Im Rahmen eines *Important Projects of Common European Interest* (IPCEI) werden Unternehmenskonsortien mit dem Ziel einer Batteriezellfertigung gefördert. Ein erstes solches Konsortium besteht u.a. aus Opel, Saft, BMW, VARTA und BASF (Fraunhofer ISI, 2020). Flankiert werden diese Massnahmen durch weitere regulatorische Aktivitäten wie die Überarbeitung der Batterie-Richtlinie *EU Directive 2006/66/EC* (siehe auch Kap. 2.4).

Die mögliche Nickelknappheit stellt ein Risiko dar, da diese zu Lieferengpässen führen könnte. Jedoch ist das Recycling eine relevante Massnahme, um der Knappheit entgegenzuwirken. Nickel kann zu über 90% aus gesammelten Batterien zurückgewonnen werden. Sofern Batterien gesammelt bzw. effizient recycelt werden, wird dies in Zukunft zur Sicherheit der Rohstoffversorgung beitragen (Fraunhofer ISI, 2020). Allerdings kann diese Strategie die kurz- und mittelfristigen Risiken nicht signifikant mindern. Denn die Nachfrage nach Traktionsbatterien wird gemäss Prognosen in den nächsten Dekaden stark anwachsen.

## 4.2 Materialien- und Komponentenherstellung

*Welche ökologischen Auswirkungen resultieren aus der Metallherstellung?*

Kapitel 2.3 gibt einen Überblick über die ökologischen Auswirkungen von Traktionsbatterien im Lebenszyklus und stellt diese in den Kontext von herkömmlichen Antriebssystemen für Fahrzeuge. Dort wird auch gezeigt, dass aus einer Ökobilanzperspektive die nennenswertesten Materialien bei der Batterieherstellung die folgenden sind:

- die aktiven Kathodenmaterialien, vorrangig Nickel und Kobalt,
- das Graphit in der Anode,
- die primär in Stromkollektoren verwendete Kupferfolie,
- sowie das Aluminium, welches in verschiedenen Batteriekomponenten zum Einsatz kommt.

Die Herstellung dieser Materialien wird in diesem Kapitel detaillierter betrachtet.

### Graphitherstellung

In den heute gängigen Lithium-Ionen-Batterien kommt meist Graphit als primäres Anodenmaterial zum Einsatz und macht einen nennenswerten Anteil des gesamten Gewichts der Batterie aus (vgl. Kap. 2.1). So enthält bspw. ein Tesla Modell S bis zu 54 kg Graphit (Surovtseva et al., 2022). Das Graphit, das aktuell bei Batterien eingesetzt wird, ist üblicherweise ein Mix aus natürlichen und synthetischen Quellen; erstere haben üblicherweise einen Anteil von ungefähr zwei Drittel (ECGA, 2018). Es ist zu erwarten, dass der Anteil an synthetischem Graphit bei fortschrittlicheren Batteriechemien zunimmt, da es normalerweise eine höhere Qualität aufweist (ECGA, 2018; Whiteside & Finn-Foley, 2019).

Synthetisches Graphit ist ein nennenswerter Verursacher von Stickstoffoxiden  $\text{NO}_x$ , Schwefeloxiden  $\text{SO}_x$  und  $\text{PM}_{10}$ -Emissionen<sup>18</sup>. Diese entstehen während der Karbonisierung in der Herstellung von Graphit, wenn das eingesetzte Steinkohleteerpech und das Petrolkoks verunreinigt werden durch Schwefel, Stickstoff und Asche. Die künstliche Herstellung von Graphit ist auch sehr energieintensiv, da hohe Verarbeitungstemperaturen erforderlich sind (Porzio & Scown, 2021). Zudem wird dieser Energieverbrauch laut Dai et al., 2019 in vielen aktuellen Ökobilanzstudien vermutlich massiv unterschätzt. Die Autoren weisen sogar darauf hin, dass der letzte Verarbeitungsschritt bei der Herstellung von Graphit in Batteriequalität nicht in ihrer Studie berücksichtigt wurde.

### Gewinnung von Kupfer, Nickel und Kobalt

Kupfer ist einer der Hauptbestandteile von Lithium-Ionen-Batterien, da die Kupferfolie als Stromkollektor eingesetzt wird. Kupfer kann in pyro- oder hydrometallurgischen Verfahren gewonnen werden. Das pyrometallurgische Verfahren, welches weltweit am häufigsten für die Kupfergewinnung zum Einsatz kommt, beinhaltet die Herstellung eines Kupferkonzentrats durch Mahlen, gefolgt von Schmelz- und Raffinierungsverfahren (Chordia et al., 2021). Die Verarbeitung und Raffinierung von sulfidischen Kupfererzen können nennenswerte  $\text{SO}_x$ -Emissionen verursachen (Dai et al., 2019). Zudem kann die Kupfergewinnung die Entsorgung sulfidischer Abfallerze nach sich ziehen, was die Gefährdung von Mensch und Umwelt durch toxische Stoffe signifikant erhöht und die Funktionsweise von Ökosystemen verändert (Ellingsen et al., 2014).

Nickel und Kobalt werden in den aktiven Kathodenmaterialien eingesetzt, wobei ihr Verhältnis von der Kathodenchemie abhängig ist. Im Allgemeinen versuchen viele Hersteller, den Kobaltanteil in der Kathode zu reduzieren, indem sie den Nickelanteil erhöhen. Nickel und Kobalt werden üblicherweise gemeinsam mit Kupfer aus sulfidischen Erzen gewonnen<sup>19</sup>. Die Umweltwirkungen der Förderung, Verarbeitung und Raffinierung von Erzen sind also verknüpft. Die relativen Anteile der verschiedenen Metalle sind dabei von Bedeutung, allerdings variieren diese je nach Produktionsstätte.

<sup>18</sup> Als  $\text{PM}_{10}$  resp.  $\text{PM}_{2.5}$  werden Partikel bezeichnet, deren Durchmesser weniger als 10 resp. 2.5 Tausendstel-Millimeter beträgt.

<sup>19</sup> Nickel wird auch aus oxidischen Erzen gewonnen, doch gelangen diese grösstenteils als Legierungselement in die Stahlproduktion.

Die Gewinnung von Nickelsulfat in Batteriequalität basiert üblicherweise auf Reinnickel mit einem Reinheitsgrad von > 99.8%, welches durch Elektrolyse aus Rohnickel gewonnen wird. Norilsk Nickel in Russland ist einer der grossen Produzenten von Reinnickel und gleichzeitig der weltweit grösste Einzelemittent von SO<sub>2</sub>, wie Daten der NASA zeigen (Greenpeace, 2020). Zurzeit tätigt Norilsk bedeutende Investitionen im Bemühen, seine SO<sub>2</sub>-Emissionen im kommenden Jahrzehnt um über 90% zu verringern (Nickel Institute, 2021; Nornickel, 2020). Dies könnte die Massnahme mit dem grössten positiven Einfluss auf die Umwelteinwirkungen von Lithium-Ionen-Batterien sein. Denn die SO<sub>2</sub>-Emissionen stellen einen bedeutenden Anteil in zahlreichen Wirkungskategorien dar. Sie entstehen bei der Nickelgewinnung für das Aktivmaterial der Kathoden. Andere Nickelschmelzwerke aus der ganzen Welt haben bereits Eindämmungsmassnahmen für SO<sub>2</sub>-Emissionen eingeleitet (Dai et al., 2019). Daher kann davon ausgegangen werden, dass die Umweltwirkungen der Nickelgewinnung in künftigen Ökobilanzstudien über Lithium-Ionen-Batterien tiefer ausfallen werden.

Die Kobaltförderung findet vorwiegend im Kongo statt. Dort wird das Kobalt grob weiterverarbeitet und anschliessend mehrheitlich als rohes Kobalt-Hydroxid nach China exportiert (Dai, Kelly, & Elgowainy, 2018). Anders als Norilsk's Röstprozess zur Nickelgewinnung werden die SO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Röstung von Kupfer-Kobalt-Erzen im Kongo abgeschieden und zur Herstellung von Schwefelsäure weiterverwendet. Da der Kongo keine chemische Industrie hat, produzieren die Erzaufbereitungsanlagen Schwefelsäure vor Ort, um den Bedarf der hydrometallurgischen Erzaufbereitungsanlage an Schwefelsäure zumindest teilweise abzudecken und so Kosten zu senken (Dai, Kelly, & Elgowainy, 2018; Dai et al., 2019). Die Kobaltgewinnung wirft andere Umweltbedenken auf, wie z.B. nennenswerte PM10-Emissionen. Dazu tragen v.a. die Feinstaubemissionen von Halden mit geringwertigem Erz bei sowie grosse Transportdistanzen, die von Diesellastwagen auf unbefestigten Strassen zurückgelegt werden (Dai et al., 2018, 2019, und Golder Associates, 2007). Siehe Kap. 3.2 für negative, soziale Auswirkungen.

### **Aluminium**

Aluminium wird für viele Komponenten von Lithium-Ionen-Batterien eingesetzt (Porzio & Scown, 2021). Die Umweltwirkungen im Zusammenhang mit der Aluminiumgewinnung sind primär auf den Stromverbrauch während des Elektrolyseprozesses zurückzuführen. Abhängig vom regionalen Strommix können diese Wirkungen bedeutend sein, z.B. wenn das Aluminium in China hergestellt wird, von wo die meisten Batterien herkommen. Zwar ist die weltweite Aluminium-Recycling-Quote hoch, aber Dai et al. (2019) weisen darauf hin, dass das in Batterien verwendete Aluminium bis zu 100% Primäraluminium sein kann. Der Grund dafür ist, dass die meisten Verbraucherabfälle, die aus verarbeitetem altem Aluminium bestehen, üblicherweise eine Qualitätsstufe einbüßen. Daher werden sie nur als Gussmaterial verwendet. Die Unterschiede zwischen den Legierungsqualitäten und -Spezifikationen für Aluminiumkomponenten erschweren das Kreislauf-Recycling von neuem Aluminiumausschuss. Die Herstellung von Primär- und Sekundäraluminium weisen komplett unterschiedliche Energie- und Umweltprofile auf. Die Annahmen zum Recycling-Anteil bei Aluminium könnten deshalb die Ergebnisse der Ökobilanz dieser Batterien signifikant beeinflussen.

### **Energiequellen für Transport, Wärme und Stromerzeugung**

Für die Produktion der Komponenten werden fossile Brennstoffe für Transport, Wärme und Stromerzeugung eingesetzt. Dies generiert den Hauptanteil der Emissionen, neben der Förderung und Verarbeitung von Rohmaterial. Je sauberer diese wichtigen Hintergrundprozesse werden und je mehr sie auf erneuerbare Energiequellen umgestellt werden, desto geringer werden die gesamten Umweltwirkungen aus der Material- und Komponentenproduktion.

### 4.3 Energie- und Materialeffizienz der Produktion

*Wie hoch sind der Energieverbrauch und die Materialeffizienz in der Produktion?*

#### **Energiebereitstellung und Energieverbrauch der Produktion**

Crenna et al. (2021) kommen zum Ergebnis, dass die Strom- und Wärmebereitstellungsprozesse in allen Produktionsschritten nur knapp 20% zur gesamten Klimawirkung einer Batterie beitragen. Dai et al. (2019) hingegen fanden, dass rund 40% der Klimawirkung durch die Energiebereitstellung verursacht wird. Gemäss Crenna et al. (2021) werden knapp 85% der Klimaeffekte, die von der Stromproduktion stammen, in der Herstellung des Aktiven Materials für die Kathode verursacht. Rund 6% stammen aus dem Produktionsprozess für die Kathode und rund 10% aus der Zellfertigung.

Der Energieverbrauch zur Herstellung des Kathodenpulvers ist erheblich. Insbesondere die Synthese des Hydroxids aus Nickel-, Mangan- und Kobaltsulfaten sowie die darauf folgende Kalzination mit Lithiumcarbonat tragen dazu bei (Dai et al., 2019; Dai, Kelly, Dunn, et al., 2018). Im ersten Prozessschritt findet eine energieintensive Reinigung des Abwassers statt. Zudem wird der Kalzinierungsschritt in vielen Fällen mehrmals wiederholt, um das Material optimal zu nutzen. Dies hat zwar einen erhöhten Energieverbrauch zur Folge, da aber der Hauptkostentreiber dieses Verfahrensschrittes die Materialkosten sind, wird der Prozess auf Materialeffizienz statt Energieeffizienz optimiert (Dai et al., 2019; Dai, Kelly, Dunn, et al., 2018).

Beim Bedarf nach Prozesswärme verursachen die Herstellung der Kathode knapp und die Herstellung der Zelle gut die Hälfte der Wirkung (Crenna et al., 2021). Die Feuchtigkeitsregelung im Trockenraum für Elektrodentrocknung erfordert Strom. Zudem kommt Dampf bei der Entfeuchtung und Trocknung zum Einsatz (Dai et al., 2019). In der Elektrodenherstellung wird das Lösungsmittel N-Methyl-2-pyrrolidon, auch NMP genannt, verwendet. Die Eindampfung dieses Lösemittels benötigt einen hohen Energieverbrauch, da eine grosse Menge an Luft zirkulieren muss, um die NMP-Konzentration in der Luft unter der Explosionsgrenze zu halten. Es ist wichtig anzumerken, dass der Energiebedarf für diese beiden Produktionsschritte grösstenteils von der Auslastung der Anlage unabhängig ist, d.h. bei einer niedrigen Kapazitätsausnutzung ist der Energieverbrauch pro Zelle viel höher als bei einer Vollauslastung.

#### **Zellherstellungsenergie vs. Fabrikgrösse**

Der Energieverbrauch pro produzierter kWh Batterie zelle hat im letzten Jahrzehnt deutlich abgenommen. Dafür gibt es drei treibende Faktoren:

- Die Hochskalierung von Pilotprojekten zu Gigafactory-Dimensionen; je grösser die Fabrik, desto geringer der spezifische Energieverbrauch
- Die Anlagen, die zurzeit untersucht werden, werden i.d.R. fast voll ausgelastet, was bei älteren Studien, die auf Daten aus Pilotbetrieben basierten, nicht der Fall war.
- Verbesserte Verfahren aufgrund von Lerneffekten

Während die Verbesserungspotenziale der ersten beiden Effekte vermutlich weitgehend ausgeschöpft sind, können wahrscheinlich weitere Verbesserungen aufgrund von Lerneffekten erzielt werden, je mehr Erfahrungen mit der Produktion von Lithium-Ionen-Batterien gemacht werden.

Verbesserungspotenzial aufgrund von grösseren Anlagen und Lerneffekten besteht im Bereich Materialeffizienz. Chordia et al. (2021) kommt zum Schluss, dass die Umweltauswirkungen pro kWh produzierter Zelle deutlich abnehmen, wenn sie auf die Produktionskapazitäten einer Gigafactory hochskaliert werden, da die Materialeffizienz zunimmt. Hierfür wurden die Wirkungskategorien wie Versauerung, Eutrophierung und Toxizität betrachtet. Diese sind stark abhängig von der Produktion von Nickel- und Kobaltsulfaten, welche für die Herstellung des aktiven Kathodenmaterials dienen.

## 4.4 Ökologische Auswirkungen der Produktion

*Wie hoch sind die CO<sub>2</sub>-Intensität und andere ökologische Auswirkungen der Produktion je nach Batteriechemie?*

Wie im Kap. 2.3 erwähnt, unterscheiden sich die Zahlen für den Energieverbrauch bei der Zellherstellung in verschiedenen Studien erheblich. Dies rührt daher, dass Anlagen verschiedener Grösse und mit unterschiedlicher Auslastung untersucht wurden. Moderne Gigafactorys, die bei voller Auslastung betrieben werden, befinden sich am unteren Ende des Spektrums bezüglich Energieverbrauch in der Literatur. Allerdings gibt es weitere Gründe für die Varianz beim Energieverbrauch in den verschiedenen Anlagen, die mit dem Verfahrensdesign sowie der Zellchemie zu tun haben. Bspw. sinkt der Energieverbrauch, wenn beim Trocknen der Elektroden Wasser anstelle von NMP als Lösungsmittel Wasser eingesetzt wird (Dai et al., 2019). Zudem weisen Anlagen in heissen, feuchten Regionen einen höheren Energieverbrauch für die Entfeuchtung auf als Werke in gemässigten Regionen (Dai et al., 2019).

### Energiequellen in der Herstellung

Neben den Unterschieden im Energieverbrauch haben auch die Energiequellen in der Herstellung und den vorgelagerten Prozessen einen starken Einfluss auf die Umweltwirkungen bei der Herstellung von Lithium-Ionen-Batterien. Die Treibhausgasemissionen pro kWh Batterie nehmen um 3–9%<sup>20</sup> ab, wenn die Produktionsenergie vom chinesischen Strommix von 73% fossiler Stromerzeugung auf den europäischen Mix von 43% fossiler Stromerzeugung umgestellt wird (Crenna et al., 2021, revidierte Ergebnisse von Januar 2023). Gemäss einer anderen Studie verringert die Umstellung des Zellproduktionsstroms von einem südkoreanischen auf einen schwedischen Strommix, der fast CO<sub>2</sub>-frei ist, die Treibhausgasemissionen um 55%, sodass fast alle Umweltauswirkungen auf die vorgelagerten Prozesse zurückzuführen sind (Chordia et al., 2021). Die Autoren erwähnen zudem, dass Verbesserungen in ähnlichem Ausmass in den folgenden Kategorien erzielt werden könnten: Ozonbildung, Feinstaubemissionen, Ozonabbau in der Stratosphäre und ionisierende Strahlung. Die Auswirkungen in diesen Kategorien werden hauptsächlich durch den Stromverbrauch in der Herstellung bestimmt. Bei Crenna et al. (2021) hingegen stammen die Feinstaubemissionen zu einem grossen Teil aus der Materialherstellung, also aus dem Abbau und den metallurgischen Prozessen.

### Einfluss Zellchemie

Die Zellchemie hat ebenfalls einen Einfluss auf die Umweltwirkung der Produktion von Lithium-Ionen-Batterien, allerdings weniger als vielleicht erwartet. Die Treibhausgasemissionen (in kg CO<sub>2</sub>eq/kWh) bei der Produktion von Batteriemodulen mit NMC111-, NMC811-, und NCA-Zellen unterscheiden sich um maximal 10%, wenn sie auf ähnliche Weise produziert werden (Crenna et al., 2021). Dies ist damit zu erklären, dass die Batterien im Allgemeinen mit ähnlichen Verfahren produziert werden. Sie unterscheiden sich lediglich in Bezug auf das Aktivmaterial für die Kathode. Der Faktor, der den grössten Unterschied macht, ist das Verhältnis von Nickel und Kobalt im Kathodenpulver. Zwischen den LFP-Zellen und den NMC- bzw. NCA-Zellen besteht ein grösserer Unterschied, da deren Kathode aus ganz anderen Materialien besteht.

Abbildung 22 zeigt die Ökobilanzen der Batterieherstellung, gegliedert nach den gängigen Batteriechemien. Die Ergebnisse sind auf die Umweltbelastungen der Produktion einer NMC622-Batterie in China normalisiert. Der Hauptunterschied zwischen NMC- und NCA-Kathoden liegt im Einsatz von Mangan bei NMC-Kathoden, bzw. von Aluminium bei NCA-Kathoden. Generell verursacht die Produktion von Aluminium<sup>21</sup> in den meisten Wirkungskategorien höhere Umweltbelastungen als Mangan. Daher schneiden NCA-Batterien im Vergleich mit NMC-Batterien marginal schlechter ab. Der Hauptunterschied zwischen NMC622- und NMC111-Batterien wiederum liegt darin, dass bei NMC622-Batterien mit einem tieferen Kobaltgehalt und einem höheren Nickelgehalt gearbeitet wird.

<sup>20</sup> Abnahme von 9%: Wenn die Produktion des aktiven Materials in China verbleibt und nur die Kathoden-, Zell- und Batterieproduktion nach Europa verschoben wird. 3% Abnahme: Wenn auch die Produktion des aktiven Materials nach Europa verschoben wird. Daten durch E. Crenna neu berechnet mit ecoinvent v3.8 im Januar 2023.

<sup>21</sup> Wenn für die Elektrolyse ein Globaler oder chinesischer Strommix angenommen wird. Aluminiumproduktion in Europa nutzt hingegen weitgehend erneuerbar erzeugter Strom und schneidet entsprechend besser ab.

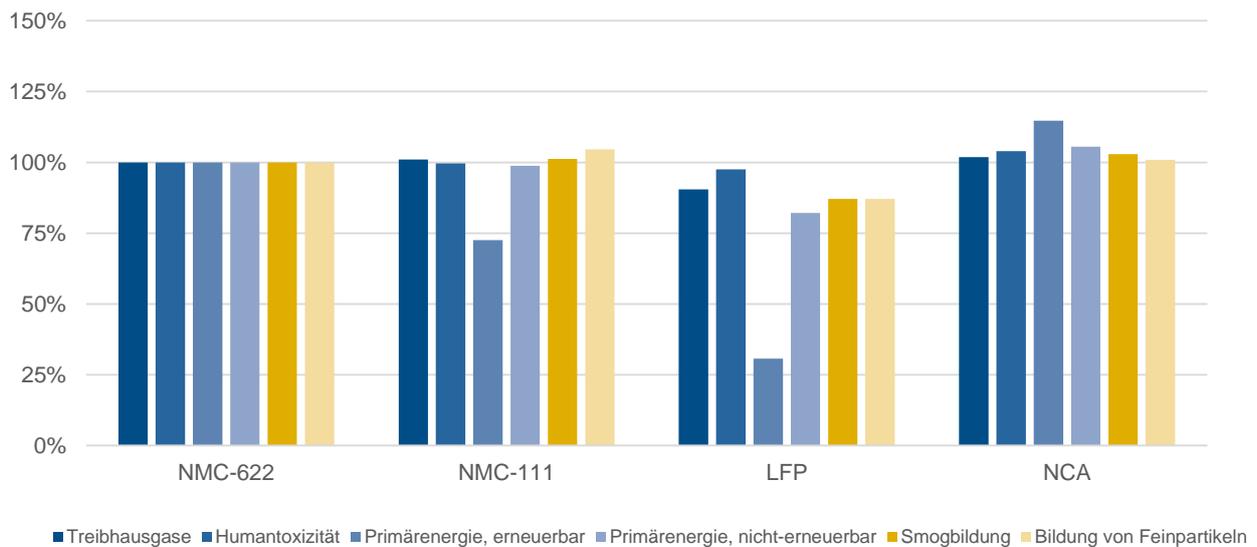


Abbildung 22: Vergleich der Umweltbelastungen durch die Batterieproduktion nach Kathodenchemien. Eigene Bearbeitung mit Daten aus dem PSI-Carculator<sup>22</sup>.

Grundsätzlich ermöglicht jedoch der aktuelle Wissenschaftsstand bei Ökobilanzen noch keinen detaillierten Vergleich zwischen verschiedenen Batterietypen, da die Datenlage noch nicht genau und vollständig genug ist, um beim Vergleich in die Tiefe zu gehen. Dazu kommt, dass sich Technologien rasant verbessern, wie z.B. Abgas-Retrofitting in Nickelschmelzanlagen bei Norilsk in Russland und die verbesserten Recyclingprozesse von Lithium-Ionen-Batterien (siehe Kap. 6), welche die Umweltwirkungen weiter senken werden.

<sup>22</sup> <https://calculator.psi.ch/>

## 5. Nutzung der Batterie

### 5.1 Dimensionierung der Batterien

Wie effizient wird die Batterie genutzt? Was wäre eine optimale Dimensionierung der Batterie?

#### Durchschnittliche Fahrten

Der durchschnittliche Personenwagen in der Schweiz wird weniger als 25 km pro Tag gefahren (BFS & ARE, 2017). Zudem werden laut einer europaweiten Studie ca. 80% der Fahrzeuge täglich jeweils weniger als 100 km gefahren (Paffumi et al., 2018). Weiter legen 90–95% der Fahrzeuge weniger als 150 km täglich zurück, abhängig von Region und Datenquelle. Eine Studie untersuchte *Floating Car Data*<sup>23</sup> aus einem italienischen Grossstadtgebiet mit über 30 Mio. Fahrten. Sie zeigte auf, dass ein Elektrofahrzeug mit einer Reichweite von 200 km für 97% aller Fahrten ausgereicht hätte, ohne eine Zwischenladung. Eine Reichweite von 400 km hätte für 99% aller Fahrten ausgereicht (Brancaccio & Deflorio, 2021).

