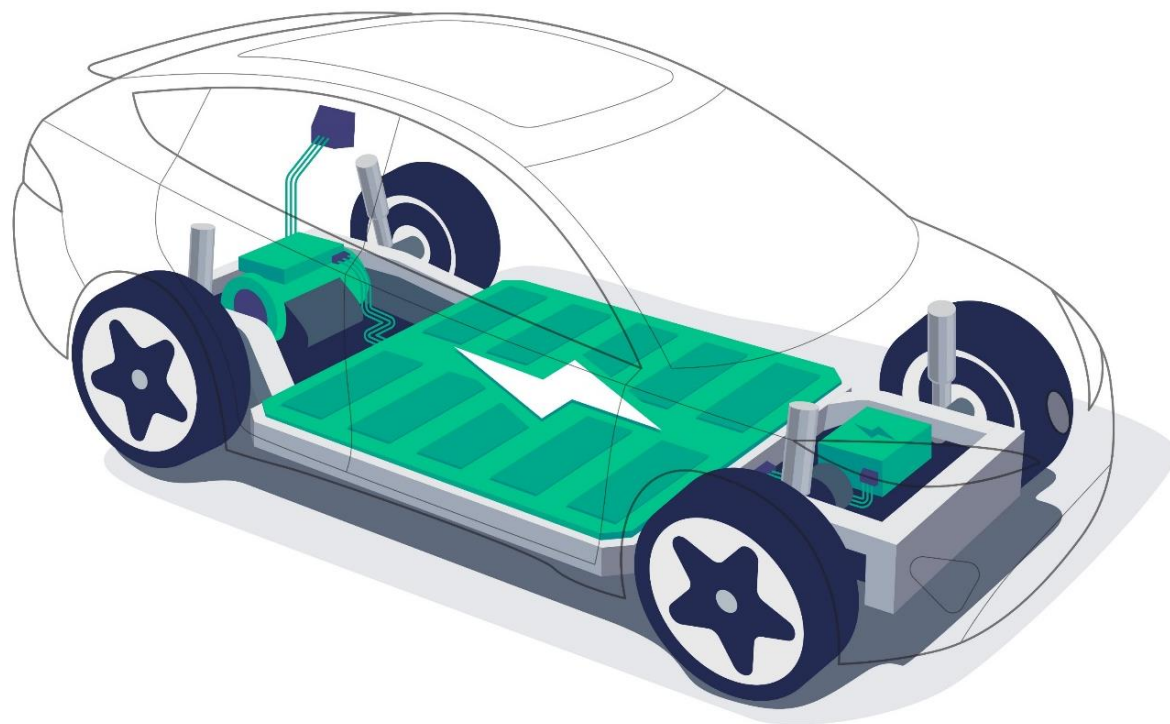


# Batterien für Elektrofahrzeuge

Key Facts & Figures



# Inhaltsverzeichnis und Impressum

## Inhalte

1. Aufbau von Lithium-Ionen Batterien
2. Globaler Markt
3. Ökobilanz Batterien
4. Rohstoffförderung
5. Produktion Batteriezelle
6. Nutzung der Batterie
7. End-of-Life der Batterie

### Auftraggeber

EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE  
Alois Freidhof, Fachexperte Mobilität  
Pulverstrasse 13, 3063 Ittigen. Postadresse: 3003 Bern  
[www.energieschweiz.ch](http://www.energieschweiz.ch)

### Auftragnehmer

INFRAS, Binzstrasse 23, 8045 Zürich  
Empa, Lerchenfeldstrasse 5, 9014 St.Gallen

### Autorinnen und Autoren

Roberto Bianchetti, Hans-Jörg Althaus, Brian Cox, Lucas Truniger, Ursina Walther  
([INFRAS](#))  
Charles Marmy, Andrin Büchel, Martin Gasser, Roland Hischier, Patrick Wäger  
([Empa](#))



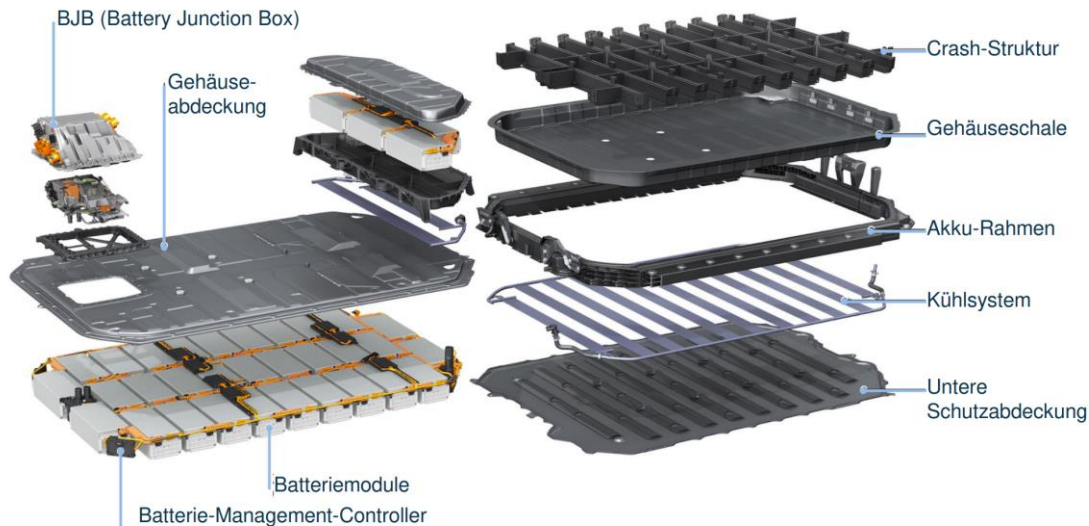
Diese Studie wurde im Auftrag des Bundesamtes für Energie erstellt. Für den Inhalt sind allein die Autorinnen und Autoren verantwortlich. Die enthaltenen Aussagen basieren auf dem Stand des Wissens zur Zeit der Erarbeitung des Faktenblatts (Februar 2023). Für eine bessere Lesbarkeit wird darauf verzichtet, jeder einzelnen Aussage eine Quelle zuzuordnen. Detailliertere Informationen sowie sämtliche verwendete Quellen befinden sich im BFE-Grundlagendokument «Batterien für Elektrofahrzeuge».

# 1. Aufbau von Lithium-Ionen-Batterien

## Definitionen und Aufbau