#### Verschiedene Batteriegrössen

In der ersten Hälfte des Jahres 2022 erreichten die vier meistverkauften Elektrofahrzeuge in der Schweiz (CleanTechnica, 2022) eine Reichweite nach *Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure* (WLTP) von ca. 350 bis 600 km, je nach Spezifikation der Fahrzeugmodelle<sup>24</sup>. Diese Fahrzeuge sollten also die grosse Mehrheit der Fahrten ohne eine Zwischenladung absolvieren können. Das fünftplatzierte Elektrofahrzeug ist der Fiat 500e, der eine Reichweite von 190–282 km nach WLTP aufweist, je nachdem, welche Batteriegrösse gewählt wird. Dieses kleine Fahrzeug soll insbesondere den Markt der Pendler/-innen bedienen. Abbildung 23 zeigt einen Überblick, welche Reichweiten nach WLTP bei den Elektrofahrzeugen auf dem Schweizer Markt erhältlich sind. Der Mittelwert liegt bei ca. 380 km, das Minimum bei 105 km mit einem Smart Fortwo Cabrio EQ. Das Maximum liegt bei 614 km mit einem Tesla Model 3 Performance. Rund 70% aller angebotenen Modelle weisen eine Reichweite von > 345 km auf.

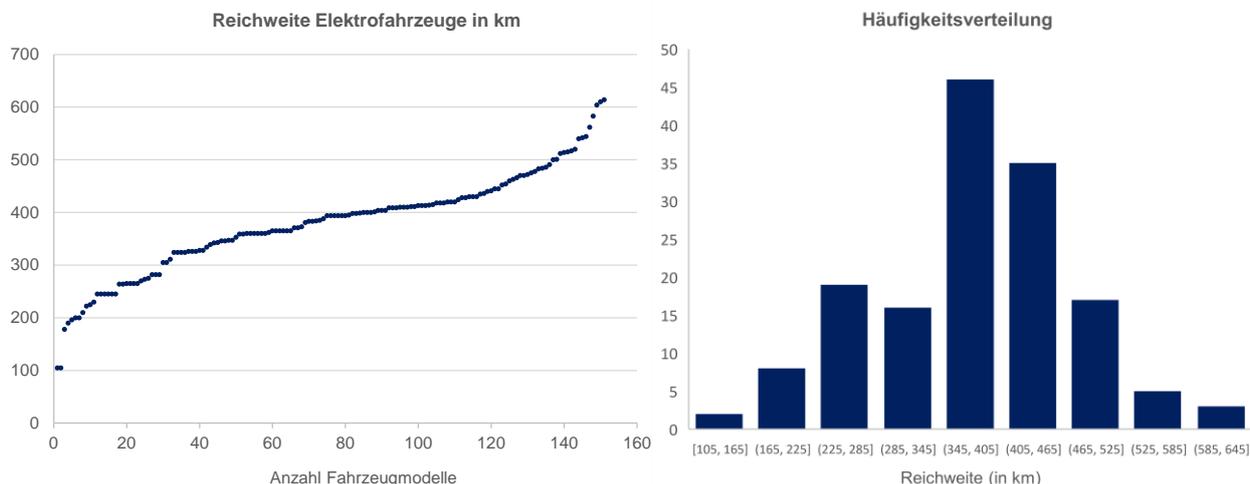


Abbildung 23: Marktüberblick der Reichweite sämtlicher Elektrofahrzeug-Modelle auf dem Schweizer Markt. Eigene Bearbeitung auf Basis von Daten aus Eco-Auto (2022).

Abbildung 24 zeigt den Marktüberblick der Batteriekapazität in kWh, die das aktuelle Angebot an Elektrofahrzeugen in der Schweiz bietet. Der Mittelwert liegt bei ca. 71 kWh, das Minimum bei 17.6 kWh mit einem Smart Fortwo Cabrio EQ. Das Maximum liegt bei 108.4 kWh mit einem Mercedes EQS 53 4matic+. Rund 77% aller angebotenen Modelle weisen eine Batteriekapazität von > 56 kWh auf.

<sup>23</sup> Floating Car Data (FCD) bezeichnet einen Systemvorschlag mit Daten, die aus einem Fahrzeug heraus generiert werden, welches aktuell am Verkehrsgeschehen teilnimmt.

<sup>24</sup> <https://eco-auto.info/>

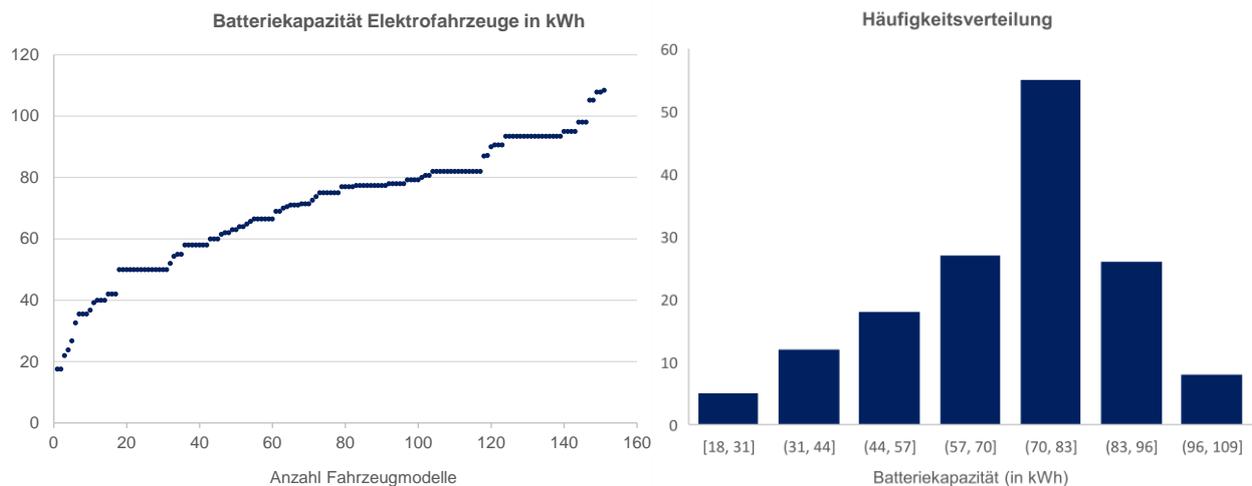


Abbildung 24: Marktüberblick der Batteriekapazität sämtlicher Elektrofahrzeug-Modelle auf dem Schweizer Markt. Eigene Bearbeitung auf Basis von Daten aus Eco-Auto (2022).

### Umweltbelastungen vs. Batteriegrösse

Abbildung 25 wurde mithilfe des PSI-Carculator berechnet unter der Annahme von Standardwerten für Schweizer Betriebsbedingungen. Lediglich die Batteriegrösse wurde verändert. Werden die unterschiedlichen Batteriegrössen für das gleiche Modell abgebildet, macht dies den Einfluss sichtbar, den die Batteriegrösse auf die folgenden Faktoren ausübt: Treibhausgasemissionen, durchschnittliche Umweltbelastungen, Gesamtbetriebskosten und tatsächliche Reichweite. Als Vergleich diente die Bandbreite der angebotenen Batteriegrössen von relevanten Modellen<sup>25</sup>: ein Tesla Modell 3 60–75 kWh, ein Fiat 500e 24–42 kWh sowie ein Audi e-Tron 55–95 kWh. Dabei zeigte sich, dass eine um 50% grössere Batterie die folgenden Werte erhöhen würde: die Reichweite um ungefähr 40%, die Gesamtbetriebskosten um ca. 14% und die batteriebezogenen Treibhausgasemissionen um ca. 15%. Es ist wichtig an dieser Stelle anzumerken, dass alle drei Fahrzeuge unter der Annahme derselben Lebensfahrleistung berechnet wurden, was in der Realität aber nicht zwingend der Fall ist. Wenn die grössere Batterie dazu verwendet wird, höhere Tagesreichweiten zu erreichen, weist das Fahrzeug vermutlich eine höhere Lebensfahrleistung auf als eines mit einer kleineren Batterie, welches täglich nur kurze Distanzen zurücklegt. In diesem Falle würden die Umweltwirkungen pro km des Fahrzeugs mit grösserer Batterie tiefer ausfallen als hier abgebildet. Letzten Endes führt die Produktion grösserer Batterien zu erhöhten Umweltwirkungen. Wie die verschiedenen Batteriechemien die Umweltbelastungen beeinflussen, wird detailliert im Kap. 4.4 beschrieben.

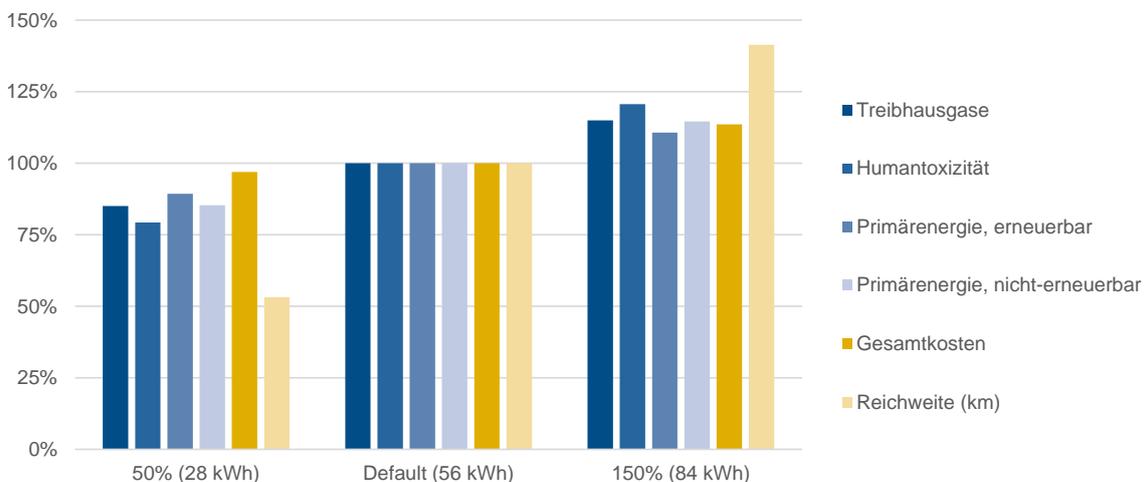


Abbildung 25: Zusammenhang zwischen Batteriegrösse und Treibhausgasen, Humantoxizität, Primärenergie, Gesamtbetriebskosten und tatsächlicher Fahrzeugreichweite. Eigene Bearbeitung mit Daten aus dem PSI-Carculator<sup>26</sup>.

<sup>25</sup> <https://eco-auto.info/>

<sup>26</sup> <https://calculator.psi.ch/>

Aus ökologischer Sicht sollte die Batterie so klein wie möglich sein, um die Umweltbelastungen zu minimieren. Ein höheres Gewicht bedeutet ausserdem auch einen höheren Energieverbrauch. Andererseits weist eine grössere Batterie Vorteile im Winterbetrieb auf, wie z.B. genügende Reichweite oder eine langsamere zyklische Alterung. Die optimale Grösse der Batterie hängt somit vom individuellen Einsatz ab und entspricht einem Kompromiss zwischen maximaler Reichweite, Kosten und Umweltbelastungen. Die täglich zurückgelegte Distanz soll beim Kaufentscheid im Vordergrund stehen. Grundsätzlich ist mit einem kompletten Ladezyklus von 100% alle zwei Tage gewährleistet, dass die Batterie mindestens 12 Jahre genutzt werden kann. Wer also im Durchschnitt 40 km pro Tag fährt, erzielt mit einer Batterie von 80 km realer Reichweite eine optimale Ausnutzung der Batterie. Da Fahrzeuge aber meist nicht jeden Tag gleich genutzt werden, ist die durchschnittliche Nutzung nicht das einzige relevante Kriterium. Konkret können folgende Anwendungsfälle unterschieden werden:

- **normale Pendlerdistanzen** < 40 km pro Tag  
Keine oder höchstens sehr seltene Langstreckenfahrten: benötigt werden max. 30 kWh Batteriekapazität, was einer realen Reichweite von 120–150 km im Stadt- und Agglomerationsverkehr entspricht, je nach Jahreszeit.
- **gelegentliche Langstreckenfahrten** bis 400 km pro Tag  
Mit ca. 50 kWh Batteriekapazität lässt sich 2 Stunden oder gut 200 km Autobahn fahren. Der Verbrauch auf der Autobahn ist höher als im Stadtverkehr. Je nach Schnellladeleistung, die das Fahrzeug maximal zulässt, kann in 10–45 Minuten Energie für die nächsten 200 km geladen werden.
- **regelmässige Langstreckenfahrten** und/oder Strecken über 400 km pro Tag  
Mit 70 kWh Batteriekapazität lässt sich auf der Autobahn rund 3 Stunden oder gut 300 km mit einer Ladung fahren. Das Fahrzeug sollte mit 150 kW oder mehr schnellladen können, damit in 10–20 Minuten Energie für die nächsten 200 km geladen werden kann.

## 5.2 Lebensdauer der Batterien

Wie hoch ist die Lebensdauer der Batterie bzw. deren Degradierung im Zusammenhang mit der Nutzung? Welche Rolle spielt das Schnellladen und -entladen?

### Definition Alterungsprozess

Lithium-Ionen-Batterien unterliegen einem Alterungsprozess. Daher ist ihre Lebensdauer begrenzt. Der Alterungsprozess kann in zwei Arten unterschieden werden: Die kalendarische Alterung, welche die innere Degradierung der Traktionsbatterie beschreibt und die zyklische Alterung, die aufgrund der Beanspruchung durch wiederholtes Laden und Entladen stattfindet (Technische Universität Ilmenau, 2022). Der Alterszustand einer Batterie wird durch den sog. «State of Health, SOH», den Gesundheitszustand, angegeben. Dieser beschreibt die vorhandene Rest-Kapazität einer Batterie-Zelle im Vergleich zu ihrer vom Hersteller angegebenen Nominalkapazität<sup>27</sup>. Das Ende der Lebensdauer einer Batterie ist i.d.R. dann erreicht, wenn die maximale Speicherkapazität weniger als 80%, d.h. SOH < 80%, der ursprünglichen Nominalkapazität entspricht (MOTEG, 2022; Technischen Hochschule Ingolstadt, 2021). Jedoch ist die Definition der Restkapazität stark abhängig von der jeweiligen Anwendung bzw. der subjektiven Anforderung der Nutzer/-innen an die Batterie. Daher können verschiedene Auffassungen bzgl. dem Ende der Lebensdauer einer Batterie existieren. Auf dem Markt gelten Werte zwischen 75–80% als seriös (Iionknowledge, 2022).

Zurzeit kann durchschnittlich von 1'000 bis 1'500 Ladezyklen ausgegangen werden, bis eine Lithium-Ionen-Batterie das Ende ihrer Verwendung als Traktionsbatterie erreicht, also SOH < 80%. Wird das multipliziert mit der heutzutage üblichen Reichweite pro Ladezyklus von 300 km<sup>28</sup>, so ergibt das eine Lebensdauer von 300'000 bis 450'000 km (AUTO BILD, 2022; TCS, 2022). Einige Fahrzeuge mit Lithium-Ionen-Batterien können sogar eine Laufleistung von bis zu 1.5 Mio. km erbringen (Schulze, 2022). Die Nominalkapazität einer Batterie nimmt bereits ab dem ersten Zyklus kontinuierlich ab (vgl. Abbildung 26). Die Kapazitätsabnahme pro Zyklus flacht normalerweise in Abhängigkeit von der noch verbliebenen Kapazität ab, wobei mit der Zeit die Abnahmegeschwindigkeit der Nominalkapazität zunimmt.

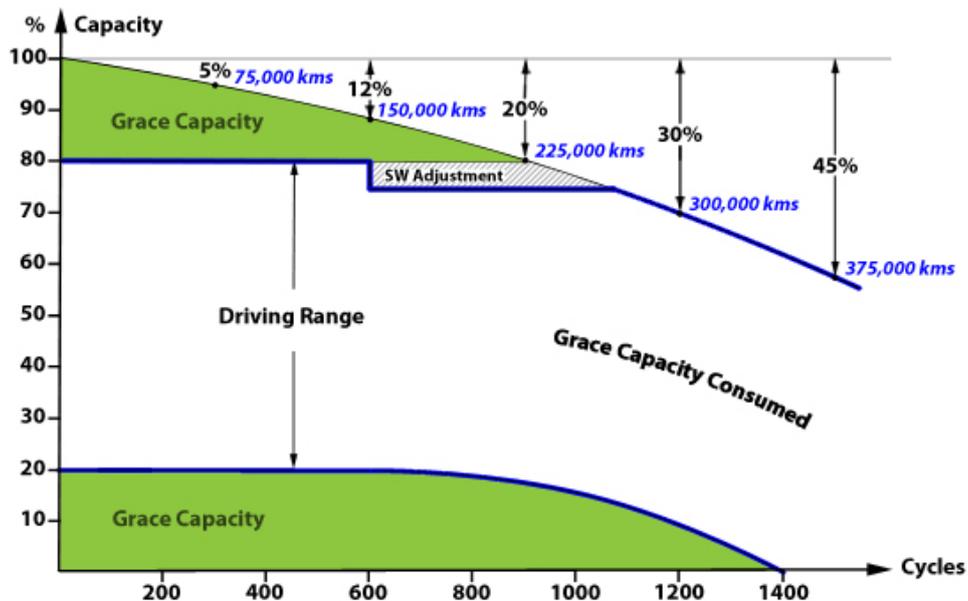


Abbildung 26: Schematische Darstellung der Nominal- und Reserve- bzw. Schonkapazität («Grace Capacity») einer Lithium-Ionen-Batterie in Abhängigkeit von erfolgten Ladezyklen (Battery University, 2019). Bemerkung: Mit «SW Adjustment» ist die Anpassung der Schonkapazität durch das Batterie-Management-System gemeint.

<sup>27</sup> Die Nominalkapazität entspricht dem Energieinhalt in kWh einer neuwertigen Lithium-Ionen-Batterie (auch Bruttokapazität genannt). Der vom Autohersteller deklarierte spezifische Energieinhalt, also die Nettokapazität, ist i.d.R. 10% bis 20% tiefer (e-mobileo, 2023; RP-Energie-Lexikon, 2022).

<sup>28</sup> Ein Ladezyklus ist abgeschlossen, wenn eine Energiemenge entladen wurde, die 100% der Nominalkapazität entspricht, wobei sie aber nicht vom selben Ladevorgang stammen muss. Beispielsweise kann 80% der Batteriekapazität an einem Tag verbraucht werden und das Elektrofahrzeug über die Nacht wieder vollständig aufgeladen werden. Wenn am nächsten Tag 20% der Batteriekapazität verbraucht werden, wurden insgesamt 100% entladen und somit ergeben die beiden Tage einen gesamten Ladezyklus.

Wird die Batterie auf nur 80% geladen und auf max. 20% der Nominalkapazität entladen, resultiert daraus eine Reichweite von 60% der Nominalkapazität. Diesen Vorgang steuert i.d.R. das Batterie-Management-System, wie es bei einem neuen Elektrofahrzeug üblich ist. Das Batterie-Management System steuert auch die Schonkapazität. Indem die Schonkapazität erhöht wird, verlängert dies die Lebensdauer der Batterie, was jedoch auch zu einer Verringerung der Fahrreichweite führt. Wenn die gesamte Schonkapazität verbraucht ist, wie in der Grafik bei 1'400 Zyklen, muss die Batterie vollständig geladen und auf das Minimum der Nominalkapazität entladen werden, um die gewohnte Reichweite zu erreichen. Dies ist der Zeitpunkt, ab dem die Verringerung der Reichweite von Jahr zu Jahr spürbar wird (Battery University, 2019; lionknowledge, 2022).

Die meisten Hersteller geben beim Kauf eines elektrisch betriebenen Fahrzeugs eine befristete Garantie auf die Batterie. Bei den meistverkauften Elektroautos liegt die Garantiedauer je nach Hersteller bei 8 bis 10 Jahren, bzw. bei 150'000 bis 200'000 km. Dies entspricht etwa 500 bis 1'000 Vollzyklen, je nach Reichweite (TCS, 2022). Die Lebensdauer von Traktionsbatterien kann jedoch stark variieren. In der Literatur gibt es derzeit keinen Konsens dazu, weil es an empirischen Daten mangelt, da sich die meisten der auf den Markt gebrachten Elektrofahrzeuge noch in ihrer Nutzungsphase befinden. In einigen Arbeiten wird die Garantiezeit von Traktionsbatterien als Richtwert für ihre Lebenserwartung verwendet, die sich je nach Hersteller auf etwa 8 bis 10 Jahre beläuft. In anderen Fällen wird die Lebenserwartung eines gegenwärtigen Verbrennerfahrzeugs von etwa 17 Jahren als Referenz verwendet. Einige Fachleute gehen davon aus, dass Batterien diese derzeitige Lebenserwartung übertreffen und mehr als 20 Jahre halten werden (siehe dazu auch Kap. 6.1). Im Rahmen des Second-Life einer Lithium-Ionen-Batterie, bspw. bei einem SOH < 80%, können noch zahlreiche Zyklen in stationären Anwendungen mit reduzierter Nominalkapazität möglich sein, z.B. als Speicheranlage für Solarstrom. Dies ist jedoch stark abhängig von der Nutzungsart bzw. den subjektiven Nutzungsansprüchen an die Batterie durch Nutzer/-innen.

### Gründe für den Alterungsprozess

Der Alterungsprozess einer Lithium-Ionen-Batterie ist abhängig von diversen Faktoren: die Art der Batterie, die verwendeten Materialien und die Bauform, die damit verbundenen Degradierungsmechanismen der verschiedenen Zellkomponenten, die Qualität des Produktionsprozesses, die Anzahl Lade- und Entladezyklen, die Art des Batterieladevorgangs und die Umgebungstemperatur (Fath, 2021; Technische Universität Ilmenau, 2022). Sehr hohe Ladezustände von mehr als 80% und sehr niedrige Ladezustände von weniger als 20% der maximalen Kapazität tragen dazu bei, den Alterungsprozess zu beschleunigen, da innerhalb der Batterie chemische Mechanismen stattfinden, die dadurch beeinträchtigt werden (Schulze, 2022).

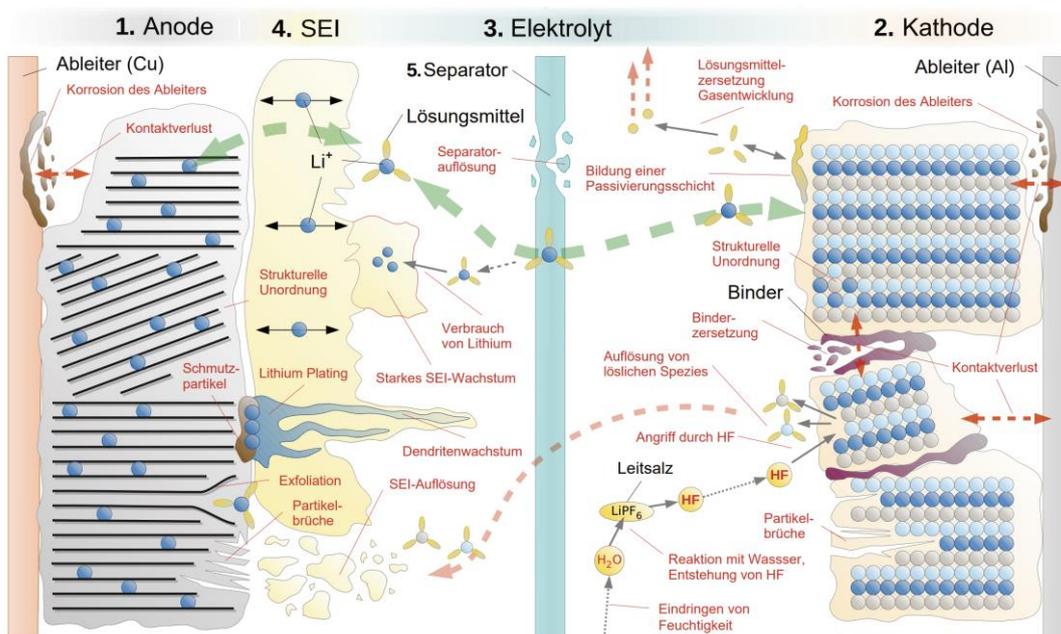


Abbildung 27: Übersicht der Alterungsmechanismen von Anode, Kathode, Separator, Elektrolyt und Zellkomponenten (Technische Universität Ilmenau, 2022). SEI: Passivierende Deckschicht an der Grenzfläche von Aktivmaterial der Anode und Elektrolyt (engl. «solid electrolyte interphase»).

Der Betrieb und die Lagerung von Lithium-Ionen-Zellen führt zu einer irreversiblen Degradierung der Zellkomponenten. Diese Alterungsmechanismen sind komplex und treten häufig gleichzeitig auf. Kommt ein flüssiger Elektrolyt mit der elektronenleitenden Oberfläche einer negativen Elektrode in Kontakt und wird die Batteriezellen geladen, entsteht eine passivierende Deckschicht an der Grenzfläche zwischen dem Aktivmaterial der Anode und dem Elektrolyten. Diese wird auch als SEI bezeichnet, aus dem Englischen «solid electrolyte interphase». Diese elektrochemischen Reaktionen führen zusammen mit der chemischen Zerstörung zu einer verringerten Batteriekapazität bzw. Gesamtleistung<sup>29</sup>. Auch die Effizienz der Batterie nimmt ab. Weitere Alterungsmechanismen der Zellkomponenten beinhalten u.a. Korrosion des Ableiters, Kontaktverluste, strukturelle Unordnung, die Separatorkorrosion, Partikelbrüche, Bildung einer Passivierungsschicht (vgl. Abbildung 27).

### **Einfluss der Schnellladungen auf den Alterungsprozess**

Schnellladen mit Gleichstrom – insbesondere ultraschnelles Laden von 150 kW bis 350 kW – kann zu einer erhöhten kalendarischen Alterung und stärkerer Gasbildung führen, was die Lebensdauer einer Batterie verkürzt (Geotab, 2020a). Massgebend sind zudem klimatische Bedingungen, wie die Umgebungstemperatur, sowie die Anzahl an Schnellladungen innerhalb einer gewissen Zeit. Viele Hersteller empfehlen, Ladestationen mit Gleichstrom nur bei Bedarf zu nutzen, um die Batterie zu schonen (Energyload, 2022; Wagner et al., 2022). Zurzeit lassen sich keine verlässlichen Aussagen treffen, wie die unterschiedlichen Ladeleistungen mit Wechselstrom, von 3.7 kW bis 43 kW, die Alterung der Batterie beeinflussen. Tendenziell wird jedoch die Aufnahmeleistung der Fahrzeuge vermehrt auf 11 kW begrenzt, was die Degradierung der Batterie minimieren dürfte<sup>30</sup>. Sogenannte Ultraschnellladesäulen können Ladeleistungen von bis zu 350 kW erreichen. Dennoch ist die effektiv nutzbare Ladeleistung vom Typ des Fahrzeuges bzw. der Batterie abhängig. Mit wachsendem Batterie-Füllstand geht eine zunehmende Erwärmung einher, wodurch die Ladegeschwindigkeit abnimmt. An Schnellladesäulen wird aus Rücksicht auf die Lebensdauer der Batterie meist nur bis 80% der Nominalkapazität, gesteuert durch das Batterie-Management-System, geladen (DMT, 2020).

Auch die Modulsteifigkeit hat einen Einfluss auf den Alterungsprozess einer Lithium-Ionen-Batterie. Während des Ladevorgangs und wegen der Alterungsmechanismen bei der Anode dehnen sich die Zellen der Batterie aus. Da die Zellen aber fest in Modulen verspannt werden, kann sich eine Batterie nur begrenzt ausdehnen. Dies kann zu einem Druckanstieg im Inneren des Moduls führen, was wiederum den Alterungsprozess der Batterie fördert (Technische Universität Ilmenau, 2022).

### **Einfluss von Vehicle-to-Grid auf den Alterungsprozess**

Vehicle-to-Grid, also «vom Fahrzeug zum Netz», wird auch als V2G bezeichnet. Diese Methode ermöglicht, dass die gespeicherte Energie in Traktionsbatterien zurück ins öffentliche Stromnetz gespeist werden kann. Somit wird die Energie der Lithium-Ionen-Batterien von Elektrofahrzeugen nicht nur für die Fahrleistung verwendet, sondern die Batterie dient auch als Zwischenspeicher für die elektrische Energie, damit diese anderweitig verwendet werden kann. Hierfür werden jedoch spezielle Ladestationen benötigt. Die bidirektionalen Ladestationen ermöglichen diesen Energiefluss in beide Richtungen: vom Stromnetz zur Traktionsbatterie und von der Traktionsbatterie zurück ins Netz. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, inwiefern dieser Ansatz die Lebensdauer der Traktionsbatterie beeinträchtigt. Einerseits würden die zusätzlichen Ladezyklen die zyklische Alterung beschleunigen. Andererseits findet V2G meistens nur wenige Minuten pro Tag statt, vorwiegend mit tieferen Ladeleistungen und in einem komfortablen Bereich des Ladezustandes zwischen 30% und 80%, was die Degradierung der Batterie in Grenzen halten sollte.

Die Auswirkungen von V2G sind grundsätzlich von der Nutzungsart und -intensität abhängig. Aktuell gibt es noch zu wenige empirische Daten, um die langfristigen Auswirkungen fundiert abschätzen zu können. Konkrete Aussagen zu V2G in Verbindung mit der Lebensdauer einer Lithium-Ionen-Batterie sind bisher mit grossen Unsicherheiten behaftet, da die Technologie noch an ihrem Anfang steht. Zwar gibt es diesbezüglich Modell- und Laborstudien, jedoch sind deren Ergebnisse bzgl. der Degradierungswirkung auf die Batterie widersprüchlich.

<sup>29</sup> P. Caliandro, Electro Mobility & Battery Degradation, e-mobile Lade Forum 2023, Zürich.

<sup>30</sup> Auch ist die Leistung von Heimpladestationen sehr oft auf 11 kW begrenzt.

### **Verlängerung der Batterie-Lebensdauer**

Folgende Massnahmen können die Lebensdauer einer Traktionsbatterie verlängern (Borgeest, 2021; FHWien, 2022; Schulze, 2022; TCS, 2022):

- Nutzung in einem Ladezustand zwischen ca. 20% und ca. 80% der angegebenen Nominalkapazität. Generell gilt, je kleiner das Fenster der Nutzung, desto besser für die Lebensdauer.
- Schnellladungen möglichst vermeiden, insbesondere dann, wenn die Batterie kalt ist.
- Fahrzeug vor mechanischer und thermischer Überbelastung schützen.

Die Temperatur hat einen relevanten Einfluss auf die Ladekapazität und somit auf die Lebensdauer einer Traktionsbatterie. Die optimale Betriebstemperatur liegt i.d.R. zwischen 25 °C und 35 °C, wobei diese Werte je nach Angaben des Batterieherstellers variieren können (Borgeest, 2021). Dieses Temperaturfenster kann durch ein sogenanntes Wärmemanagementsystem sichergestellt werden, welches wiederum durch das Batterie-Management-System gesteuert wird (FHWien, 2022). Im Kap. 5.3 wird der Einfluss der Temperatur auf die Reichweite detailliert erläutert.

### **Batterieaustausch und Occasionsmarkt**

Auch wenn der Markt von Elektroautos noch relativ jung ist, existiert bereits ein Occasionsmarkt und das Angebot an gebrauchten Elektroautos wächst. Relevant beim Kauf eines Occasion-Fahrzeugs ist v.a. der SOH der Traktionsbatterie. Die Batterie stellt ein wichtiges Bauteil im Auto dar und kann als teuerste Komponente im Fahrzeug betrachtet werden. Heutzutage existieren zahlreiche Tools bzw. Hilfsmittel für die Prüfung des SOH, deren Qualität variiert jedoch. Beim Kauf einer Occasion ist es daher wichtig, dass der SOH der Batterie vom Garagisten seriös geprüft bzw. die entsprechende Information über den Zustand der Batterie zur Verfügung gestellt wird.

Es gibt nur wenige Elektrofahrzeuge auf Schweizer Strassen, die bereits eine Lebenszeit von mehr als 10 Jahren absolviert haben. Dabei handelt es sich v.a. um die erste Generation von Elektrofahrzeugen, wie bspw. die Modelle Leaf von Nissan, i-MiEV von Mitsubishi, Model S von Tesla oder Zoe von Renault. Aus heutiger Sicht gelten die bei diesen Fahrzeugen eingesetzten Technologien als veraltet. Die Modelle der ersten Generation verfügten bei der Markteinführung über eine Reichweite von rund 100 km. Grundsätzlich kann man bei diesen Fahrzeugen davon ausgehen, dass aufgrund ihrer veralteten Technologie, kein Batterieaustausch ausserhalb der Garantie stattfinden wird. Dabei stehen die hohen Kosten des Batterieaustausches im direkten Vergleich zum niedrigen Fahrzeugwert. Diese Elektrofahrzeuge bleiben weiter im Einsatz, jedoch mit einem reduzierten SOH und daher auch mit einer limitierten Reichweite, bis sie verschrottet werden oder in den Export übergehen. Die neue Generation von Elektrofahrzeugen enthält deutlich grössere Batterien, die voraussichtlich auch nach 10 Jahren über genügend Reichweite verfügen werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass auch künftig kaum Batterieaustausche ausserhalb der Garantie stattfinden werden. Innerhalb der Garantiezeit kann es jedoch zu einem Austausch von einzelnen Modulen oder Zellen kommen.

Batterieaustausche finden v.a. im Rahmen von grossen Rückrufaktionen statt, die der Hersteller wegen Sicherheitsaspekten veranlasst, wie z.B. im Fall von Kurzschlüssen, Bränden, Defekten beim Separator oder Problemen mit der Batterieabstimmung zu Unterspannungszuständen. So stand bspw. der Batteriehersteller LG Chem im Mittelpunkt bedeutender Rückrufaktionen, u.a. für den Chevrolet Bolt und den Hyundai Kona (Aalund et al., 2021).

Bei der Motorfahrzeugkontrolle ist voraussichtlich keine Prüfung des SOH vorgesehen. Allerdings wird dem Unterboden des Elektrofahrzeugs bei der Kontrolle spezielle Beachtung geschenkt, da eine Verformung der Akkuplatte auf mechanische Schäden des Batteriegehäuses hindeuten kann. Das Thema An- und Verkauf von Elektrofahrzeugen gilt gemäss dem Auto Gewerbeverband Schweiz als komplex. Den Garagisten wird empfohlen, sich im Vorfeld eines Kaufs immer direkt beim Importeur zu vergewissern, dass die Batterie in einwandfreiem Zustand ist. Weiter können unabhängige Dienstleister wie z.B. Aviloo Battery Diagnostics als Unterstützung für Endkunden und Garagisten bzgl. dieser komplexen Thematik dienen (AGVS, 2022). In diesem Zusammenhang wird die EU-Batterieverordnung mit der Einführung des Batteriepasses inkl. QR-Code die Transparenz deutlich erhöhen (siehe auch Kap. 2.4).

### 5.3 Reichweite der Batterien

*Wie wird die Reichweite (Batterieleistung) von saisonalen Änderungen bzw. Temperaturen beeinflusst?*

#### **Einfluss der externen Temperatur auf die Batterie**

Die externe Temperatur beeinflusst die Reichweite der Elektrofahrzeuge. In der Tat kommen bei tiefen Temperaturen zwei Faktoren zusammen, die für die Traktionsbatterie ungünstig sind und dazu führen, dass Elektrofahrzeuge deutlich mehr Energie im Winter verbrauchen. Einerseits steigt bei kaltem Wetter der Energiebedarf fürs Fahren. Andererseits steigt auch die Viskosität des Elektrolyten und damit der Innenwiderstand der Batterie, wodurch die Zellspannung fällt, was wiederum den Energieinhalt der Batterie reduziert. Das verkürzt die Reichweite des Fahrzeugs und Zwischenladungen sind häufiger notwendig.

Bei einem Elektrofahrzeug beträgt der Wirkungsgrad von der Batterie zum Rad über 71% (PSI, 2022). Damit ist zwar die Fortbewegung effizient, stellt jedoch für das Beheizen des Innenraumes ein Problem dar. Die Heizleistung muss von einer elektrischen Heizung geliefert werden, was direkt die Reichweite reduziert, da die Energie hierfür aus der Antriebsbatterie entnommen wird (EMCEL, 2016). Bei Kälte ist die Spannung und damit der maximale Energieinhalt der Batterie niedriger. Weitere elektrische Verbraucher erhöhen den Energieverbrauch im Winter zusätzlich, wie z.B. Sitzheizung, Lenkradheizung, beheizbare Front- und Heckscheibe und beheizbare Aussenspiegel. Wenn die genannten elektrischen Verbraucher laufen, kommen schnell 500 Watt elektrische Leistung zusammen (ADAC, 2021). Dazu kommt noch ein ca. 4% höherer Verbrauch, da im Winter Winterpneus montiert sind (Matzer et al., 2019).

#### **Reduktion der Reichweite, reale Messungen**

Die durchschnittlichen Mehrverbräuche in der kalten Jahreszeit bewegen sich zwischen plus 10%–30% verglichen mit dem Verbrauch in warmen Jahreszeiten. Bei Minustemperaturen auf der Kurz- oder Pendlerstrecke kann der Verbrauch eines Elektroautos auch um 50% ansteigen, entsprechend sinkt die Reichweite (ADAC, 2022). Das ist darauf zurückzuführen, dass auf einer kurzen Strecke die Auswirkungen der Heizung höher sind als bei einer durchschnittlichen Fahrtlänge<sup>31</sup>. Die Heizung läuft i.d.R. auf maximaler Stufe, bis der Fahrzeuginnenraum aufgewärmt ist, und wird dann heruntergedreht. Ausserdem wird auf Kurzstrecken eher langsamer gefahren als auf längeren Strecken, was ebenfalls einen höheren Beitrag der Heizung im Vergleich zum Roll- und Luftwiderstand bedeutet.

Der norwegische Autofahrerverband führte einen breit angelegten Fahrversuch mit 20 Elektrofahrzeugen durch. Dieser ermittelte im Schnitt eine um 18.5% geringere Reichweite bei Winterbedingungen, verglichen mit den offiziellen WLTP-Messwerten. Die Bandbreite der Reduktion lag zwischen 9% und 30% (NAF, 2020). Die Messungen des ADAC zeigen, dass auf der durchschnittlichen Pendlerstrecke von 23 km und 30 Minuten der Verbrauch eines Elektroautos bei  $-7\text{ °C}$  massiv ansteigt. Im Durchschnitt resultierte ein um 50% höherer Verbrauch. Bei einer Temperatur zwischen  $14\text{ °C}$  und  $-7\text{ °C}$  verringern sich die Reichweiten somit im Durchschnitt um 30% mit einer Bandbreite von 25% bis 50% (ADAC, 2022). Im Test der American Automobile Association verringerte sich die Reichweite bei den fünf getesteten Elektrofahrzeugen im Winter bis zu 41% (AAA, 2019).

Der Energieverbrauch von Elektroautos und damit auch die Stromkosten sind bei kalten Temperaturen signifikant höher, insbesondere für Berufspendler/-innen, die kürzere Distanzen fahren. Heutige Batterien sind für Kurzstrecken häufig überdimensioniert, darum stellen die Reichweitenverluste für Pendlerstrecken kein Problem dar. Bei Plug-in-Hybriden mit kleiner Batterie könnte hingegen eine verminderte Reichweite durchaus entscheidend sein für die tägliche, elektrisch gefahrene Pendelstrecke (TCS, 2021).

Die Kälte führt also immer zu einer Reichweitenreduktion, aber auch die Hitze kann problematisch sein (vgl. Abbildung 28). Bei hohen Temperaturen erhöht die Klimaanlage den Energieverbrauch, was die Reichweite um rund 20% reduziert (Geotab, 2020b).

<sup>31</sup> Natürlich kann man auf einer Kurzstrecke auch bewusst auf die Beheizung verzichten.

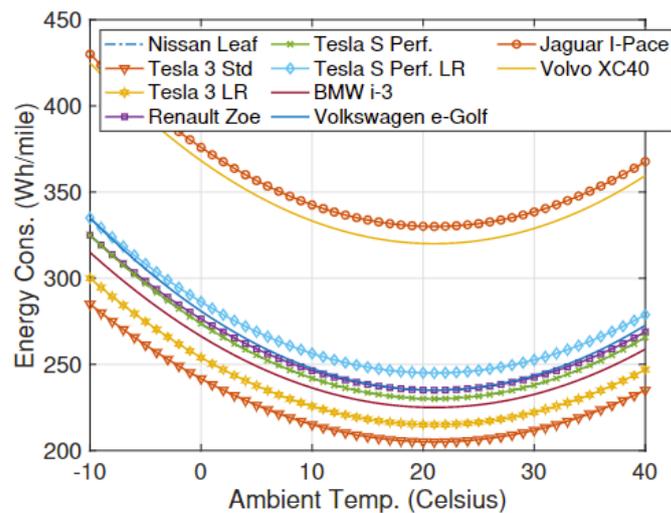


Abbildung 28: Energieverbrauch von verschiedenen Elektrofahrzeugen in Abhängigkeit mit der Temperatur (Bayram, 2021).

### Laden bei kalten Temperaturen

Die Kälte reduziert auch die Energieaufnahmefähigkeit beim Laden. Die Ergebnisse einer Studie aus den USA zeigen, dass sich die Ladegeschwindigkeit bei kalten Temperaturen erheblich verschlechtern kann (Motoaki et al., 2018). Bei einer 30-minütigen Ladung reduziert sich der SOH durchschnittlich um 22%–36%, wenn die Ladung bei kalten Temperaturen von 0 °C erfolgt, im Vergleich zu warmen Temperaturen von 25 °C. Laut einer Studie aus Finnland liegt die Ladegeschwindigkeit bei –10 °C um 15% niedriger als bei idealen 20 °C. Allerdings sind Ladekurve und Temperaturmanagement je nach Modell sehr unterschiedlich, allgemeine Aussagen sind daher weniger sinnvoll (TCS, 2021).

Beim Schnellladen reduziert das Batterie-Management-System die Ladeleistung, um die Batterie zu schonen. Der Ladevorgang dauert spürbar länger als bei warmen Temperaturen. Einige Hersteller koppeln die Akkuheizung mit dem Navigationssystem. So wird die Batterie am eingegebenen Zwischenziel «Schnellladestation» vortemperiert. Die optimale Starttemperatur liegt zwischen 20 °C und 30 °C (ADAC, 2022). Die folgenden Massnahmen dämpfen den Effekt der Kälte: das Fahrzeug rund 15 Minuten vorheizen, während es noch an der Steckdose angeschlossen ist, und in der Garage zu parken, was die Batterie vor extremem Auskühlen bewahrt. Dadurch wird der Reichweiten- und Energieverlust erheblich verringert, der sonst durch das Aufwärmen eines sehr kalten Autos entsteht. Sobald die Fahrzeugtemperatur stabil ist, verringert sich auch der Heizbedarf erheblich (ADAC, 2022).

## 5.4 Brandrisiko der Batterien

*Welche sicherheitsrelevanten Aspekte sind bei Batterien zu beachten? Wie stehen Elektrofahrzeuge im Vergleich zu Verbrennern da?*

### Elektrofahrzeuge vs. Verbrenner

Unbestritten ist, dass es bei aktuellen Lithium-Ionen-Batterien durchaus zu Bränden kommen kann. Wie hoch die Wahrscheinlichkeit eines Brandes ist, hängt von verschiedenen Faktoren ab. Es gibt Studien, die besagen, dass Fahrzeuge, die mit Lithium-Ionen-Batterien betrieben werden, weniger oft in Brand geraten als herkömmlich betriebene Fahrzeuge (Forbes, 2022):

- Der amerikanische Empfehlungsdienst AutoinsuranceEZ fasst zusammen, dass Elektrofahrzeuge seltener Feuer fangen als Verbrenner. Hingegen stehen Hybridfahrzeuge mit ca. 3'500 Bränden pro 100'000 verkaufter Hybridfahrzeuge an erster Stelle. Benzinfahrzeuge lägen mit ca. 1'500 Bränden pro 100'000 verkaufter Benzinfahrzeuge an zweiter Stelle und Elektrofahrzeuge an dritter Stelle mit nur 25 Bränden pro 100'000 verkaufter Elektrofahrzeuge. Weiter wird erwähnt, dass Elektroautos «als weniger brandgefährdet gelten», was aber nicht immer der Fall ist. Entgegen dieser Aussage soll eine Studie der Universität von Tennessee ergeben haben, dass Brände bei Elektrofahrzeugen häufiger vorkommen als bei Benzinern (AutoinsuranceEZ, 2022).
- Das Onlinemagazin Tribune de Genève hat untersucht, was die Unterschiede bzgl. Brandrisiko zwischen Benzin-, Hybrid- und reinen Elektroautos sind. Dabei zitieren sie den Versicherer Allianz Suisse, welcher zum Fazit kommt, dass «die Antriebsart keine Rolle spielt». Jedoch werden keine konkreten Zahlen genannt, die diese Aussage stützen können (TdG, 2018).
- Gemäss einer Studie aus 2017 gelten 90 Fahrzeugbrände pro Milliarde gefahrene km mit Verbrennungsmotoren als normal. Bei Elektroautos seien dies lediglich zwei Brände pro Milliarde zurückgelegter km. Allerdings sollen gemäss Swiss eMobility diese Zahlen aufgrund der schwachen Datenlage mit Vorsicht interpretiert werden (Swiss eMobility, 2020b).
- Eine dänische Studie hat Polizeidaten ausgewertet, die zwischen 2017 und 2021 erfasst worden sind. Darin sind über 100'000 Fahrzeuge verzeichnet, die in einen Unfall verwickelt waren. Der Anteil an Elektrofahrzeugen beträgt 2%. Die dänische Studie kommt zum Schluss, dass Elektrofahrzeuge, die in Unfälle verwickelt sind, häufiger in Brand geraten als herkömmlich betriebene Fahrzeuge. Allerdings kommt dieselbe Studie auch zum Schluss, dass Elektrofahrzeuge nicht weniger sicher sind als konventionelle Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor (Janstrup et al., 2022).

Allgemein sind die aktuellen Studien bzgl. Brandrisiko als nicht akkurat genug zu betrachten, da zurzeit nicht genügend aussagekräftige Daten vorhanden sind. Daher ist eine statistisch signifikante Aussage nicht möglich. Fakt jedoch ist, dass die Brandbekämpfung von Lithium-Ionen-Batterien mit herkömmlichen Methoden aktuell komplexer und ressourcenaufwändiger ist. Demnach sollte eine methodische und technische Anpassung erfolgen. Dies betrifft die Feuerwehr und andere involvierte Stellen wie Architekt/-innen, Planer/-innen von Löschsystemen und Lüftungsanlagen, etc. In Bezug auf die Hitzeentwicklung bei einem Brand kann jedoch davon ausgegangen werden, dass ein brennendes Elektroauto nicht gefährlicher ist als ein brennendes Auto mit konventionellem Antrieb (Empa, 2020; Sun, 2019). Zudem befinden sich die Traktionsbatterien in einer Phase der Weiterentwicklung bzw. sind Objekt laufender Forschung. Und mit einer zunehmenden Anzahl an elektrisch betriebenen Fahrzeugen wird der Schwerpunkt Brandsicherheit sehr wahrscheinlich weiterhin ein zentrales Element bleiben.

### Brandursachen

Das Brandrisiko einer Lithium-Ionen-Batterie ist besonders erhöht, wenn sie defekt, beschädigt, unter ungünstigen Bedingungen gelagert oder falsch verwendet wird (Marmy, 2021). Dafür verantwortlich sind i.d.R. Hardware-Probleme, die z.B. durch Qualitätsmängel bei der Herstellung oder durch mechanische Beschädigung entstehen (Aalund et al., 2021).

Im Folgenden sind spezifische Brandursachen aufgelistet und erläutert:

- Kurzschluss, hervorgerufen durch eine mechanische Beschädigung der Batterie, z.B. bei einem Unfall. Lithium-Ionen-Batterien verfügen über sehr niedrige Innenwiderstände, was im Falle eines Kurzschlusses einen Stromfluss von bis zu 20'000 Ampere zur Folge haben kann (Aigner, 2018);
- Mechanische Beschädigung: z.B. beim Transport der Batterie vom Herstellungsort zur Autofabrik;
- Mangelnde Qualität bei der Herstellung;
- Überhitzung: liegt die Temperatur im Elektrolyt über 60 °C, steigt das Risiko des sog. thermischen Durchgehens, engl. «Thermal Runaway», erheblich (Borgeest, 2021; Rutronik, 2022);
- Überladung, hervorgerufen durch Überschreitung der angegebenen Maximalspannung. Das Brandrisiko während des Ladevorgangs ist grundsätzlich erhöht (UVEK, 2020);
- Zu hohe Stromflüsse beim Laden und Entladen der Batterie, z.B. beim Schnellladen (Rutronik, 2022);
- Die vollständige Entladung der Batterie kann zu Zellschäden führen und damit zur Selbstentzündung. Daher sollte stets ein bestimmter Ladezustand – i.d.R. zwischen 40-60% der Nominalkapazität, gesteuert durch das sog. Batterie-Management-System – bei der Lagerung der Batterie aufrechterhalten werden (Borgeest, 2021; Kampker, 2014);
- Naturgefahren, wie z.B. Hochwasser. Befindet sich ein Elektrofahrzeug an einer Ladestation in einer Tiefgarage, kann dies das Risiko bzgl. tödlichen Stromstössen an Menschen sowie eines thermischen Durchgehens erhöhen (UVEK, 2020; Zürich Versicherungs-Gesellschaft AG, 2020).

Nicht unfallbedingte Brandursachen sollten dabei nicht unterschätzt werden. Diverse Vorfälle haben gezeigt, dass das Risiko bzgl. Brandgefahr erheblich erhöht ist, falls systemrelevante Fehler bei der Herstellung sowie bei den zugehörigen Komponenten, wie z.B. beim Batterie-Management-System, vorhanden sind. Das hat bereits zu grossangelegten Rückrufaktionen seitens Herstellern geführt, wo tausende von Fahrzeugen von verschiedenen Marken betroffen waren (Aalund et al., 2021).

### **Brandbekämpfung**

Brände von Lithium-Ionen-Batterien gelten aktuell als schwer löschar, u.a. aufgrund des internen Sauerstoffnachschiebs, und haben oft einen explosiven Charakter (Borgeest, 2021; Huo, 2017). Ein wesentlicher Grund für eine langanhaltende Branddauer ist das Übergehen eines Kurzschlusses innerhalb der Batterie, der von einer Batteriezelle zur nächsten übergeht, wie der Domino-Effekt. Eine weitere Schwierigkeit liegt darin, dass sich die Lithium-Ionen-Batterie meist im Unterboden des Fahrzeuges befindet, was den Zugang für Löschmittel beschränkt (Sun, 2019). Im Brandfall muss eine Batterie während längerer Zeit permanent gekühlt werden, um erneute Brandausbrüche zu verhindern. Dies wird i.d.R. mit Wasser gemacht, wobei für ein Elektroauto zwischen 3'000 und 10'000 Liter Wasser notwendig sind (Tages-Anzeiger, 2022).

### **Mögliche Brandauswirkungen**

Das Wasser, das zum Löschen verwendet wurde, muss einer Spezialbehandlung unterzogen werden, bevor es einer Abwasserreinigungsanlage zugeleitet wird (Empa, 2020). Beim Löschen kann sich aufgrund der Verwendung von Löschwasser Flusssäure bilden. Diese kann bei der Einatmung zu Verätzungen in der Lunge führen. Nach einem Brand einer Lithium-Ionen-Batterie sollte eine umfassende Brandsanierung durch Spezialisten durchgeführt werden, da grosse Mengen von Kobaltoxid, Nickeloxid und Manganoxid im Russ enthalten sind (Empa, 2020). Dies ist insbesondere wichtig für Brände in unterirdischen oder räumlich geschlossenen Anlagen, wie z.B. in Tunneln und Tiefgaragen. Brände bei Elektrofahrzeugen können hohe Temperaturen um ca. 400 °C erreichen. Weitere Gefahren bergen die giftigen Gase und schädlichen Substanzen, wie z.B. Elektrolytflüssigkeit, die freigesetzt werden (Huo, 2017; Rutronik, 2022). Je nach Bauart der Batterie, enthalten diese u.a. die Gase Benzol, Toluol, Styrol, Biphenyl, Acrolein oder Fluorwasserstoffe (Huo, 2017).

### **Möglichkeiten zur Minimierung des Brandrisikos**

Das Brandrisiko hängt stark von der Grösse und der Anzahl von Batteriezellen in einem elektrisch betriebenen Fahrzeug ab. Je mehr Batteriezellen, desto höher das Brandrisiko bzw. das Risiko eines thermischen Durchgehens (Aalund et al., 2021). Um die Gefahr eines thermischen Durchgehens einer Batterie zu minimieren, ist die mechanische und thermische Stabilität zentral. Es gibt permanent laufende Überwachungsmechanismen, wie z.B. das Batterie-Management-System, gekoppelt mit mechanischen Bauteilen,

wie z.B. einem pyrotechnischen Gleichspannungsschalter. Allerdings kann das Batterie-Management-System interne Kurzschlüsse nicht in jedem Fall erkennen und/oder behandeln (Aalund et al., 2021; Rutronik, 2022).

Ein Kühlsystem kann die Überhitzung der Lithium-Ionen-Batterie verhindern. Dies geschieht durch Luft oder durch eine Kühlflüssigkeit aus Wasser, Frostschutzmitteln und Korrosions-Inhibitoren, wie sie auch zur Kühlung von Verbrennungsmotoren eingesetzt werden (Borgeest, 2021). In einer Unfallsituation müssen Sicherheitskräfte erkennen, ob es sich um ein Fahrzeug handelt, das mit einer Lithium-Ionen-Batterie ausgestattet ist. Je schneller dies geschieht, desto geringer das Gefahrenpotential und somit das Ausmass des Schadens (Swiss eMobility, 2020b).

### **Bergen von verunfallten Elektrofahrzeugen**

Bei Pannen oder Unfällen stellen Elektrofahrzeuge die Einsatzkräfte vor neue Herausforderungen. Durch Kollisionen kann die Batterie beschädigt werden. In einem solchen Fall besteht akute Brandgefahr und das verunfallte Fahrzeug stellt ein Risiko für Mensch und Umwelt dar. Pannen- und Unfallbergungsdienste werden künftig vermehrt mit solchen Gefahren umgehen müssen. Das ASTRA hat in der Arbeitsgruppe BTVE (Bergen, Transportieren, Verwahren, Entsorgen) mitgewirkt und zusammen mit den beteiligten Organisationen einen Leitfaden erarbeitet<sup>32</sup>. Dieser soll den Pannen- und Unfallbergungsdiensten helfen, die anstehenden Aufgaben und Herausforderungen zu erkennen und entsprechende Anpassungen im Bereich Sicherheit, Schulung, Betriebsabläufe, Lagerung und Umweltschutz umzusetzen.

### **Ausblick**

Zurzeit werden in Dokumenten des Schweizerischen Verbands der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS) und des Schweizerischen Ingenieur- und Architektenvereins (SIA) konkrete Empfehlungen bezüglich Brand-sicherheit gegeben. Einheitlichen Vorgaben für den Umgang mit durch Lithium-Ionen-Batterien hervorgerufene Brandgefährdungen in solchen kritischen Infrastrukturen existieren jedoch noch nicht (UVEK, 2020). Weiter sollte eine Anpassung bzw. Weiterentwicklung aktueller Brandbekämpfungsmethoden vollzogen werden. Insbesondere Brände in Tunnels und Tiefgaragen könnten mit einer modernen Tunnellüftungsanlage sowie mittels Hochdruckwassernebelanlagen effizienter bekämpft werden (Empa, 2020).

<sup>32</sup> <https://www.astra.admin.ch/astra/de/home/themen/elektromobilitaet/leitfaden-bergen-transportieren-verwahren-entsorgen-elektrofahrzeuge.html>

## 6. End-of-Life der Batterie

### 6.1 End-of-Life der Batterien

*Was passiert mit den Altbatterien nach der Nutzung im Fahrzeug? Welche Optionen haben welche Vor- und Nachteile?*

#### **Alterung in der Erstanwendung**

Batterien altern durch natürlich auftretende chemische Reaktionen und physikalische Prozesse. Diese sog. Degradierungsprozesse führen u.a. zu einem Performanceverlust der Batterie, z.B. eine geringere Energiespeicherkapazität. Deshalb gibt es die Kenngrösse «State of Health, SOH», die den Gesundheitszustand der Batterie beschreibt. Die Autoindustrie gibt vor, dass für die Nutzung in Elektroautos nur Batterien sinnvoll sind, die einen SOH > 80% aufweisen (vgl. Kap. 5.2). In der Realität ist es jedoch ein individueller Entscheid der Nutzer/-innen, wie lange die Batterie verwendet wird. Somit definieren an erster Stelle die Nutzer/-innen subjektiv, ab welchem Zeitpunkt die Batterie das Ende ihres Lebens erreicht, also das «end-of-life». Zudem hängt die Alterung der Batterien von vielen Faktoren ab, wie z.B. Zellchemie, Batteriekapazität, Anwendungsgebiet und -weise, etc. (Canals Casals et al., 2022).

Die Lebensdauer von Traktionsbatterien kann also stark variieren. In der Literatur gibt es derzeit keinen Konsens zu dieser Frage, weil es an empirischen Daten mangelt. Die meisten der auf den Markt gebrachten Elektrofahrzeuge befinden sich noch in ihrer Nutzungsphase. In einigen Arbeiten wird die Garantiezeit von Traktionsbatterien als Richtwert für ihre Lebenserwartung verwendet. Die Garantiezeit beträgt etwa 8–10 Jahre, je nach Hersteller. In anderen Fällen wird die Lebenserwartung eines gegenwärtigen Verbrennerfahrzeugs von etwa 17 Jahren als Referenz verwendet. Einige Fachleute gehen davon aus, dass Batterien diese derzeitige Lebenserwartung übertreffen und mehr als 20 Jahre halten werden. In diesem Kapitel wird von einer Lebenserwartung von etwa 15 Jahren in der Erstanwendung ausgegangen (Aguilar Lopez et al., 2022).

#### **«Multilife» Ansatz**

Nach dem Ausbau der Traktionsbatterien aus dem Fahrzeug können verschiedene Dinge damit passieren. Einerseits kann die Batterie direkt materiell recycelt werden. Andererseits könnte die Batterie aber zunächst funktionell recycelt werden (siehe Abbildung 29). Denn bei einem modularen Aufbau der Traktionsbatterien ist es möglich, diese manuell zu öffnen. Die Module oder sogar einzelne Zellen werden auf den Gesundheitszustand überprüft und individuell nach SOH > 80% und SOH < 80% sortiert. Werden jedoch die Batterien künftig direkt in der Karosserie der Fahrzeuge integriert, kann dieser Prozess erschwert werden (vgl. Kap. 2.1).

Module, die noch einen SOH > 80% aufweisen, könnten erneut in eine Traktionsbatterie integriert werden. Unter der Annahme, dass sich die Nutzungsdauer von Elektrofahrzeugen ähnlich kurzlebig verhält wie die von Verbrennerfahrzeugen, kann davon ausgegangen werden, dass die Batterien aus der Erstnutzung in einer guten Verfassung sind, mit einem SOH > 80%. Das bedeutet auch, dass die Batterien für die Rückgabe tauglich sind. Somit können sie in mobilen oder stationären Anwendungen wiederverwendet werden (Canals Casals et al., 2022).

Module mit einem SOH < 80% könnten in stationären Anwendungen verwendet werden, z.B. als Energiespeicher für Gebäude. Denn stationäre Anwendungen erfordern weniger Strom und niedrigere Energiedichten. Zudem reichen tiefere Geschwindigkeiten beim Laden und Entladen aus. Die Module könnten so erneut ca. 10 Jahre in einer Zweitanwendung dienen (Pagliaro & Meneguzzo, 2019).

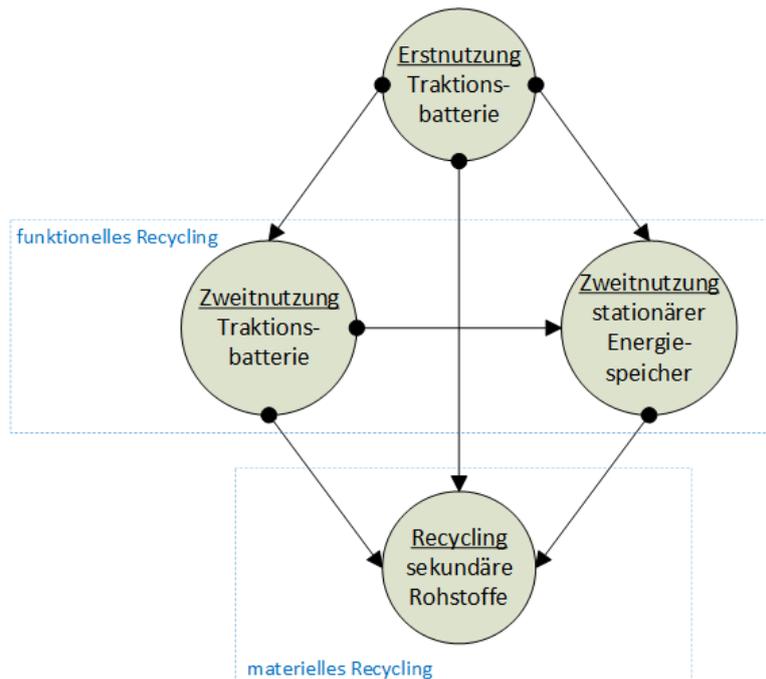


Abbildung 29: «Multilife»-Ansatz für Traktionsbatterien. Quelle: Empa.

Man spricht von einem sog. «Multilife»-Ansatz, wenn die Batterien nach dem ersten Lebenszyklus im Elektroauto, dem «1st life», einen zweiten Lebenszyklus erhalten, in einer «Zweitnutzung». Dieser «Multilife»-Ansatz schwächt die Nachfrage nach kritischen Materialien ab und ermöglicht Marktlösungen für Altbatterien aus Fahrzeugen, welche wirtschaftliches Potenzial haben. Somit ersetzen gebrauchte Batterien potenzielle neue Batterien und verringern somit deren Nachfrage. Allerdings altern die Batterien im ersten und auch im zweiten Lebenszyklus, daher wird der Kapazitätsverlust gegenüber neuen Batterien immer drastischer. Deshalb müssen schlussendlich alle Batterien irgendwann recycelt werden. Ausserdem sind neuere Batterien aufgrund des raschen Fortschritts in der Batterietechnologie, bei gleichem kritischem Materialverbrauch, leistungsfähiger als ältere Modelle. Daher kann es aus ökologischer Sicht interessanter sein, die Rohstoffe durch effizientes Recycling wiederzugewinnen, um neue Batterien herzustellen, anstatt ihre Lebensdauer zu verlängern. Die Kunst liegt also darin, den optimalen Zeitpunkt und das optimale Verfahren für das Recycling zu finden (vgl. Kap. 6.3).

### Zweitnutzung

Gebrauchte Batteriemodule nach der «1st life»-Anwendung sind auf dem Occasionsmarkt begehrt. Denn Batteriemodule und -zellen sind vielseitig einsetzbar: in grossen Anwendungen zur Netzstabilisierung oder als Speicher in Industrieanlagen, in mittelgrossen Anwendungen als Heimspeicher oder in kleineren Anwendungen als Speicher in Wohnmobilen, Golfcaddies oder Gabelstapler. Zudem sind neue Traktionsbatterien als Einzelprodukte, d.h. getrennt von einem Fahrzeug, schwer zu beschaffen. Viele Unternehmen haben sich auf solche Aktivitäten spezialisiert. Im Folgenden werden einige relevante Beispiele angeführt.

Grosse Speichercontainer mit Hilfe von Second-Life-Batterien werden bspw. durch die norwegischen Firmen Eco Stor und Hagal produziert. Durch den modularen Aufbau können 240 bis 1'000 kWh pro Container an Energiespeicherkapazität erreicht werden. Abbildung 30 zeigt einen Batteriecontainer zur Netzstabilisierung von der Firma Eco Stor, der Module von alten Traktionsbatterien enthält (EcoStor, 2023).



Abbildung 30: Der Batteriecontainer der Firma Eco Stor enthält «2nd life»-Zellen aus Traktionsbatterien (EcoStor, 2023).

Die beiden erwähnten Firmen bieten zudem Lösungen für den Heimspeicherbereich, so auch die Schweizer Firma TWICE. Zellen aus Traktionsbatterien werden hier modular mit Kapazitäten zwischen 5 kWh bis 30 kWh zusammengefasst (TWICE, 2023).



Abbildung 31: Der Heimspeicher «Hexagon» der Firma TWICE enthält ausschliesslich Second-Life-Batterien aus der Elektromobilität (TWICE, 2023).

In kleineren Anwendungen sind Zellen aus Traktionsbatterien auch bei Bastler/-innen sehr beliebt. Oft werden sie z.B. beim Umbau von Kleintransportern zu Campern als Energiespeicher mit einer PV-Anlage gekoppelt.

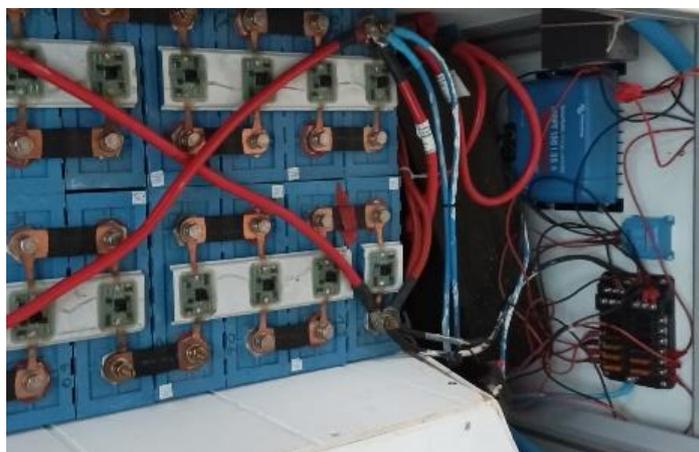


Abbildung 32: Die Zellen werden durch die PV-Anlage auf dem Dach geladen und versorgen den Camper mit Elektrizität (Quelle: eigene Fotos).

## Materielles Recycling

Nach ca. 20 Jahren Gesamtlebenszeit, inklusive einer möglichen, aber nicht notwendigen Zweitnutzung, sind die Module so gealtert, dass sie materiell recycelt werden müssen. Durch den oben erwähnten «Multilife»-Ansatz ist es möglich, noch funktionierende Batterien weiter zu verwenden und Batterien nur dann materiell zu recyceln, wenn sie ihre Funktion nicht mehr zufriedenstellend erfüllen.

Die Rücklaufmenge von ausgedienten Lithium-Ionen-Batterien wird in den kommenden Dekaden ein exponentielles Wachstum zeigen, angetrieben durch den aktuellen Boom von Elektroautos (Abbildung 33). Vergleicht man dieses Wachstum mit der Schätzung der zukünftigen Lithium-Nachfrage (siehe Abbildung 17 im Kap. 3.1), zeigt sich, dass das Batterierecycling immer wichtiger wird (Els, 2018; Reuters, 2022; Schmidt, 2017; Shahan, 2022). Denn durch Recycling können wertvolle und strategisch wichtige Materialien zurückgewonnen werden, wie z.B. Lithium, Kobalt, Graphit oder Nickel. Batterien dienen so auch als Rohstoffquelle (Barazi & Rohstoffagentur, 2022; BGR, 2021a; Cobalt Institute, 2022; Szurlies, 2021).

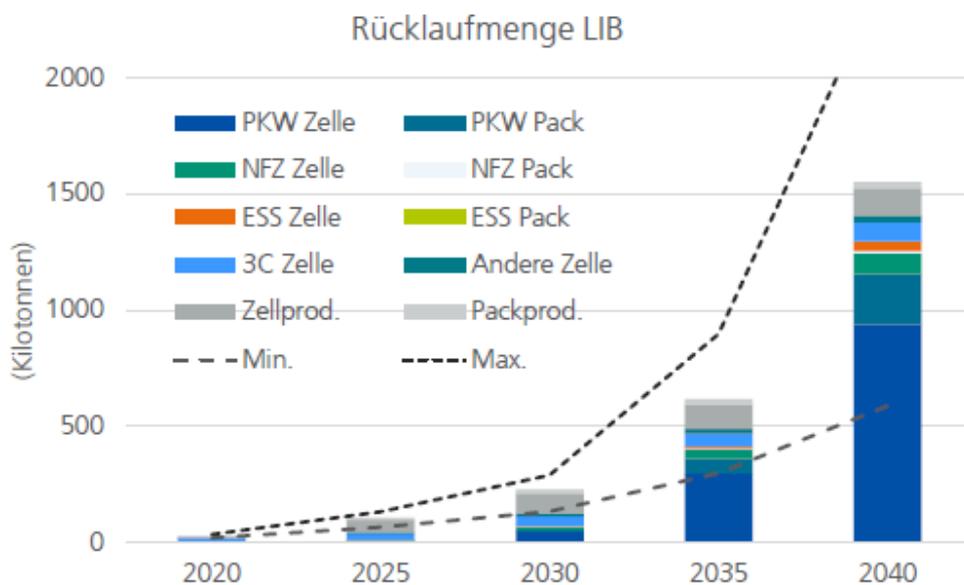


Abbildung 33: Schätzung der zukünftigen Rücklaufmenge gebrauchter Lithium-Ionen-Batterien aus unterschiedlichen Anwendungen (PKW, Nutzfahrzeuge: NFZ, stationäre Speicher: ESS, «Computing, Consumer, Communication»: 3C) und von Zellproduktionsschritten in ein europäisches Recycling. Die Balken bilden das Basis-Szenario ab (Neef et al., 2021).

## 6.2 Überblick Recycling

Was sagen die Prognosen für das Batterierecycling? Welche Materialien werden heute und in Zukunft zurückgewonnen?

### Recycling der Materialien aus Anode und Kathode

Im stofflichen Recycling können Materialien zurückgewonnen werden, was ökonomisch und ökologisch interessant ist. Dabei sind Recycling-Quoten von ca. 90% möglich, wobei fortschrittliche Firmen sogar Recycling-Quoten von 95% nennen. Das Batterierecycling kann dabei als Rohstoffquelle für wichtige Materialien wie z.B. Kupfer, Kobalt, Nickel, Mangan oder Lithium dienen (vgl. Kap. 2.1).

Die Stromkollektoren einer Batteriezelle liegen als reine Metalle vor. Bei der positiven Elektrode, also der Kathode, handelt es sich um eine Aluminiumfolie, bei der negativen Elektrode, also der Anode, um eine Kupferfolie. Beide dienen auch als Trägerfolie, d.h. die Folien werden mit dem Aktivmaterial beschichtet. Auch Graphit liegt ursprünglich in reiner Form vor. Wird das Graphit als Aktivmaterial in der Anoden verwendet, lagern sich allerdings bereits beim ersten Ladezyklus Lithium-Ionen im Graphit ein und es bilden sich Ablagerungen auf dessen Oberfläche. Teilweise wird Graphit auch als leitfähiger Zusatzstoff in der Beschichtung des Aktivmaterials hinzugefügt. Für das Aktivmaterial der Kathode gibt es zwei prominente chemische Zusammensetzungen: Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid (NMC) und Lithiumeisenphosphat (LFP). Der Ladungsträger in der Batterie ist das Lithium.

### Schätzung der künftigen Rückgewinnungsraten

Die heutigen Rückgewinnungsraten von Sekundärrohstoffen aus Traktionsbatterien sind noch klein. Einerseits sind viele Batterien noch im Umlauf und andererseits muss die Kapazität an industriellen Recyclinganlagen erst noch geschaffen werden. Aufgrund der künftigen Rücklaufmenge können Schätzungen der zukünftigen Materialrückgewinnung abgegeben werden. Diese Schätzungen beruhen auf vielen Hypothesen und können stark variieren, wie die folgenden Abbildungen zeigen. Berücksichtigt man jedoch die jüngsten und fortlaufenden Trends bei der Elektrifizierung der Flotte, ist die allgemeine Wachstumsdynamik, die in diesen Schätzungen dargestellt wird, ziemlich sicher.

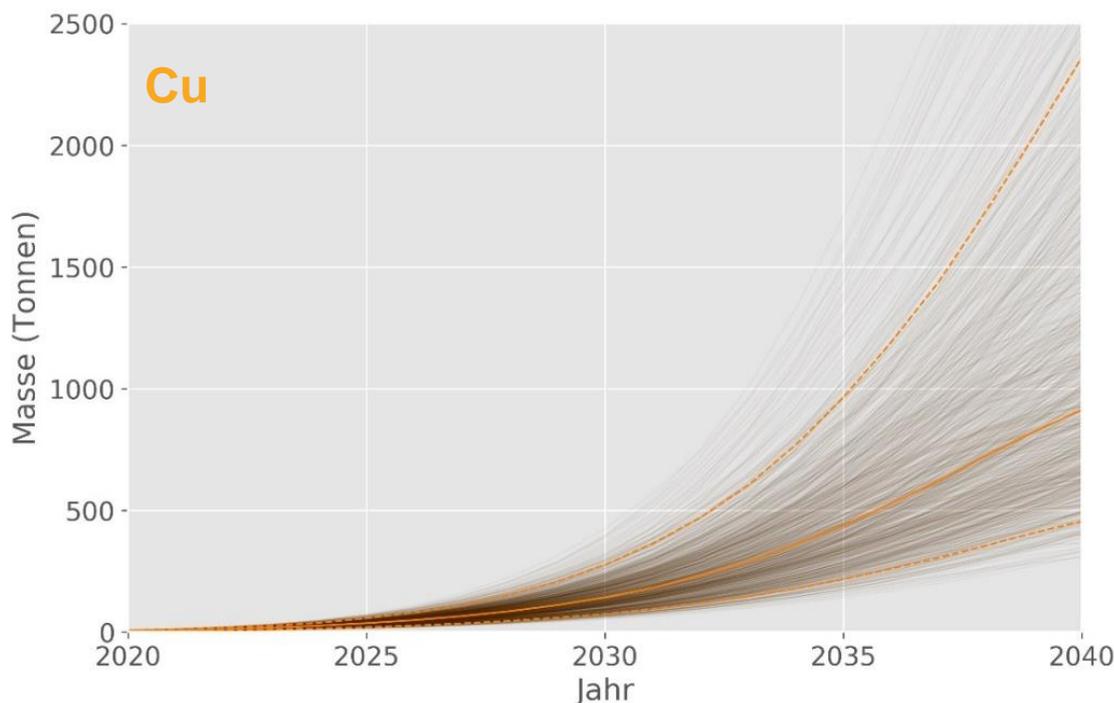


Abbildung 34: Schätzung der zukünftigen Materialrückgewinnung von Kupfer aus dem Batterierecycling in der Schweiz. Um Unsicherheiten zu berücksichtigen, wurde die Materialrückgewinnung für eine grosse Anzahl von leicht unterschiedlichen realistischen Szenarien mit einem zu diesem Zweck entwickelten Modell nach der «Monte-Carlo-Methode» berechnet. Jede Berechnung ergibt eine Schätzung der Menge an zurückgewonnenem Material (dünne Linien). Betrachtet man alle erhaltenen Ergebnisse mit einem statistischen Ansatz, wird der wahre Wert der verwerteten Materialmenge am wahrscheinlichsten zwischen den beiden gestrichelten Linien ( $+\sigma - \sigma$ ) liegen, wobei das wahrscheinlichste Ergebnis durch die ausgefüllte Linie dargestellt ist (Widmer et al., 2021)

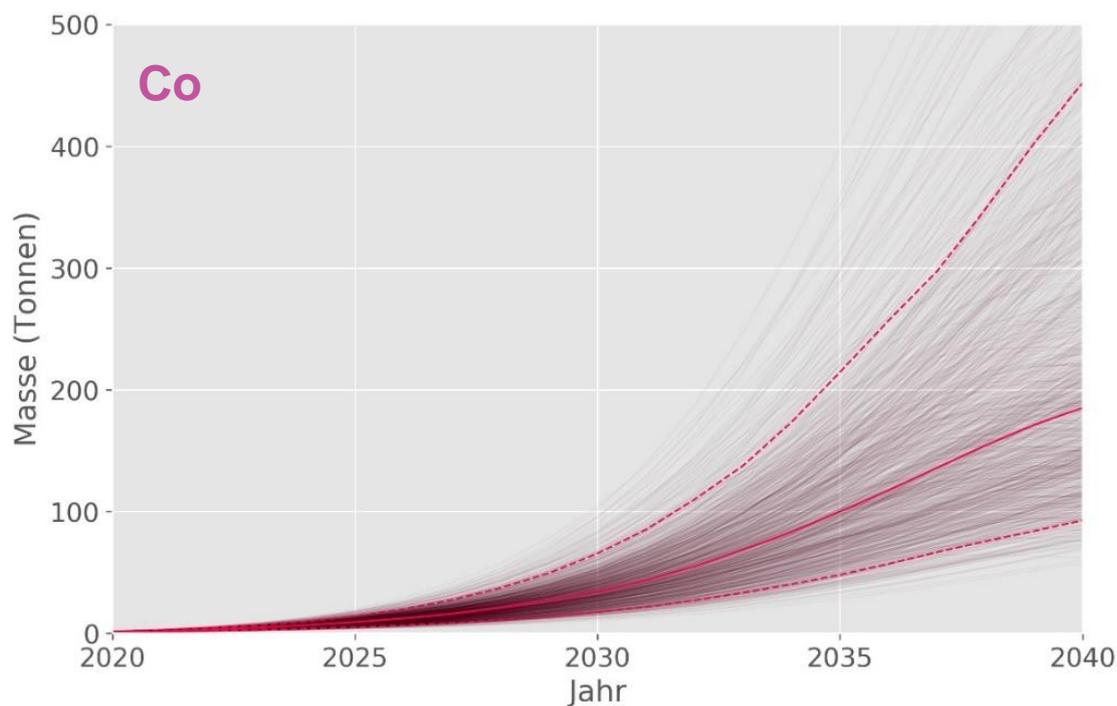


Abbildung 35: Schätzung der zukünftigen Materialrückgewinnung von Kobalt in der Schweiz aus dem Batterierecycling. Um Unsicherheiten zu berücksichtigen, wurde die Materialrückgewinnung für eine grosse Anzahl von leicht unterschiedlichen realistischen Szenarien mit einem zu diesem Zweck entwickelten Modell nach der «Monte-Carlo-Methode» berechnet. Jede Berechnung ergibt eine Schätzung für die Menge an zurückgewonnenem Material (dünne Linien). Betrachtet man alle erhaltenen Ergebnisse mit einem statistischen Ansatz, wird der wahre Wert der verwerteten Materialmenge am wahrscheinlichsten zwischen den beiden gestrichelten Linien ( $+\sigma - \sigma$ ) liegen, wobei das wahrscheinlichste Ergebnis durch die ausgefüllte Linie dargestellt ist (Widmer et al., 2021)

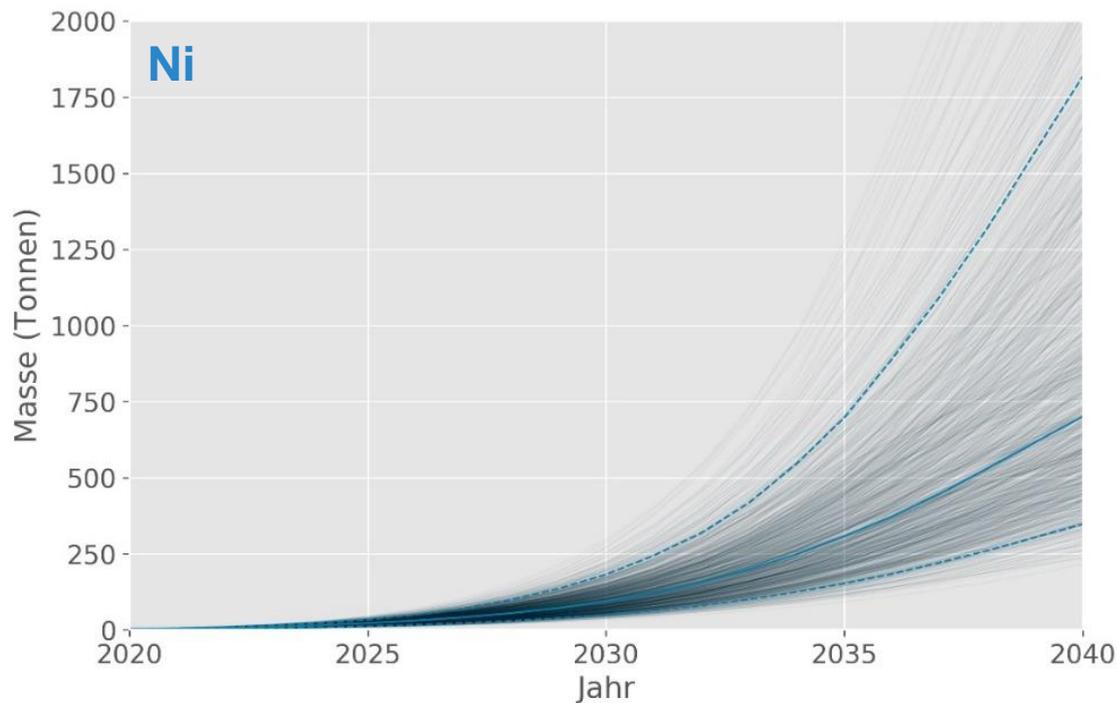


Abbildung 36: Schätzung der zukünftigen Materialrückgewinnung von Nickel in der Schweiz aus dem Batterierecycling. Um Unsicherheiten zu berücksichtigen, wurde die Materialrückgewinnung für eine grosse Anzahl von leicht unterschiedlichen realistischen Szenarien mit einem zu diesem Zweck entwickelten Modell nach der «Monte-Carlo-Methode» berechnet. Jede Berechnung ergibt eine Schätzung für die Menge an zurückgewonnenem Material (dünne Linien). Betrachtet man alle erhaltenen Ergebnisse mit einem statistischen Ansatz, wird der wahre Wert der verwerteten Materialmenge am wahrscheinlichsten zwischen den beiden gestrichelten Linien ( $+\sigma - \sigma$ ) liegen, wobei das wahrscheinlichste Ergebnis durch die ausgefüllte Linie dargestellt ist (Widmer et al., 2021)

Wie wird die Sammlung von Altbatterien in der Schweiz verwaltet? Wie hoch ist in der Schweiz der Rückgabeanteil von Batterien heute und in Zukunft? Was ist von der Gesetzgebung in der EU zu erwarten?

### Ein strikter und effizienter gesetzlicher Rahmen

In der Schweiz gibt es mit der *Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung* (ChemRRV, 2022) eine rechtliche Grundlage für die Entsorgung von Traktionsbatterien. Einerseits gibt es eine «Rücknahmepflicht». Die Händler, welche Traktionsbatterien verkaufen, müssen diese an jeder Verkaufsstelle von Konsument/-innen kostenlos zurücknehmen. Andererseits gibt es eine «Rückgabepflicht» für Konsument/-innen. Sie sind verpflichtet, ihre Traktionsbatterien entsprechend zu entsorgen. Entweder müssen sie die Batterien bei einem Händler zurückgeben, welcher der Rücknahmepflicht unterliegt, oder diese an Sammelstellen für Batterien oder bei Entsorgungsfirmen abgeben, welche über die dafür nötige Bewilligung verfügen. Jedoch ist die Traktionsbatterie für rein elektrische Fahrzeuge üblicherweise mehrere 100 kg schwer. Das macht es nahezu unmöglich, sie ausserhalb einer speziellen Anlage zu entfernen und zu entsorgen. Da Batterien wegen ihrer toxischen Inhaltsstoffe als Sonderabfall gelten (siehe Kap. 5.4), muss eine fachgerechte Entsorgung sichergestellt werden. Solange das Fahrzeug in der Schweiz entsorgt wird, ist die Wahrscheinlichkeit gering, dass eine Traktionsbatterie im falschen Entsorgungskanal landet.

### Eine Flut an ausgedienten Batterien kündigt sich an

Der Markt für elektrische Fahrzeuge, welche Antriebsbatterien erfordern, ist noch relativ jung, auch wenn die Nachfrage in den letzten 5 Jahren stark zugenommen hat. Unter Berücksichtigung dessen, dass die Lebenserwartung eines elektrischen Fahrzeugs und seiner Traktionsbatterie auf etwa 15 Jahre geschätzt wird (Restrepo et al., 2018; UK Department for Transport, 2021), bedeutet dies, dass beinahe alle Traktionsbatterien, die jemals in der Schweiz verkauft wurden, immer noch in Betrieb sind, und deshalb bisher lediglich ein kleiner Anteil entsorgt worden ist. Nur die ersten Generationen von Hybridfahrzeugen haben ihr Lebensende erreicht, wie etwa der Toyota Prius, welcher 2001 in Produktion ging (Morah, 2022; Toyota, 2022). Jedoch verfügten diese Fahrzeugen nicht über Lithium-Ionen-Batterien, sondern über Nickel-Metallhydrid-Batterien. Zudem waren diese Traktionsbatterien bezüglich Masse und Kapazität viel kleiner als die heute produzierten Batterien für gleichwertige Fahrzeuge. Erreichen Traktionsbatterien bereits jetzt das Ende ihrer Lebensdauer ist das eher auf Unfälle oder Defekte zurückzuführen, die während der Produktion oder der Nutzung entstanden sind. Die Rücknahme- und Rückgabepflichten für Traktionsbatterien müssen sich deshalb erst noch in einem grösseren Massstab bewähren. Wie aber am Beispiel von anderen Batterien in der Schweiz (Inobat, 2021) gezeigt wird, ermöglicht das bestehende System hohe Sammelraten und ist damit effizient.

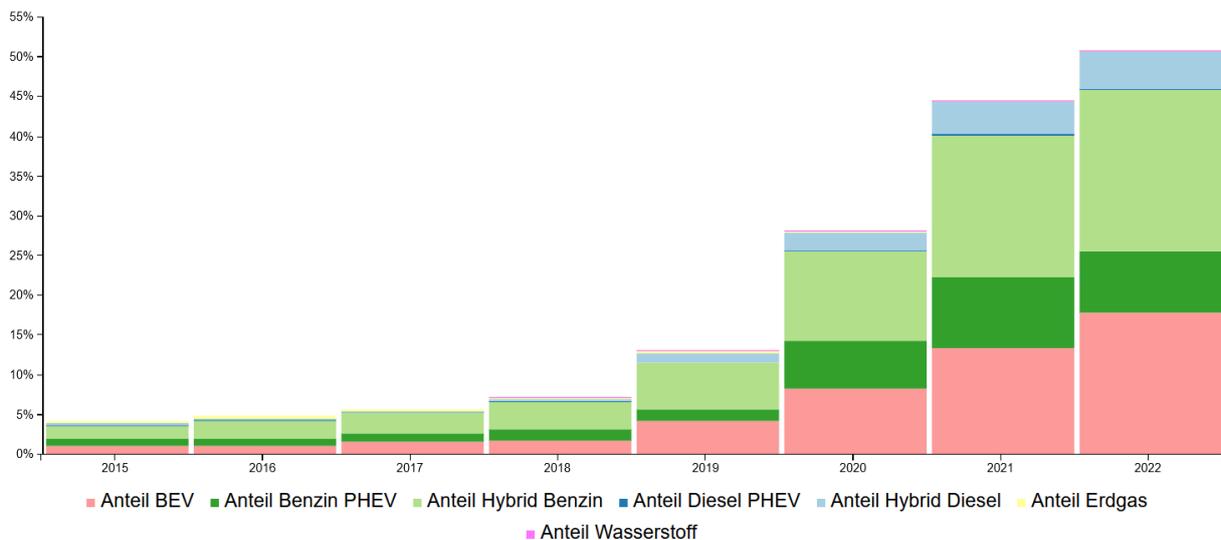


Abbildung 37: Neuzulassungen von Personenwagen mit elektrischem Antrieb und Traktionsbatterien in der Schweiz (BFE, 2023).

Es ist zu erwarten, dass die rasante Elektrifizierung der Fahrzeugflotte auch in Zukunft weiter voranschreitet (Schreyer & Morlier, 2022; Swiss eMobility, 2020a). Viele Fahrzeughersteller, besonders in Europa, haben bereits angekündigt, in der nahen Zukunft nur noch rein elektrische Fahrzeuge zu produzieren (Wietlisbach, 2022). Dies bedeutet nicht nur, dass mehr Batterien im Umlauf sein werden, sondern auch grössere, da rein elektrische Fahrzeuge solche erfordern. Als Folge davon werden Menge und Masse an Traktionsbatterien zunehmen, welche für das Recycling bestimmt sind, ähnlich wie die Kurve der auf den Markt gebrachten Elektrofahrzeuge, allerdings mit einer Verzögerung von etwa 15 Jahren. Sobald die gesamte Fahrzeugflotte elektrifiziert ist, wird sich die jährliche Menge an Traktionsbatterien, welche in der Schweiz rezykliert werden, stabilisieren. Dies wird, wenn überhaupt, nicht vor 2060 der Fall sein. Allerdings gibt es noch grosse Unsicherheiten in der Voraussage dieser Entwicklung (Widmer et al., 2021).

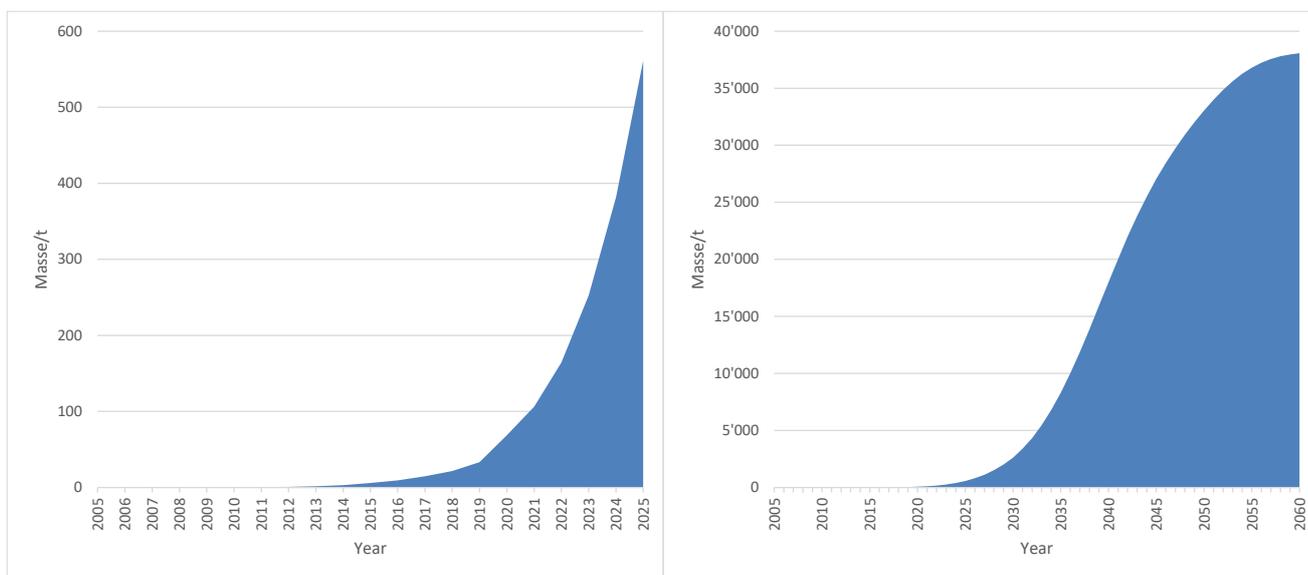


Abbildung 38: Erwartete Recyclingströme von Lithium-Ionen-Batterien in der Schweiz bis 2025 (links) und bis 2060 (rechts) (Widmer et al., 2021).

### Fahrzeugexport bedeutet Batterieexport

Die meisten der in der Schweiz benutzten Traktionsbatterien werden an deren Lebensende wahrscheinlich nicht in der Schweiz entsorgt. Am Ende ihrer Nutzungsphase werden heute ungefähr 80% der Fahrzeuge in der Schweiz als Gebrauchtwagen exportiert (BAZG, 2022) und deshalb auch in anderen Ländern entsorgt. Bei rund 20% der Fahrzeuge in der Schweiz, die sich am Ende ihrer Nutzungsphase befinden, ist deren Verbleib unbekannt. Entweder sind die Fahrzeuge illegal exportiert worden oder sie werden von Personen, Garagen oder Autoschreddern gelagert (SARS, 2022).

Dies bedeutet, dass in der Schweiz rund 80% der Fahrzeuge am Ende ihrer Nutzungsphase im Ausland rezykliert oder weiterbenutzt werden. Unter diesen ist der Anteil an Elektrofahrzeugen aktuell noch sehr klein, geschätzt rund 0.5%. Es wird aber erwartet, dass er in naher Zukunft bedeutend höher sein wird, bei ca. 6% im Jahr 2030 und rund 60% im Jahr 2040 (Marmy, 2022b, 2022a). Mit jedem aus der Schweiz exportierten Elektrofahrzeug wird auch eine Traktionsbatterie exportiert. Daher wird ihre Entsorgung nicht mehr durch schweizerische Institutionen kontrolliert bzw. überwacht, sondern erfolgt gemäss den geltenden Gesetzen und Praktiken des jeweiligen Landes. Somit kann nicht garantiert werden, dass diese Traktionsbatterien am Ende ihrer Lebensdauer rezykliert werden.

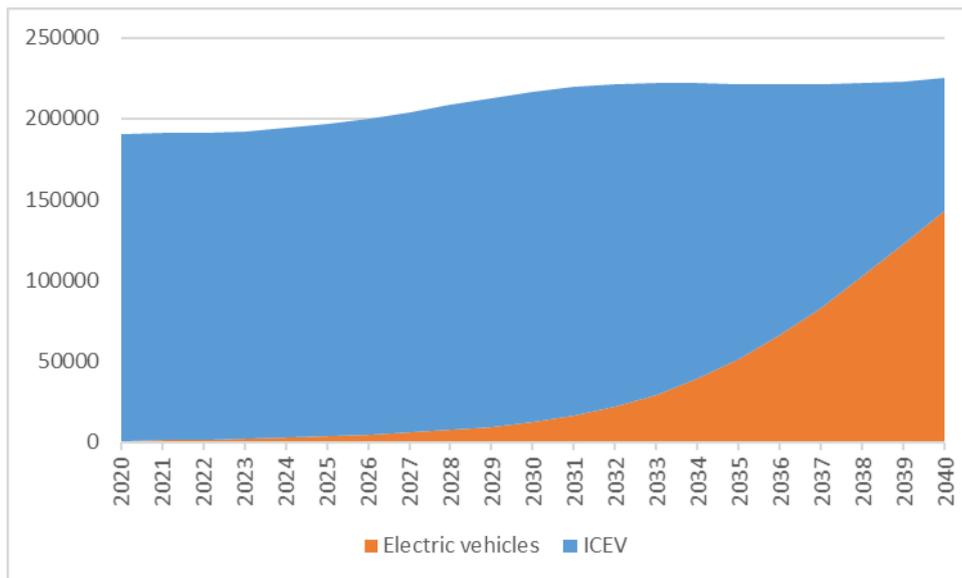


Abbildung 39: Erwartete Anzahl Fahrzeuge, die aus der Schweiz exportiert werden, gemäss Szenario der Empa, entwickelt im Auftrag vom BAFU (Løvik et al., 2020; Marmy, 2022b).

### Ähnliche Situation in der EU

Die meisten Fahrzeuge aus der Schweiz werden in die Europäische Union exportiert. Dort gelten für die Sammlung von ausgedienten Batterien ähnliche Regelungen wie in der Schweiz, mit einigen Unterschieden je nach Mitgliedsstaat. Übergreifend gilt die *Richtlinie 2006/66/EG* des Europäischen Parlaments und des Rates über Batterien und Akkumulatoren sowie Altbatterien und Altakkumulatoren, auch «Batterie-Richtlinie» genannt. Die Richtlinie wurde am 1. Dezember 2009 in nationales Recht umgesetzt, durch das Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Batterien und Akkumulatoren (European Parliament, 2006). Die Europäische Kommission entwickelt derzeit eine neue EU-Batterierichtlinie, deren Inkraftsetzung für das Jahr 2024 geplant ist, um diese an die sich verändernden Marktbedingungen anzupassen (European Parliament, 2022; Widmer et al., 2021). Insbesondere müssen die Mitgliedstaaten sicherstellen, dass die Hersteller von Traktionsbatterien für deren Rücknahme von den Endnutzer/-innen Systeme einrichten. Stammen diese von privaten, nichtkommerziellen Fahrzeugen, müssen solche Systeme für Endnutzer kostenlos sein und dürfen keine Verpflichtung beinhalten, eine neue Batterie zu kaufen. Hingegen gibt es keine Rückgabepflicht wie in der entsprechenden Schweizerischen Verordnung. Für mehr Details zur europäischen Gesetzgebung siehe Kap. 2.4.

### 6.3 Recyclingprozesse und -verfahren

*Welche Recyclingprozesse und -verfahren sind vorhanden und wie ausgereift sind sie?*

Erreichen Lithium-Ionen-Batterien aus Elektroautos ihr Lebensende, sollte geprüft werden, ob eine Zweitnutzung, z. B. als PV-Speicher, möglich oder sinnvoll ist. Batterien werden rezykliert, um wertvolle Materialien zurückzugewinnen und den Bedarf an Primärrohstoffen zu verkleinern. Das Recycling von Altbatterien ist in der Schweiz und in vielen anderen Ländern rechtlich vorgeschrieben (INOBAT, 2022b). In den vergangenen Jahren wurden verschiedene Verfahren entwickelt, welche mithilfe unterschiedlicher Prozesse die Bestandteile von Lithium-Ionen-Batterien aufschlüsseln und in Materialfraktionen separieren. Ein Teil dieser Fraktionen wird anschliessend wieder in der Batterieproduktion eingesetzt. Der Rest wird für die Herstellung anderer Güter genutzt. Das ist jedoch davon abhängig, zu welcher Art die recycelten Lithium-Ionen-Batterien gehören, nach Modell, Baujahr, Kathodenchemie, Grösse, Casing, etc. Auch die eingesetzten Recyclingverfahren sowie die Marktsituation sind relevant zur Bestimmung in welcher Anwendung Sekundärrohstoffe verwendet werden (Neef et al., 2021).

#### **Recyclingprozesse für Lithium-Ionen-Batterien**

Recyclingprozesse werden eingesetzt, um Materialien in einzelne Fraktionen zu separieren und anschliessend Zielstoffe zu konzentrieren und zurückzugewinnen. Um dies zu erreichen, bedient man sich verschiedener Materialeigenschaften der Zielstoffe, wie Dichte, Schmelzpunkt, Ausfällungsverhalten, etc. Grundsätzlich können Lithium-Ionen-Batterien thermisch, mechanisch oder chemisch aufbereitet werden (Zheng et al., 2018).

##### *Thermische Aufbereitung*

Bei der thermischen Aufbereitung werden Lithium-Ionen-Batterien unter hohem Energieaufwand eingeschmolzen und in verschiedene Metallfraktionen separiert. In der Schweiz bildet dieser pyrometallurgische Prozess die Grundlage für das Recycling von herkömmlichen Gerätebatterien (BATREC, 2022). Traktionsbatterien können in diesem Prozess als Ganzes aufgegeben werden, was einen hohen Durchsatz und eine breite Anwendung ermöglicht. Kupfer, Kobalt, Mangan und Nickel werden zurückgewonnen, während Graphit, Kunststoffe und Elektrolyt verbrennen. Aluminium und Lithium landen in der Schlacke des Schmelzofens und können nicht zurückgewonnen werden.

##### *Mechanische Aufbereitung*

Bei der mechanischen Aufbereitung werden Lithium-Ionen-Batterien in ihre einzelnen Komponenten zerlegt. Spezifisch auf einzelne Batterietypen abgestimmte Prozesse erlauben eine Trennung der Materialien ohne grossen Energieaufwand. Batteriezellen werden abgewickelt oder anderweitig manuell bzw. semiautomatisch auseinandergenommen. Solche spezialisierten Prozesse erlauben momentan jedoch nur einen kleinen Durchsatz. In grösserem Massstab werden Lithium-Ionen-Batterien zunächst geschreddert und die Aktivmaterialien von den Elektroden getrennt. Daraufhin werden diese mithilfe von Sieben und Magneten in einzelne Materialfraktionen aufgeteilt. Eine dieser Fraktionen ist die Schwarzmasse, ein Gemisch aus den Aktivmaterialien, welche anschliessend nasschemisch aufbereitet werden muss. Kupfer und Aluminium hingegen lassen sich mit diesem Prozess einfach zurückgewinnen.

##### *Chemische Aufbereitung*

In der chemischen Aufbereitung von Lithium-Ionen-Batterien werden Zielstoffe aus der Schwarzmasse mittels Säuerungs- und Fällungsreaktionen zurückgewonnen. Dieser hydrometallurgische Prozess benötigt verschiedene Zusatzchemikalien. Bestandteile der Aktivmaterialien wie Kobalt, Nickel, Mangan, Graphit und Lithium werden dabei als Sulfate, Carbonate oder Hydroxide zurückgewonnen. Voraussetzung für die chemische Aufbereitung ist ein vorbereitender Aufbereitungsprozess.

## Etablierte und geplante Recyclingverfahren in der Schweiz und in Europa

Die heute angewandten Verfahren kombinieren die oben vorgestellten Prozesse auf vielfältige Weise, um möglichst viele Ausgangsstoffe der Lithium-Ionen-Batterien möglichst rein zurückzugewinnen. Die meisten Verfahren beginnen mit der Kontrolle und Entladung der Lithium-Ionen-Batterien, die aus Elektrofahrzeugen stammen. Die Traktionsbatterien werden hierzu in Salzwasser getaucht, wodurch eine leitende Verbindung zwischen den Elektroden entsteht. Alternativ können sie auch über eine Entladestation direkt entladen werden. Die dabei zurückgewonnene Elektrizität kann direkt im Recyclingverfahren genutzt werden (W. Wang & Wu, 2017; Zheng et al., 2018). Anschliessend wird das Batteriegehäuse zumeist manuell geöffnet. Die darin enthaltenen Batteriemodule sind dann das Eingangsmaterial, das in die verschiedenen Recyclingprozesse von Lithium-Ionen-Batterien einfließt. Gehäuse, Verkabelung und die Komponenten des Batterie-Management-Systems werden dem Stahl- bzw. Elektroschrottreycling zugeführt.

### Schweiz

In der Recyclingbranche hat sich für Lithium-Ionen-Batterien bis heute kein eindeutiges Verfahren herauskristallisiert, welches als Stand der Technik bezeichnet werden könnte. Besonders im Trend scheinen momentan Verfahren zu sein, welche Lithium-Ionen-Batterien zunächst mechanisch aufbereiten und die dabei entstehende Schwarzmasse anschliessend hydrometallurgisch behandeln (Abbildung 40). In der Schweiz hat sich die Batretec AG im Batterierecycling etabliert. Sie verfährt nach diesem Vorgehen, wobei das Schreddergut für die chemische Aufbereitung momentan noch nach Frankreich exportiert wird (INOBAT, 2022a). Auch die Schweizer Librec AG, welche sich zukünftig auf das Recycling von Traktionsbatterien aus Elektroautos fokussieren will, plant in einer neuen Anlage ein solches Verfahren (LIBREC, 2022). Vergleichbare mechanisch-chemische Aufbereitungsverfahren von Traktionsbatterien erreichten in Bilanzierungen Rückgewinnungsraten im Bereich von 90% (Duesenfeld, 2022). Die Kyburz Switzerland AG rezykliert ihre eigenen Batterien rein mechanisch. Die Anordnung aus Kathode, Anode und Separator wird dabei zunächst abgewickelt. Anschliessend trennt ein Wasserbad das Aktivmaterial sortenrein von der jeweiligen Elektrode. Die Rückgewinnungsrate liegt bei 91% (KYBURZ, 2022).

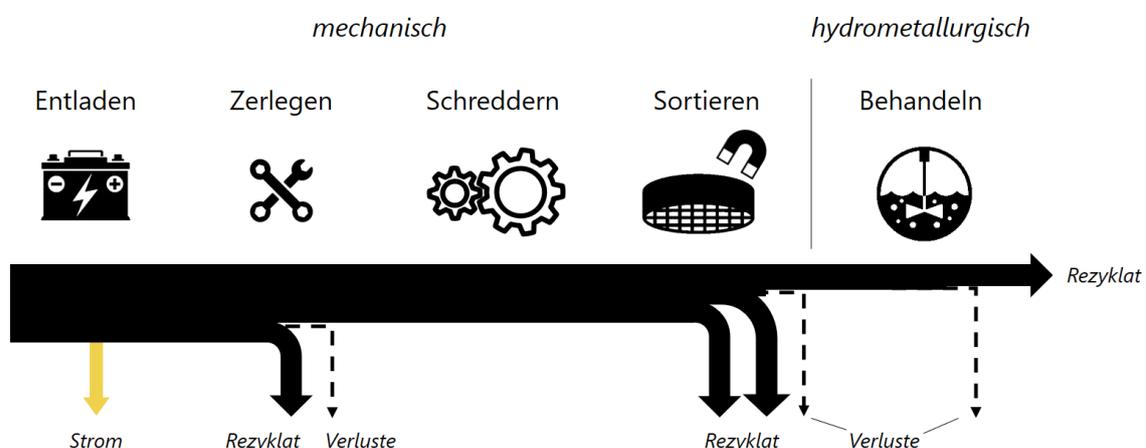


Abbildung 40: Schematische Darstellung der typischen Schritte eines mechanisch-hydrometallurgischen Recyclingverfahrens von Lithium-Ionen-Batterien (eigene Darstellung).

### Europa

Die Firma Umicore in Belgien verwendet eine Kombination von pyro- und hydrometallurgischen Prozessen, um Batterien zu rezyklieren (Umicore, 2022). Lithium-Ionen-Batterien aus Elektroautos werden vorgängig in einzelne Module zerlegt, ohne dass dabei Schredder zum Einsatz kommen. Kobalt, Kupfer und Nickel werden zu über 95% zurückgewonnen. Die deutsche ACCUREC Recycling GmbH wiederum verwendet eine Kombination aus mechanischer und thermischer Aufbereitung für das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien (Accurec, 2022).

In ganz Europa planen Unternehmen zurzeit den Aufbau von Recyclinganlagen für Lithium-Ionen-Batterien (vgl. Abbildung 41). Die nächsten Jahre werden hierbei zeigen, welches Verfahren sich in grösserem Massstab durchsetzen kann. Die Vielfalt von bereits bestehenden Recyclinglösungen mit hohen Rückgewinnraten lässt aber allgemein hoffnungsvoll in die Zukunft blicken.

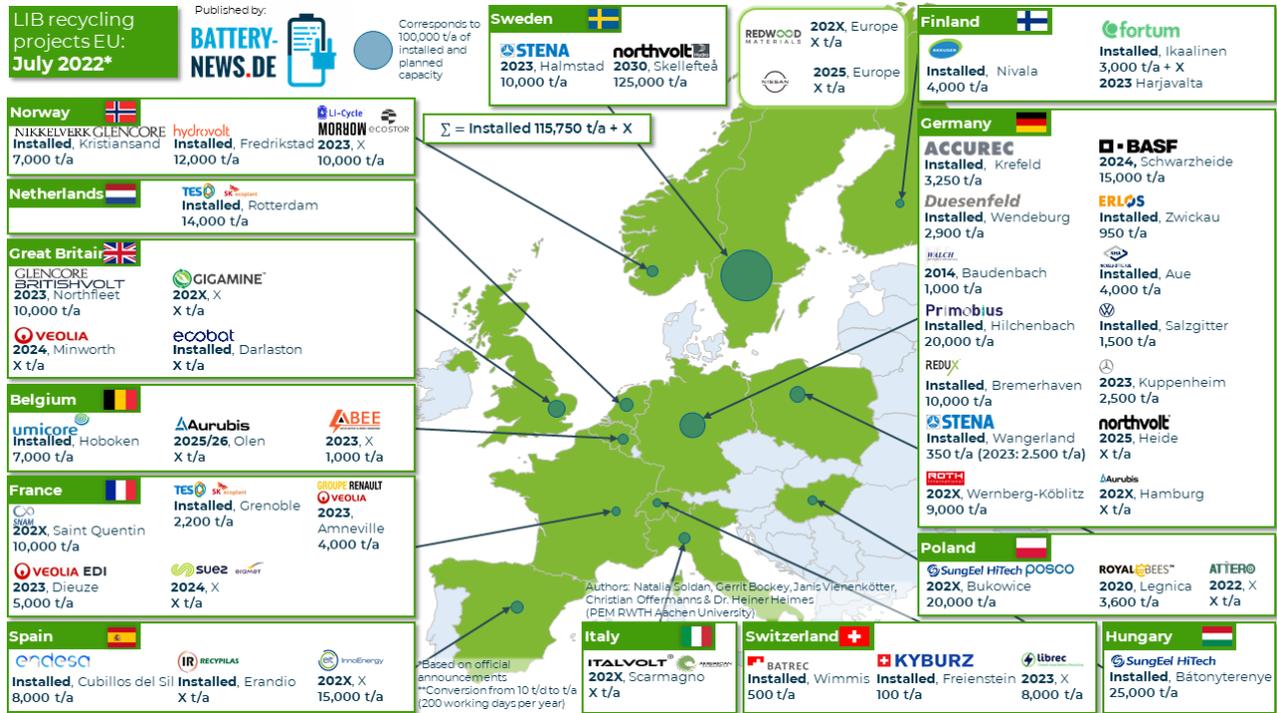


Abbildung 41: Installierte und geplante Anlagen für das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien in Europa (Bockey, 2022).

## 6.4 Wirtschaftliche Aspekte des Recyclings

*Was sind Kosten bzw. Rentabilität von Recycling? Wie ist Recycling finanziert? Welche Rolle spielt eine vorgezogene Recyclinggebühr? Ist es aus wirtschaftlicher Sicht sinnvoll, die einzelnen Komponenten auseinanderzunehmen?*

In der Schweiz ist das Recycling von Traktionsbatterien derzeit nicht profitabel. Diese Lage kann sich aber je nach Rohstoffpreisen und weiteren Faktoren wie Fahrzeugmarkt oder Recyclingtechnologie schnell ändern (Widmer et al., 2021). Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Anforderungen an das Recycling zu hohen Kosten führen. Dazu gehören z.B. strikte Überwachung, hohe Sicherheitsanforderungen sowie Gesundheits- und Umweltvorschriften. Somit übersteigen die Kosten momentan die Einnahmen des Recyclings. Ausserdem sind die Kosten für den Abbau von Primärrohstoffen in der Regel niedriger. Aus diesem Grund ist ein Finanzierungssystem erforderlich, welches die Differenz deckt.

### Finanzierungssystem

In der Schweiz definiert die *Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung* (ChemRRV, 2022) den Rahmen für die Finanzierung des Recyclings von Batterien, einschliesslich Traktionsbatterien. Gemäss der ChemRRV beauftragt das Bundesamt für Umwelt BAFU eine geeignete private Organisation, aktuell Inobat. Diese übernimmt die Erhebung, die Verwaltung und die Verwendung einer obligatorischen vorgezogenen Entsorgungsgebühr (VEG) (Inobat, 2021). Unter bestimmten Bedingungen kann die Finanzierung des Recyclings durch Systeme auf Branchenebene durchgeführt werden. In jedem Fall überwacht aber Inobat die Batterien, welche in der Schweiz in Verkehr gebracht werden. Dazu muss jeder Händler Inobat Daten zum Inverkehrbringen zur Verfügung stellen, wie z.B. Mengen, Batterietyp und Schadstoffgehalt. Inobat hat zudem die Aufgabe, die Öffentlichkeit über das Batterierecycling zu informieren.

Die Finanzierung erfolgt über das Prinzip einer obligatorischen vorgezogenen Entsorgungsgebühr (VEG) für alle Batterien, seien sie in Geräte eingebettet oder auch nicht. Das Geld fliesst in einen Fonds, der die Sammlung, den Transport und die Verwertung von Batterien finanziert. Die Gelder aus dem Fonds dienen auch für die Finanzierung von Informationen sowie von eigenen Tätigkeiten der privaten Organisation, die im Rahmen des Auftrags des BAFU erfolgen (ChemRRV, 2022).

Sofern eine Branche die Sammlung und die Entsorgung ihrer alten Batterien kollektiv organisieren, verwalten und finanzieren kann, kann sie bei Inobat eine Befreiung von der Gebührenpflicht beantragen. Um eine solche Ausnahmegewilligung zu erhalten, muss die Branche beweisen, dass das von ihr vorgeschlagene System die gesamte Branche umfasst, alle Entsorgungs- und Recyclingkosten abdeckt und umweltverträglich ist (ChemRRV, 2022). Ein solcher Ansatz kann von Vorteil sein, wenn eine Branche dazu in der Lage ist, ein System auf die Beine zu stellen, das billiger und besser auf ihre Bedürfnisse ausgerichtet ist. Die Branche muss dann die Finanzierung organisieren, indem sie einen fakultativen vorgezogenen Recyclingbeitrag (VRB) einfordert für jede bei ihren Mitgliedern in Verkehr gebrachte Batterie (SARS, 2022; Widmer et al., 2021).

### Recyclingkosten

Die Kosten des Recyclings werden durch die folgenden vier Aktivitäten bestimmt: Sammlung und Aufbereitung, Behandlung, Logistik und Betrieb des Recyclingsystems.

#### *Sammlung und Aufbereitung*

Traktionsbatterien erreichen das Ende ihrer Lebensdauer und werden rezykliert, weil sie beschädigt oder nicht mehr genug leistungsfähig sind, um ihre Funktion zu erfüllen. Wie in Kap. 5.4 besprochen, können alte oder beschädigte Batterien ein Brandrisiko darstellen oder sehr gefährliche Chemikalien wie Fluorwasserstoff freisetzen. Deshalb müssen sie sehr sorgfältig und spezifisch behandelt werden. Bspw. muss eine Batterie vor einer weiteren Behandlung mit spezifischen und sicheren Methoden entladen werden (Groux, 2018; W. Wang & Wu, 2017). Anschliessend muss sie gemäss spezifischer Vorgaben gelagert

werden. Diese Aktivitäten beinhalten intensive manuelle Arbeit und erfordern spezifische Sicherheitsmassnahmen. Folglich machen sie einen wichtigen, kaum veränderbaren Anteil an den Gesamtkosten aus.

### *Behandlung*

Wie in Kap. 6.2 beschrieben, müssen ausgediente Batterien einer speziellen Behandlung unterzogen werden, um die darin enthaltenen Materialien zurückzugewinnen. Es gibt verschiedene Recyclingtechnologien, welche eine Vielzahl von Prozessen kombinieren, wie z.B. mechanisches Schreddern von Batterien vs. Zerlegung in ihre Hauptkomponenten (für die Batteriezusammensetzung siehe Kap. 2.1), mechanische Sortierung des Schredderoutputs sowie chemische, hydrometallurgische und pyrometallurgische Aufbereitungsprozesse. Diese Prozesse führen jeweils zu unterschiedlichen Ergebnissen. Die Zerlegung von Batterien in ihre Komponenten bspw. erzeugt, im Vergleich zum Schreddern, hochwertigere Outputs und führt nur zu sehr geringen Verlusten. Pyrometallurgische Prozesse wiederum erlauben es nicht, Lithium zurückzugewinnen, während dies mit hydrometallurgischen Prozessen sehr wohl möglich ist (Christmann et al., 2015; Ekberg & Petranikova, 2015, S. 7; Groux, 2018).

Gleichzeitig erfordern diese Prozesse unterschiedliche Inputs. Die Zerlegung von Batterien erfolgt häufig manuell und erfordert mehr Zeit pro Einheit als beim Schreddern. Pyrometallurgische Prozesse sind sehr energieintensiv, während hydrometallurgische Prozesse bedeutende Mengen Chemikalien erfordern, mit denen fachgerecht umgegangen werden muss. Ferner erzeugen einige Technologien Abfälle, welche nicht zurückgewonnen werden können und die, wenn sie gefährlich sind, in spezialisierten Anlagen entsorgt werden müssen, wie z.B. der Elektrolyt in Batterien. All diese Aspekte haben einen signifikanten Einfluss sowohl auf die Betriebskosten wie auch die Einnahmen, welche durch die erzeugten Sekundärrohstoffe generiert werden können. Zudem finden solche Prozesse in industriellen Einrichtungen statt, welche Land, Arbeit und Gebäude erfordern. Die Entwicklung dieser Technologien bedarf weiterer industrieller Innovationen, welche wiederum mit bedeutenden Investitionen verbunden sind (Groux, 2018).

Die Gesamtkosten für die Behandlung können abhängig vom Marktpreis für Energie und Chemikalien variieren, sind aber generell vergleichsweise stabil und vorhersehbar. Sie hängen auch stark von der Menge behandelter Batterien ab, da mechanische und chemische industrielle Prozesse sehr stark von Skaleneffekten profitieren können (X. Wang et al., 2014).

### *Logistik*

Das Recycling von ausgedienten Traktionsbatterien erfordert ihren Transport vom Ort, wo sie das Ende ihrer Lebensdauer erreichen, z.B. von einer Garage oder dem Unfallort, zu den Behandlungsanlagen. Da ausgediente Batterien in der Schweizerischen Gesetzgebung als Sonderabfall gelten, erfordert ihr Transport spezielle Massnahmen, welche noch strenger für beschädigte oder defekte Batterien sind. Diese beinhalten Spezialverpackungen, spezifische Sicherheitsausrüstung in den Fahrzeugen, welche die Batterien transportieren, Spezialbewilligungen für Firmen, welche diese Arbeit ausführen, oder eine spezielle Ausbildung der Fahrer/-innen. Die speziellen Massnahmen bedeuten auch zusätzliche Kosten, welche jedoch einerseits zumeist fix und vorhersehbar sind, und andererseits nur einen kleinen Teil der Gesamtkosten ausmachen (SDR, 2021; ADR, 2022).

### *Systemkosten*

Wie bereits beschrieben, erfordert das Recycling von Batterien auch eine Verwaltung und administrative Arbeiten, sei es durch Inobat oder eine Branchenlösung. Der Betrieb eines Recyclingsystems beinhaltet u.a. auch die Erstellung von Recyclingverträgen mit Partnern und die Administration der vorgezogenen Entsorgungsgebühr (VEG) bzw. des vorgezogenen Recyclingbeitrags (VRB) in einem entsprechenden Fonds. Dazu besteht auch die Verpflichtung, rezyklierte Batterien nachzuverfolgen (Inobat, 2021; SENS Swico, 2022).

### **Erlöse aus dem Recycling**

Einnahmen aus dem Recycling von Traktionsbatterien werden durch den Verkauf von Sekundärrohstoffen aus der Behandlung der ausgedienten Batterien generiert. Um diese Einnahmen zu maximieren, müssen über den gesamten Recyclingprozess Verluste minimiert und die Qualität des Outputs maximiert werden. Wie in Kap. 6.1 gezeigt, können verschiedene Metalle und andere Materialien zurückgewonnen werden, darunter einige vergleichsweise wertvolle. Der Verkaufspreis hängt jedoch auch vom Marktwert ab, welcher über die Zeit stark schwanken kann. Bspw. hat der Kobaltpreis, ein essenzielles Metall für die meisten eingesetzten Batterietypen, in den letzten fünf Jahren zwischen unter 30'000 und über 90'000 USD pro Tonne geschwankt. Ähnlich beim Lithiumcarbonat, ein Vorläufermaterial für die Produktion von Lithium für Traktionsbatterien, welches Mitte 2020 für 50'000 CNY pro Tonne, umgerechnet ca. 7'000 USD, verkauft wurde und im Oktober 2022 einen Preis von 550'000 CNY pro Tonne, ca. 75'000 USD, erreicht hat (Tradingeconomics, 2022a, 2022b).

Entsprechend sind die Einnahmen aus dem Recycling sehr dynamisch und unvorhersehbar. Steigt der Preis von Batteriematerialien in Zukunft weiter, etwa infolge einer steigenden Nachfrage nach Traktionsbatterien für die Elektromobilität, könnte das Recycling in Zukunft profitabel werden.

### **Ausblick**

Mit zunehmenden Mengen von zu rezyklierenden Batterien und der Anpassung des gesamten Sektors der elektrischen Mobilität, ist zu erwarten, dass die Recyclingkosten mit der Zeit aufgrund von Skaleneffekten abnehmen. Wie sich die künftigen Einnahmen entwickeln, ist schwer vorauszusagen, da sie vom Marktwert der produzierten Sekundärrohstoffe abhängen. Sofern die Elektrifizierung der Fahrzeugflotte weiter fortschreitet, ist zu erwarten, dass die Nachfrage nach solchen Materialien und mit ihr die Marktpreise steigen, wodurch auch die Einnahmen aus dem Recycling zunehmen.

## 7. Literaturverzeichnis

- AAA. (2019). *AAA Electric Vehicle Range Testing*. American Automobile Association.
- Aalund, R., Diao, W., Kong, L., & Pecht, M. (2021). *Understanding the Non-Collision Related Battery Safety Risks in Electric Vehicles a Case Study in Electric Vehicle Recalls and the LG Chem Battery* (S. 6). IEEE.
- Abdel-Shafy, H. I., & Mansour, M. S. M. (2016). *A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: Source, environmental impact, effect on human health and remediation*. Water Research & Pollution Control Department, National Research Center, Tahreer Street (El-Behous St.), Dokki, Cairo, Egypt.
- Accurec. (2022). *Lithium – Accurec Recycling GmbH*. <https://accurec.de/lithium>
- ADAC. (2021). *Stromverbrauch von Sitzheizung und Co.: Wie hoch ist er tatsächlich?* <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/ausstattung-technik-zubehoer/ausstattung/sitzheizung-verbrauch/>
- ADAC. (2022). *Elektroauto im Winter: Wenn die Reichweite schwindet...* <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/info/elektroauto-reichweite-winter/>
- Adeola, A. O., Akingboye, A. S., Ore, O. T., Oluawjana, O. A., & Adewole, A. H. (2021). *Crude oil exploration in Africa: Socio-economic implications, environmental impacts, and mitigation strategies*. Department of Chemical Sciences, Adekunle Ajasin University, 001 Akungba-Akoko.
- Agora Verkehrswende. (2021). *Batteriestandort auf Klimakurs. Perspektiven einer klimaneutralen Batterieproduktion für Elektromobilität in Deutschland*.
- Aguilar Lopez, F., Billy, R. G., & Müller, D. B. (2022). A product–component framework for modeling stock dynamics and its application for electric vehicles and lithium-ion batteries. *Journal of Industrial Ecology*, 26(5), 1605–1615. <https://doi.org/10.1111/jiec.13316>
- AGVS. (2022). *Darauf müssen Garagisten achten*. Auto Gewerbe Verband Schweiz. <https://www.agvs-upsa.ch/de/news/news-archiv/darauf-muessen-garagisten-achten>
- Albeck-Ripka, L. (2020, Juni 11). Mining Firm Plans to Destroy Indigenous Australian Sites, Despite Outcry. *The New York Times*. <https://www.nytimes.com/2020/06/11/world/australia/indigenous-caves-BHP-mining.html>
- Althaus, H. J., Duschmalé, J., & Fries, N. (2015). *Cleantech Ressourcenstrategie*. Foundation for global sustainability. [www.swisscleantech.ch/Ressourcenstrategie](http://www.swisscleantech.ch/Ressourcenstrategie) DOI: 10.13140/RG.2.1.2651.752
- Althaus, H.-J., & Classen, M. (2004). *Life Cycle Inventories of Metals and Methodological Aspects of Inventorying Material Resources in ecoinvent (7 pp)*. Empa - Materials Science and Technology.
- AT. (2021). *Lösungen zur Graphitrundung für Lithium-Ionen-Batterien*. AT Mineral Processing. [https://www.at-minerals.com/de/artikel/at\\_Loesungen\\_zur\\_Graphitrundung\\_fuer\\_Lithium-Ionen-Batterien\\_3695669.html](https://www.at-minerals.com/de/artikel/at_Loesungen_zur_Graphitrundung_fuer_Lithium-Ionen-Batterien_3695669.html)
- AUTO BILD. (2022). *So weit ist die Entwicklung der E-Auto-Akkutechnik mittlerweile*. <https://www.auto-bild.de/artikel/elektroauto-batterie-akku-tauschen-co2-abdruck-kosten-recycling-16202315.html#159553903>
- AutoinsuranceEZ. (2022). *Gas vs. Electric Car Fires [2022 Findings]*. AutoinsuranceEZ. <https://www.auto-insuranceez.com/gas-vs-electric-car-fires/?nowprocket=1>
- autoschweiz. (2022). *Auto-Markt im April: Logistik- und Lieferprobleme schlagen durch*.
- BAFU. (2023). *Umweltauswirkungen von Personenwagen mit verschiedenen Antriebssystemen. Gegenwart (2021) und Zukunftsszenarien (bis 2050). Fachbericht des Bundesamtes für Umwelt BAFU*. Bundesamt für Umwelt.
- Bamana, G., Miller, J. D., Young, S. L., & Dunn, J. B. (2021). *Addressing the social life cycle inventory analysis data gap: Insights from a case study of cobalt mining in the Democratic Republic of the Congo*. Department of Anthropology, Normandale Community College, Bloomington.
- Banza Lubaba Nkulu, C., Casas, L., Haufroid, V., De Putter, T., Saenen, N. D., Kayembe-Kitenge, T., Musa Obadia, P., Kyanika Wa Mukoma, D., Lunda Ilunga, J.-M., Nawrot, T. S., Luboya Numbi, O., Smolders, E., & Nemery, B. (2018). Sustainability of artisanal mining of cobalt in DR Congo. *Nature Sustainability*, 1(9), 495–504. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0139-4>

- Barazi, S. A., & Rohstoffagentur, D. (2022, November 3). *Battery Raw Materials – Outlook for Demand and Supply in Europe*. Future Battery Forum, Berlin.
- Barron, M. G., Vivian, D. N., Heintz, R. A., & Yim, U. H. (2020). *Long-Term Ecological Impacts from Oil Spills: Comparison of Exxon Valdez, Hebei Spirit, and Deepwater Horizon*. U.S. Environmental Protection Agency, Gulf Breeze, Florida.
- BATREC. (2022). Batterie-Recycling. *Batrec Industrie*. <https://batrec.ch/de/batterie-recycling/>
- Battery University. (2019). *BU-1003a: Battery Aging in an Electric Vehicle (EV)*. <https://batteryuniversity.com/article/bu-1003a-battery-aging-in-an-electric-vehicle-ev>
- Bayram, S. (2021). *Impacts of Electric Vehicle Charging under Cold Weather on Power Networks*. Department of Electronic and Electrical Engineering University of Strathclyde.
- BAZG, B. für Z. und G. (2022). *Aussenhandelsstatistik*. <https://www.bazg.admin.ch/bazg/de/home/themen/schweizerische-aussenhandelsstatistik.html>
- Benchmark Mineral Intelligence. (2019). *EV Battery Arms Race Enters New Gear with 115 Megafactories, Europe Sees Most Rapid Growth*. Benchmark Mineral Intelligence. <https://www.benchmarkminerals.com/ev-battery-arms-race-enters-new-gear-with-115-megafactories-europe-sees-most-rapid-growth/>
- Beyer, J., Goksoyr, A., Hjermann, D. O., & Klungsoyr, J. (2020). *Environmental effects of offshore produced water discharges: A review focused on the Norwegian continental shelf*. Norwegian Institute for Water Research (NIVA), Oslo.
- BFS, & ARE. (2017). *Verkehrsverhalten der Bevölkerung—Ergebnisse des Mikrozensus Mobilität und Verkehr 2015*. Bundesamt für Statistik (BFS), Bundesamt für Raumentwicklung (ARE).
- BGR. (2017). *Kobalt aus der DR Kongo—Potenziale, Risiken und Bedeutung für den Kobaltmarkt*. [https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Commodity\\_Top\\_News/Rohstoffwirtschaft/53\\_kobalt-aus-der-dr-kongo.html](https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Commodity_Top_News/Rohstoffwirtschaft/53_kobalt-aus-der-dr-kongo.html)
- BGR. (2019). *Mangan—Rohstoffwirtschaftliche Steckbriefe* [Steckbrief]. BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.
- BGR. (2021a). *Kobalt—Informationen zur Nachhaltigkeit*. BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.
- BGR. (2021b). *Nickel—Informationen zur Nachhaltigkeit*. BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.
- BHRRC. (2022). *Transition Minerals Tracker*. Business & Human Rights Resource Centre. <https://www.business-humanrights.org/en/from-us/transition-minerals-tracker/>
- Bhutada, G. (2022a). *Breaking Down the Cost of an EV Battery Cell*. Elements by Visual Capitalist. <https://elements.visualcapitalist.com/breaking-down-the-cost-of-an-ev-battery-cell/>
- Bhutada, G. (2022b, Mai 2). *The Key Minerals in an EV Battery*. Elements by Visual Capitalist. <https://elements.visualcapitalist.com/the-key-minerals-in-an-ev-battery/>
- Bloomberg Hyperdrive. (2022). *The Cobalt Crisis That Wasn't*. Bloomberg L.P.
- BloombergNEF. (2022a). *Electric Car Battery Bottlenecks Have a Way of Being Worked Out*.
- BloombergNEF. (2022b). *Race to net zero: Pressures of the battery boom in five charts*. BloombergNEF.
- Bockey, G. (2022, Juli 8). Batterie-Recycling in Europa (Stand: Juli 2022). *Battery-News.de*. <https://battery-news.de/index.php/2022/07/08/batterie-recycling-in-europa-stand-juli-2022/>
- Borgeest, K. (2021). *Elektronik in der Fahrzeugtechnik* (4.). Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-23664-9>
- Brancaccio, G., & Deflorio, F. P. (2021). *Extracting travel patterns from floating car data to identify electric mobility needs: A case study in a metropolitan area*. DIATI - Department of Environment, Land and Infrastructure Engineering, Politecnico di Torino.
- Brot für alle, Fastenopfer, VCS. (2020). *Die Batterie: Knackpunkt der Elektromobilität. Soziale und ökologische Herstellungsbedingungen unter der Lupe* (S. 25).

- Buchholz, P. (2021). *Ressourcensicherung – nationale Strategie und globale Verantwortung*. Heidelberg University Publishing. <https://heiup.uni-heidelberg.de/journals/index.php/generale/article/view/24413/18275>
- Canals Casals, L., Etxandi-Santolaya, M., Bibiloni-Mulet, P. A., Corchero, C., & Trilla, L. (2022). Electric Vehicle Battery Health Expected at End of Life in the Upcoming Years Based on UK Data. *Batteries*, 8(10), Art. 10. <https://doi.org/10.3390/batteries8100164>
- Chordia, M., Nordelöf, A., & Ellingsen, L. A.-W. (2021). *Environmental life cycle implications of upscaling lithium-ion battery production*. Division of Environmental Systems Analysis, Chalmers University of Technology, Institute of Transport Economics.
- Christmann, P., Gloaguen, E., Labbé, J.-F., Melleton, J., & Piantone, P. (2015). Chapter 1—Global Lithium Resources and Sustainability Issues. In A. Chagnes & J. Światowska (Hrsg.), *Lithium Process Chemistry* (S. 1–40). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801417-2.00001-3>
- CleanTechnica. (2022). *Top 10 Automobiles in Switzerland*. <https://cleantechnica.com/2022/10/05/tesla-model-y-is-best-selling-automobile-in-switzerland-in-2022-tesla-model-3-is-3rd-best/>
- Cobalt Institute. (2022). *Cobalt Market Report 2021*.
- Conde, M. (2017). Resistance to Mining. A Review. *Ecological Economics*, 132, 80–90. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.08.025>
- Cordes, E. E., Jones, D. O. B., Schlacher, T. A., Amon, D. J., Bernardino, A. F., & Brooke, S. (2016). *Environmental Impacts of the Deep-Water Oil and Gas Industry: A Review to Guide Management Strategies*. Department of Biology, Temple University, Philadelphia, PA.
- Council of European Union. (2023). *Outcome of Proceeding concerning 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—Document No. 5469/23*. <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-5469-2023-INIT/en/pdf>
- Cox, B., Bauer, C., Beltran, A. M., van Vuuren, D. P., & Mutel, C. L. (2020). *Life cycle environmental and cost comparison of current and future passenger cars under different energy scenarios*. PSI Switzerland, INFRAS, ICTA Spain, PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, Copernicus Institute of Sustainable Development Netherlands.
- Cox, B., Mutel, C. L., Bauer, C., Beltran, A. M., & van Vuuren, D. P. (2018). *Uncertain Environmental Footprint of Current and Future Battery Electric Vehicles*. Paul Scherrer Institut Laboratory for Energy Systems Analysis PSI, Leiden University Institute of Environmental Sciences (CML), PBL Netherlands Environmental Assessment Agency.
- Crenna, E., Gauch, M., Widmer, R., Wäger, P., & Hischier, R. (2021). *Towards more flexibility and transparency in life cycle inventories for Lithium-ion batteries*. Technology & Society Laboratory, Empa.
- Dai, Q., Kelly, J. C., Dunn, J., & Benavides, P. T. (2018). *Update of Bill-of-materials and Cathode Materials Production for Lithium-ion Batteries in the GREET Model*. Argonne National Laboratory.
- Dai, Q., Kelly, J. C., & Elgowainy, A. (2018). *Cobalt Life Cycle Analysis Update for the GREET Model*. Argonne National Laboratory.
- Dai, Q., Kelly, J. C., Gaines, L., & Wang, M. (2019). *Life Cycle Analysis of Lithium-Ion Batteries for Automotive Applications*. Systems Assessment Group, Energy Systems Division, Argonne National Laboratory, DuPage County, Argonne.
- DMT. (2020). *E-Auto-Glossar: Von Akkumulator bis Wechselstrom*. Puls Online Magazin. <https://www.dmt-puls.de/news/e-auto-glossar-von-akkumulator-bis-wechselstrom/>
- Duesenfeld. (2022). *Geringer Energieaufwand und höchste Rückgewinnungsraten*. <https://www.duesenfeld.com/recycling.html>
- E+Z. (2020). *Privatisiert und ausgetrocknet*. Entwicklung und Zusammenarbeit. <https://www.dandc.eu/de/article/chile-leidet-wegen-der-klimakrise-unter-dramatischem-wassermangel>
- earthlink. (2022). *40 000 Kinder quälen sich in kongolesischen Kobaltminen*. aktiv gegen Kinderarbeit. <https://www.aktiv-gegen-kinderarbeit.de/2022/09/40-000-kinder-quaelen-sich-in-kongolesischen-kobaltminen/>

- ECGA. (2018). *Towards CO2 neutrality due to carbon and graphite*. European Carbon and Graphite Association.
- EcoStor, 2023. (2023). *ECO STOR | Second life*. <https://www.eco-stor.com/solutions/second-life>
- EJAtlas. (2022). *EJAtlas*. <http://www.envjustice.org/ejatlas/>
- Ekberg, C., & Petranikova, M. (2015). Chapter 7—Lithium Batteries Recycling. In A. Chagnes & J. Świątowska (Hrsg.), *Lithium Process Chemistry* (S. 233–267). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801417-2.00007-4>
- electrive. (2022). *Wie Europa als Produktionsstandort für Batterien aufholt*. <https://www.electrive.net/2022/09/16/wie-europa-als-produktionsstandort-fuer-batterien-aufholt/>
- Elektroauto-News. (2022). *Deutsches Lithium-Projekt in Bolivien vor dem Neustart?* Elektroauto-News.net. <https://www.elektroauto-news.net/2021/deutsches-lithium-projekt-in-bolivien-vor-dem-neustart>
- Ellingsen, L. A.-W., Majeau-Bettez, G., Singh, B., Srivastava, A. K., Valøen, L. O., & Hammer Strømman, A. (2014). *Life cycle assessment of a lithium-ion battery vehicle pack*. Department of Energy and Process Engineering Norwegian University of Science and Technology.
- Els, F. (2018, Dezember 1). The lithium price bulls were right. *MINING.COM*. <https://www.mining.com/lithium-price-bulls-right/>
- EMCEL. (2016). *Heizung im Elektrofahrzeug: Warum nimmt die Reichweite im Winter ab?* <https://emcel.com/de/heizung-im-elektrofahrzeug/>
- e-mobileo. (2023). *E-Auto Batterie: Unterschied zwischen Brutto- und Nettokapazität*. <https://www.e-mobileo.de/e-auto-akku-brutto-vs-nettokapazitaet/#:~:text=Die%20Bruttokapazit%C3%A4t%20bezieht%20sich%20immer,ist%20also%20die%20Netto%2DKapazit%C3%A4t.>
- Empa. (2020). *Wie gefährlich sind brennende Elektroautos? Brandversuch im Tunnel*. Empa - Materials Science and Technology. <https://www.empa.ch/web/s604/brandversuch-elektroauto>
- Energyload. (2022). *Verkürzt Schnellladen die Lebensdauer der Elektroauto-Batterie?* <https://energyload.eu/elektromobilitaet/elektroauto/schnellladen-lebensdauer-elektroauto-batterie/>
- EPA. (2003). *Environmental Impact of the Petroleum Industry* (Environmental Update #12). Environmental Protection Agency (USA). [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjSwrnLiqH7AhX-wAIHSHHBuwQFnoECAs-QAQ&url=https%3A%2F%2Fcfpub.epa.gov%2Fncer\\_abstracts%2Findex.cfm%2Ffuseaction%2Fdisplay.files%2FfileID%2F14522&usg=AOvVaw3vgIrlSfRAXYdifq7WnNfG](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjSwrnLiqH7AhX-wAIHSHHBuwQFnoECAs-QAQ&url=https%3A%2F%2Fcfpub.epa.gov%2Fncer_abstracts%2Findex.cfm%2Ffuseaction%2Fdisplay.files%2FfileID%2F14522&usg=AOvVaw3vgIrlSfRAXYdifq7WnNfG)
- Europäische Kommission. (2010). *Critical raw materials for the EU. Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials*.
- European Commission. (2021). *BERICHT DER KOMMISSION AN DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT, DEN RAT, DEN EUROPÄISCHEN WIRTSCHAFTS- UND SOZIALAUSSCHUSS UND DEN AUSSCHUSS DER REGIONEN über die Umsetzung der EU-Jugendstrategie (2019&#8211;2021)* (Website COM/2021/636 final). Publications Office of the European Union. <http://op.europa.eu/de/publication-detail/-/publication/cd7e8978-2cd9-11ec-bd8e-01aa75ed71a1/language-de>
- European Parliament, EP, CONSIL, 266 OJ L (2006). <http://data.europa.eu/eli/dir/2006/66/oj/eng>
- European Parliament. (2022). *A new EU regulatory framework for batteries*. [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi-2ubwhpX7AhUCif0HHbz0B-QQFnoECBAQAw&url=https%3A%2F%2Fwww.europarl.europa.eu%2FRegData%2Fetudes%2FA-TAG%2F2022%2F729285%2FEPRS\\_ATA\(2022\)729285\\_EN.pdf&usg=AOvVaw2mpqm1Jx8Si47EnMqbUsGC](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi-2ubwhpX7AhUCif0HHbz0B-QQFnoECBAQAw&url=https%3A%2F%2Fwww.europarl.europa.eu%2FRegData%2Fetudes%2FA-TAG%2F2022%2F729285%2FEPRS_ATA(2022)729285_EN.pdf&usg=AOvVaw2mpqm1Jx8Si47EnMqbUsGC)
- Fath, J. P. (2021). *Modellierung von Lithium-Ionen-Batterien zur Lebensdauerprädiktion unter besonderer Berücksichtigung des Anodenüberhangeffekts* (S. 346). Karlsruher Institut für Technologie. <https://library.oapen.org/handle/20.500.12657/53522>
- FHWien. (2022). *Zukunft verantwortungsvoll gestalten*. Springer. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-36861-6\\_3](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-36861-6_3)

- Forbes. (2022). Electric Car Fire Risks Look Exaggerated, But More Data Required For Definitive Verdict. *Forbes*. <https://www.forbes.com/sites/neilwinton/2022/03/02/electric-car-fire-risks-look-exaggerated-but-more-data-required-for-definitive-verdict/?sh=3bf1fc482327>
- Fraunhofer ISI. (2020). *Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungsbedarf*.
- Fraunhofer ISI. (2022). *Solid-State Battery Roadmap 2035+*.
- Geotab. (2020a). *Was können uns 6.000 Elektrofahrzeuge über die Lebensdauer der EV Batterien sagen?* Geotab. <https://www.geotab.com/de/blog/efahrzeuge-batterie-lebensdauer-studie/>
- Geotab. (2020b). *Wie wirkt sich die Temperatur auf die Reichweite des Elektrofahrzeugs aus?* <https://www.geotab.com/de/blog/elektrofahrzeuge-batterie-temperatur/#:~:text=Bei%20optimalen%20Temperaturen%20k%C3%B6nnen%20Elektrofahrzeuge,Reichweite%20des%20Fahrzeugs%20hinaus%20fahren.>
- Global X. (2022). *How China Is Transforming the Global Lithium Industry*. Global X. <https://www.globalx-etfs.com/how-china-is-transforming-the-global-lithium-industry/>
- Golder Associates. (2007). *Environmental Impact Assessment Tenke Fungurume Project—Volume A: ESIA Introduction and Project Description*. Tenke Fungurume Mining.
- Greenpeace. (2020). *Ranking the World's Sulfur Dioxide (SO<sub>2</sub>) Hotspots: 2019-2020* [Report]. Delhi: Center for Research on Energy and Clean Air & Greenpeace India.
- Groux, O. (2018). *In-house Recycling von Li-Ionenbatterien: Alternativen zu etablierten Recyclingoptionen unter Beachtung rechtlicher und sicherheitstechnischer Auflagen—Bachelorarbeit* [Bachelorarbeit]. Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften Life Sciences und Facility Management Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen.
- Halleux, V. (2022). *New EU regulatory framework for batteries: Setting sustainability requirements | Think Tank | European Parliament*. European Parliament. [https://www.europarl.europa.eu/think-tank/en/document/EPRS\\_BRI\(2021\)689337](https://www.europarl.europa.eu/think-tank/en/document/EPRS_BRI(2021)689337)
- Human Rights Watch. (2009). *Well Oiled—Oil and Human Rights in Equatorial Guinea*. Human Rights Watch.
- Human Rights Watch. (2022). Myanmar: Thai State-Owned Company Funds Junta. *Human Rights Watch*. <https://www.hrw.org/news/2021/05/25/myanmar-thai-state-owned-company-funds-junta>
- Huo, H. (2017). *Safety Requirements for Transportation of Lithium Batteries* (S. 38). College of Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China.
- IEA. (2022). *Global Electric Vehicle Outlook 2022*. International Energy Agency.
- lionknowledge. (2022). *2.7 Lebensdauerende*. Lithium-Ionen-Batterietechnik. <https://lionknowledge.com/2-funktionsweise-von-lithium-ionen-batterien/2-7-lebensdauerende/>
- Inobat. (2021). *Jahresbericht 2020 betreffend Erhebung, Verwaltung und Verwendung der vorgezogenen Entsorgungsgebühr (VEG) für Batterien und Akkumulatoren*. INOBAT. <https://www.inobat.ch/ueber-uns/publikationen/taetigkeitsberichte/>
- INOBAT. (2022a). *Battery News*. Inobat. <https://www.inobat.ch/ueber-uns/publikationen/battery-news/>
- INOBAT. (2022b). *Inobat*. Inobat. <https://www.inobat.ch/>
- Inobat. (2023). *Zahlen und Fakten*. Inobat. <https://www.inobat.ch/batterierecycling/zahlen-fakten/>
- Janstrup, K. H., Møller, M., & Hipólito, F. (2022). *A comparison of crash, person and environment characteristics between electric and conventional vehicle*. Technical University of Denmark (DTU).
- Kampker, A. (2014). *Elektromobilproduktion*. Springer Vieweg.
- Köllner, C. (2021). *Öko-Probleme bei den Batterie-Rohstoffen Lithium und Graphit*. *Springer Nature, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH*. <https://www.springerprofessional.de/batterie/ressourceneinsatz/oeko-probleme-bei-den-batterierohstoffen-lithium-und-graphit/18790148>
- Koschinsky, A. (2021). *Tiefseebergbau—Chancen und Risiken einer zukünftigen Gewinnung kritischer metallischer Rohstoffe vom Meeresboden*. Jacobs University Bremen.
- KYBURZ. (2022). *Elektromobile & Transportlösungen | KYBURZ Switzerland AG*. Batterierecycling | KYBURZ Switzerland; KYBURZ Switzerland AG. <https://kyburz-switzerland.ch/>

- Landherr, A., & Graf, J. (2022). *Territoriale Macht und periphere imperiale Lebensweise – Internalisierungsmechanismen in der chilenischen Bergbaustadt Tierra Amarilla* (Austrian Journal of Development Studies) [Journal]. Mattersburger Kreis für Entwicklungspolitik an den österreichischen Universitäten.
- Lepesant, G. (2021). *Die Rolle der kritischen Metalle bei der Energiewende: Herausforderungen und Strategien*. HAL.
- LIBREC. (2022). *Closed-loop Battery Recycling*. Librec AG. <https://librec.ch/>
- Løvik, A. N., Marmy, C., Restrepo, E., & Widmer, R. (2020). *Projekt EVA II Elektronik – Verwertung – Altagos: Recycling von eingebetteten Elektronikgeräten in Fahrzeugen—Das Dynamisches Stoffflussmodell* [Projektbericht - nicht öffentlich publiziert]. Empa.
- Marmy, C. (2021). *La révolution Li-Ion* [Microsoft PowerPoint]. Swiss Recycling Forum, Lausanne.
- Marmy, C. (2022a). *Projekt EVA II Elektronik – Verwertung – Altagos: Recycling von eingebetteten Elektronikgeräten in Fahrzeugen—Synthesebericht* [Projektbericht - nicht öffentlich publiziert]. Empa.
- Marmy, C. (2022b). *Projekt EVA II Elektronik – Verwertung – Altagos: Recycling von eingebetteten Elektronikgeräten in Fahrzeugen—Szenarienanalyse und Entscheidungshilfe* [Projektbericht - nicht öffentlich publiziert]. Empa.
- Matzer, C., Weller, K., Dippolt, M., Lipp, S., Röck, M., Rexeis, M., & Hausberger, S. (2019). *Update of Emission Factors for HBEFA Version 4.1*. TU Graz. [https://www.hbefa.net/d/documents/HBEFA41\\_Report\\_TUG\\_09092019.pdf](https://www.hbefa.net/d/documents/HBEFA41_Report_TUG_09092019.pdf)
- Meng, Q. (2017). *The impacts of fracking on the environment: A total environmental study paradigm*. Department of Geosciences, Mississippi State University, MS.
- Morah, R. (2022, Mai 21). *Prius Battery Lifespan: How Long Does Toyota Prius Battery Last*. EVs Guy. <https://evsguy.com/prius-battery-lifespan/>
- Moran, B., Boutt, D., McKnight, S., Jenckes, J., Munk, L. A., Corkran, D., & Kirshen, A. (2022). *Relic Groundwater and Prolonged Drought Confound Interpretations of Water Sustainability and Lithium Extraction in Arid Lands* (Earth's Future, 10). <https://doi.org/10.1029/2021EF002555>
- MOTEG. (2022). *STATE OF HEALTH (SOH)*. STATE OF HEALTH (SOH). <https://www.moteg.de/e-mobility-glossar/state-of-health/>
- Motoaki, Y., Yi, W., & Salisbury, S. (2018). Empirical analysis of electric vehicle fast charging under cold temperatures. *Energy Policy*, 122, 162–168. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.07.036>
- NAF. (2020). *20 popular EVs tested in Norwegian winter conditions*. Norwegian Automobile Federation. <https://www.naf.no/elbil/aktuelt/elbiltest/ev-winter-range-test-2020/>
- Neef, C., Schmaltz, T., & Thielmann, A. (2021). *Recycling von Lithium-Ionen-Batterien: Chancen und Herausforderungen für den Maschinen- und Anlagenbau*. <https://publica.fraunhofer.de/handle/publica/301299>
- Nickel Institute. (2021). Sulphur project reducing environmental impact. *Nickel Institute*.
- Nornickel. (2020). *Our Far North* [Sustainability Report]. Nornickel Group.
- OECD. (2019). *OECD-Leitfaden für die Erfüllung der Sorgfaltspflicht zur Förderung verantwortungsvoller Lieferketten für Minerale aus Konflikt- und Hochrisikogebieten* (Dritte Ausgabe: OECD Publishing).
- Oeko-Institut. (2020). *Ökologische und sozio-ökonomische Herausforderungen in Batterie-Lieferketten: Graphit und Lithium*. Oeko-Institut.
- Öko-Institut e.V. (2020). *Lithium & Graphit für die Batterieproduktion: Zukunft der Lieferkette*. Öko-Institut e.V. <https://www.oeko.de/presse/archiv-presse-meldungen/presse-detailseite/2020/lithium-graphit-fuer-die-batterieproduktion-zukunft-der-lieferkette>
- Paffumi, E., De Gennaro, M., & Martini, G. (2018). *European-wide study on big data for supporting road transport policy*.
- Pagliaro, M., & Meneguzzo, F. (2019). Lithium battery reusing and recycling: A circular economy insight. *Heliyon*, 5(6), e01866. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01866>

- Porzio, J., & Scown, C. D. (2021). *Life-Cycle Assessment Considerations for Batteries and Battery Materials*. Energy & Biosciences Institute.
- PowerShift. (2021). *Das unbekannte Mangan—Zerstörung an Land und Bedrohung für die Tiefsee?! Umweltbundesamt Deutschland*. <https://power-shift.de/wp-content/uploads/2021/10/Die-vergessenen-Batterierohstoffe-Mangan-web.pdf>
- PSI. (2022). *Carculator*. <https://calculator.psi.ch/>
- Restrepo, E., Loevik, A., & Widmer, R. (2018). *Projekt „EVA“: Szenarien & Dynamik—Schlussbericht zu der Arbeitspaket C3* [Unpublished]. Empa.
- Reuters. (2022, Januar 21). Factbox: World faces shortage of lithium for electric vehicle batteries. *Reuters*. <https://www.reuters.com/technology/world-faces-shortage-lithium-electric-vehicle-batteries-2022-01-21/>
- RMF. (2020). *Mining and the SDGs, a 2020 status update*. Responsible Mining Foundation; Columbia Center on Sustainable Investment.
- RP-Energie-Lexikon. (2022). *Kapazität einer Batterie*. Kapazität einer Batterie. [https://www.energie-lexikon.info/kapazitaet\\_einer\\_batterie.html](https://www.energie-lexikon.info/kapazitaet_einer_batterie.html)
- Rutronik. (2022). *Lithium Ionen Batterien: Wie lässt sich ein Thermal Runaway verhindern?* Rutronik Elektronische Bauelemente GmbH. <https://www.rutronik.com/de/artikel/detail/News/lithium-ionen-batterien-wie-laesst-sich-ein-thermal-runaway-verhindern/>
- RWTH Aachen. (2022a). *Battery Atlas 2022*. [www.battery-atlas.eu](http://www.battery-atlas.eu)
- RWTH Aachen. (2022b). *Komponenten elektrischer Antriebsstränge—Aufbau eines Batteriesystems (RWTH-Wissenschaftsnacht-Steckbriefe)*. PEM RWTH Aachen University.
- SARS. (2022). *2021 JAHRESBERICHT*. Stiftung Auto Recycling Schweiz. <https://files.designer.hoststar.ch/98/0b/980ba2fa-4322-4142-a8d3-dec8f05da845.pdf>
- Schmidt, M. (2017). *DERA Rohstoffinformationen—Rohstoffrisikobewertung Lithium* (Nr. 33). Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). [https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Aktuelles/rohstoff\\_lithium.html?nn=5091226](https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Aktuelles/rohstoff_lithium.html?nn=5091226)
- Schreyer, C., & Morlier, D. (2022). Roadmap Elektromobilität: Zukunft unter Strom. *Die Volkswirtschaft*. <https://dievolkswirtschaft.ch/de/2022/10/roadmap-elektromobilitaet-zukunft-unter-strom/>
- Schulze, O. (2022). *Elektromobilität*. Springer.
- SDR, Nr. SR 741.621 (2021). <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2002/685/de>
- ADR, Nr. AS 1972 1073, BBl 1969 II 1 (2022). [https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1972/1073\\_1085\\_1249/de](https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1972/1073_1085_1249/de)
- ChemRRV, Nr. SR 814.81 (2022). <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2005/478/de>
- SENS eRecycling. (2023). *Branchenlösung «VFAS» – Nachhaltige Entsorgungslösung für den Autohandel*. SENS eRecycling. <https://www.erecycling.ch/wissenswertes/wissensblog/fach88.html>
- SENS Swico. (2022). *FACHBERICHT 2022* [Fachbericht]. SENS Swico.
- Sestorec. (2023). *Branchenorganisation*. sestorec.ch. <https://www.sestorec.ch/branchenorganisation>
- Shahan, Z. (2022, Oktober 20). *World Needs To Mine 25x More Lithium By 2050*. CleanTechnica. <https://cleantechnica.com/2022/10/20/world-needs-to-mine-25x-more-lithium-by-2050/>
- SOMO. (2020). *The battery paradox: How the electric vehicle boom is draining communities and the planet* (S. 65). Centre for Research on Multinational Corporations.
- statista. (2022a). *Distribution of lithium end-usage worldwide in 2021, by area of application*. <https://www.statista.com/statistics/268787/lithium-usage-in-the-world-market/#:~:text=In%202021%2C%20batteries%20were%20by,made%20up%20another%2014%20percent.>
- statista. (2022b). *Major countries in worldwide graphite mine production in 2021*. <https://www.statista.com/statistics/267366/world-graphite-production/>
- statista. (2022c). *Projected global battery demand from 2020 to 2030, by application*. Statista. <https://www.statista.com/statistics/1103218/global-battery-demand-forecast/>

- Sun, P. (2019). *A Review of Battery Fires in Electric Vehicles* (S. 50). Research Centre for Fire Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Kowloon, Hong Kong.
- Surovtseva, D., Crossin, E., Pell, R., & Stamford, L. (2022). *TOWARD A LIFE CYCLE INVENTORY FOR GRAPHITE PRODUCTION*.
- Swiss eMobility. (2020a). *Elektromobilität in der Schweiz: Zahlen – Fakten – Prognosen*. Swiss eMobility. [https://www.swiss-emobility.ch/de-wAssets/docs/eFaktenblatt/Swiss\\_eMobility\\_Faktenblatt\\_105x180mm\\_DE.pdf](https://www.swiss-emobility.ch/de-wAssets/docs/eFaktenblatt/Swiss_eMobility_Faktenblatt_105x180mm_DE.pdf)
- Swiss eMobility. (2020b). *Mythbuster Elektroauto* (S. 20).
- swissquote. (2022). *Dossier Batterien elektrisieren die Welt*. [www.swissquote.com](http://www.swissquote.com)
- Szurliès, M. (2021). *DERA Rohstoffinformationen—Rohstoffrisikobewertung Nickel* (Nr. 48). Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). [https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA\\_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-48.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-48.pdf?__blob=publicationFile&v=4)
- Tages-Anzeiger. (2022, September 6). Für brennende E-Lastwagen sind Schweizer Tunnels schlecht gerüstet. *Tages-Anzeiger*. <https://www.tagesanzeiger.ch/fuer-brennende-e-lastwagen-sind-schweizer-tunnels-schlecht-geruestet-572176179394>
- TCS. (2021). *Elektroauto bei Kälte: Der Einfluss auf die Reichweite*. [https://www.tcs.ch/de/testberichte-ratgeber/ratgeber/elektromobilitaet/elektroauto-kaelte.php#anchor\\_3d35f12a\\_Accordion-Die-Vorteile-von-Elektroautos-in-der-Kaelte](https://www.tcs.ch/de/testberichte-ratgeber/ratgeber/elektromobilitaet/elektroauto-kaelte.php#anchor_3d35f12a_Accordion-Die-Vorteile-von-Elektroautos-in-der-Kaelte)
- TCS. (2022). *Wie lange halten Batterien von Elektroautos, und was geschieht mit ihnen danach?* Touring Club Schweiz. <https://www.tcs.ch/de/testberichte-ratgeber/ratgeber/elektromobilitaet/lebensdauer-elektroauto-batterie.php>
- TdG. (2018). *Vorsicht vor Autobränden!* Tribune de Genève. <https://www.tdg.ch/gare-aux-incendies-de-voitures-717308349086>
- Technische Universität Ilmenau. (2022). *Optimierung der äußeren Druckbedingungen auf Li-Ionen Zellen zur Erhöhung der Lebensdauer* (S. 144) [DISSERTATION]. Technische Universität Ilmenau.
- Technischen Hochschule Ingolstadt. (2021). *Methoden zur sichern Deaktivierung von Lithium-Ionen-Zellen* (S. 54) [Bachelorarbeit]. <https://opus4.kobv.de/opus4-haw/files/2833/I001038016Abschlussarbeit.pdf>
- The Guardian. (2014). Iraq invasion was about oil. *Guardian News & Media Limited*. <https://www.theguardian.com/environment/earth-insight/2014/mar/20/iraq-war-oil-resources-energy-peak-scarcity-economy>
- Toyota, K. (2022). *How Long Does a Toyota Last? | Camry, Corolla, Highlander, RAV4, Prius*. <https://www.kingstoyota.com/blog/2021/may/14/how-long-does-a-toyota-last.htm>
- Tradingeconomics. (2022a). *Cobalt—2022 Data—2010-2021 Historical—2023 Forecast—Price—Quote—Chart*. <https://tradingeconomics.com/commodity/cobalt>
- Tradingeconomics. (2022b). *Lithium—2022 Data—2017-2021 Historical—2023 Forecast—Price—Quote—Chart*. <https://tradingeconomics.com/commodity/lithium>
- Tradingeconomics. (2022c). *Nickel—2022 Data—2010-2021 Historical—2023 Forecast—Price—Quote—Chart*. <https://tradingeconomics.com/commodity/nickel>
- Tulane University. (2021). *EPA's Report on Fracking and Water Quality*. Tulane University Law School. <https://online.law.tulane.edu/blog/epa-fracking-report-water-quality#:~:text=Environmental%20Concerns%20Related%20to%20Fracking&text=However%2C%20hydraulic%20fracturing%20is%20exempt,it%20pertains%20to%20drinking%20water>.
- TWICE, 2023. (2023). *TWICE Energiespeicher*. TWICE Energy. <https://twice-energy.ch/index.php/produkt/>
- UK Department for Transport. (2021). *Outcome and response to ending the sale of new petrol, diesel and hybrid cars and vans*. <https://www.gov.uk/government/consultations/consulting-on-ending-the-sale-of-new-petrol-diesel-and-hybrid-cars-and-vans/outcome/ending-the-sale-of-new-petrol-diesel-and-hybrid-cars-and-vans-government-response>
- Umicore. (2022). *Our recycling process*. <https://brs.umicore.com/en/recycling/>

- USGS. (2022a). *Copper—Mineral Commodity Summaries 2022* [U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries].
- USGS. (2022b). *Mineral commodity summaries 2022*: U.S. Geological Survey.
- UVEK. (2020). *Risikominimierung von Elektrofahrzeugbränden in unterirdischen Verkehrsinfrastrukturen* (S. 102) [Forschungsprojekt].
- VDI/VDE. (2021). *Nachhaltigkeit der Batteriezellfertigung in Europa*. Publikation der wissenschaftlichen Begleitung zur Fördermaßnahme Batteriezellfertigung im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.
- Visualcapitalist. (2022). *Mapped: EV Battery Manufacturing Capacity, by Region*. Visualcapitalist. <https://www.visualcapitalist.com/sp/mapped-ev-battery-manufacturing-capacity-by-region/>
- Wagner, A., Schmalz, M., Weisbeck, J., & Krause, S. (2022). *Einfluss der Gasbildung auf die Entwicklung von Lithium-Ionen-Batterien* (S. 42–47) [MTZ-Motortechnische Zeitschrift 83.9]. <https://link.springer.com/article/10.1007/s35146-022-0849-z>
- Wang, W., & Wu, Y. (2017). An overview of recycling and treatment of spent LiFePO<sub>4</sub> batteries in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 233–243. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.019>
- Wang, X., Gaustad, G., Babbitt, C. W., & Richa, K. (2014). Economies of scale for future lithium-ion battery recycling infrastructure. *Resources, Conservation and Recycling*, 83, 53–62. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.11.009>
- WEF. (2019). *A Vision for a Sustainable Battery Value Chain in 2030 Unlocking the Full Potential to Power Sustainable Development and Climate Change Mitigation*. World Economic Forum.
- Whiteside, J., & Finn-Foley, D. (2019). Supply Chain Looms as Serious Threat to Batteries' Green Reputation. *Wood Mackenzie, Greentech Media*.
- Widmer, R., Grösser, S., Loevik, A., Toledo, L., & Marmy, C. (2021). *Projekt „SARS-LIB“: „CH-Branchenlösung zur Entsorgung von Li-Ionen Batterien aus e-Fahrzeugen“—Schlussbericht 2021* [Unpublished]. Empa, Complexity Engineering.
- Wietlisbach, O. (2022, August 6). Wann welcher Autohersteller Benzin- und Dieselaautos aus dem Angebot wirft. *watson*. <https://www.watson.ch/amp/1501694830>
- WIFO. (2021). *Recycling von Lithium-Ionen-Batterien* (S. 11). [https://www.wifo.ac.at/jart/prj3/wifo/resources/person\\_dokument/person\\_dokument.jart?publikationsid=69243&mime\\_type=application/pdf](https://www.wifo.ac.at/jart/prj3/wifo/resources/person_dokument/person_dokument.jart?publikationsid=69243&mime_type=application/pdf)
- Zheng, X., Zhu, Z., Lin, X., Zhang, Y., He, Y., Cao, H., & Sun, Z. (2018). A Mini-Review on Metal Recycling from Spent Lithium Ion Batteries. *Engineering*, 4(3), 361–370. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.05.018>
- Zürich Versicherungs-Gesellschaft AG. (2020). *«Elektroautos brennen nicht häufiger als konventionelle Fahrzeuge»* [Zürich Versicherungs-Gesellschaft AG]. <https://www.zurich.ch/de/services/wissen/fahrzeuge-und-reisen/brennende-elektroautos>

## 8. Glossar – Begriffsklärungen und Abkürzungen

Anode	Elektrode, aus der sich beim Entladen der Batterie positiv geladene Teilchen (Lithium-Kationen) lösen und über den Elektrolyten zur Kathode fließen. Zum Ladungsausgleich fließen Elektronen über den geschlossenen Stromkreis durch den Verbraucher zur Kathode.
ARD	«acid rock drainage», der Abfluss von saurem Wasser aus Metall- oder Kohlebergwerken.
Batteriezelle	Elektrochemische Zelle: Grundeinheit einer Batterie, bestehend aus einem Kollektor mit der Kathode, einem Elektrolyten, einem Separator, einem Kollektor mit der Anode und einer Verpackung. In Traktionsbatterien werden viele Zellen sowie ein Batteriemanagementsystem und ggf. ein Kühlsystem zu einer Batterie verbunden.
Elektrode	Kathode und/oder Anode. Eine Elektrode ist ein Elektronenleiter und Ionenleiter, der im Zusammenspiel mit einer Gegenelektrode mit einem zwischen beiden Elektroden befindlichen Medium, i.e. dem Elektrolyten, in Wechselwirkung steht.
Elektrolyt	Als Elektrolyt bezeichnet man die Zellkomponente zwischen den beiden Elektroden, die im festen oder flüssigen Zustand Ionen leitet.
Energie	Energie ist die Fähigkeit, Arbeit zu verrichten, Wärme abzugeben oder Licht auszustrahlen. Kann unterteilt werden in z.B. mechanische, elektrische, magnetische, kinetische, chemische, thermische oder potentielle Energie. SI-Einheit: J (Joule)
Energiedichte	Energiemenge, die pro Masse (kg) oder Volumen (l) der Batterie gespeichert werden kann.
Feststoffbatterie	Feststoffbatterien sind Batterien, die einen festen Elektrolyten beinhalten, im Gegensatz zu den «normalen» Batterien mit einem flüssigen Elektrolyten. Die Elektrolyte von Feststoffbatterien sind keramische Oxide oder Sulfide oder auch Polymere. Aktuell werden Feststoffbatterien bei Implantaten oder Hörgeräten eingesetzt, und in Teilen auch für Busse (Polymere). Künftig könnte sich das zunehmend ändern, da Feststoffbatterien z.B. die Verwendung von metallischem Lithium als Anodenmaterial fördern könnten, was zu sehr hohen Energiedichten führt.
Gigafactory	Gigafactory ist ein allgemeiner Begriff, der sich auf Anlagen, die Batterien für Elektrofahrzeuge in grossem Massstab herstellen, bezieht. Der Begriff wurde ursprünglich vom Elektroautohersteller Tesla verwendet. Der Erfolg des Konzepts hat zu einer generischen Verwendung des Begriffs geführt.
IEA	International Energy Agency
Kapazität	Eigentlich ist die Kapazität die Fähigkeit einer voll aufgeladenen Batterie, eine bestimmte Menge an Elektrizität (gemessen in Amperestunden) zu liefern. Multipliziert man die Kapazität mit der Spannung der Batterie, erhält man die Energie, die in der Batterie maximal gespeichert ist (gemessen in Wattstunden bzw. Kilowattstunden (kWh)). Häufig wird der Begriff «Kapazität» als maximale Energiespeicherkapazität verwendet, was physikalisch eigentlich falsch ist.
Kathode	Elektrode, die beim Entladen der Batterie Lithium-Kationen einlagert. Die Kationen werden von der Anode freigesetzt und im Elektrolyten transportiert. Zum Ladungsausgleich fließen negativ geladene Elektronen von der Anode über den Stromkreis und Verbraucher zur Kathode.
LCO	Lithium Kobalt-Oxid (LiCoO <sub>2</sub> ): Kathodenmaterial, das in Kombination mit Graphit-Anoden eine sehr hohe Energiedichte erreicht. Dafür ist die Lebensdauer vergleichsweise gering. Aufgrund des hohen Anteils an Kobalt ist die Batterie auch teuer. Spielt als Traktionsbatterie für Serienfahrzeuge keine Rolle.
Leistung	Arbeit bzw. eingesetzte Energie (in Joule) pro Zeiteinheit. SI-Einheit: W (Watt) bzw. J/s (Joule/Sekunde)
Leistungsdichte	Leistung, die eine Batterie pro Masse (kg) oder Volumen (l) liefern kann.

LFP	Lithiumeisenphosphat (LiFePO <sub>4</sub> ). Kathodenmaterial, das in Lithium-Eisenphosphat-Batterien in Kombination mit LTO- oder Graphit-Anoden verwendet wird. Es handelt sich um ein gemischtes Phosphat des Eisens und des Lithiums. LFP-Batterien sind günstig, sicher und haben eine gute Lebenserwartung. Dafür haben sie eine geringere Energiedichte als Lithium-Ionen-Batterien beinhaltend NMC. Insgesamt sind sie aber gut geeignet als Traktionsbatterien für Serienfahrzeuge und werden auch zunehmend mehr eingesetzt.
LiCoO <sub>2</sub>	siehe LCO
LMO	Lithium-Mangan-Oxid-Spinell (LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ), auch LMS genannt: Kathodenmaterial, das ohne Kobalt auskommt, dafür aber eine deutlich geringere Energiedichte erlaubt als NMC. Spielt als Traktionsbatterie für Serienfahrzeuge aktuell keine Rolle.
LMS	Lithium-Mangan-Oxid-Spinell: siehe LMO
LTO	Lithium-Titan-Oxid/Lithium-Titanat: Batterie mit einer Lithium-Titanat-Anode (statt der herkömmlichen Graphit-Anode), Kathoden sind typischerweise NMC, NCA oder LFP. LTO-Batterien weisen eine sehr hohe Leistungsdichte auf, können also sehr schnell ge- und entladen werden. Ausserdem haben sie eine sehr gute Zyklenfestigkeit. Dafür ist die spezifische Energiekapazität geringer als mit Graphit-Anoden. LTO-Batterien sind sehr teuer und spielen als Traktionsbatterie für Serienfahrzeuge (ausser Bussen) aktuell keine Rolle.
NCA	Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxide. Sie sind Mischoxide mit den Kationen des Lithiums, des Nickels, des Kobalts und des Aluminiums und bilden eine Stoffgruppe aus Oxiden. Sie werden als Aktivmaterial der Kathode in Lithium-Ionen-Batterien eingesetzt. NCA-Batterien zeigen ähnliche Eigenschaften wie NMC-Batterien. Tesla hat lange auf dieses Kathodenmaterial gesetzt, verwendet seit einigen Jahren aber auch NMC und LFP.
NMC	Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxide. Kathodenmaterial, das in Kombination mit Graphitanoden zu den wichtigsten Aktivmaterialien von Lithiumtraktionsbatterien für Serienfahrzeuge gehört. Die Anteile der drei Übergangsmetalle (Nickel, Mangan und Kobalt) in diesen Materialien variieren in einem weiten Bereich. Entsprechend variieren auch die Eigenschaften von NMC-Kathoden. Sie erlauben aber eine gute Kombination von Energie- und Leistungsdichte, Lebensdauer, Temperaturtoleranz, und Preis.
NMC111	Spezifisches Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid, LiNi <sub>0,33</sub> Mn <sub>0,33</sub> Co <sub>0,3</sub> O <sub>2</sub>
NMC532	Spezifisches Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid, LiNi <sub>0,5</sub> Mn <sub>0,3</sub> Co <sub>0,2</sub> O <sub>2</sub>
NMC622	Spezifisches Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid, LiNi <sub>0,6</sub> Mn <sub>0,2</sub> Co <sub>0,2</sub> O <sub>2</sub>
NMC811	Spezifisches Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid, LiNi <sub>0,8</sub> Mn <sub>0,1</sub> Co <sub>0,1</sub> O <sub>2</sub>
SEI	Passivierende Deckschicht an der Grenzfläche von Aktivmaterial der Anode und Elektrolyt (engl. «solid electrolyte interphase»)
SOH	State of Health: Zustand der Batterie, gemessen in Prozent der ursprünglichen Energiespeicherfähigkeit. Ein SOH unter 80% bedeutet, dass die Batterie am Lebensende angekommen ist. Das ist allerdings eine arbiträre Definition und bedeutet nicht, dass eine Batterie mit SOH < 80% nicht mehr verwendet werden könnte.
Treibhausgase	Treibhausgase sind: CO <sub>2</sub> , Methan, Lachgas, wasserstoffhaltige fluorierte und perfluorierte Kohlenwasserstoffe (HFKW und FKW), Schwefelhexafluorid und Stickstofftrifluorid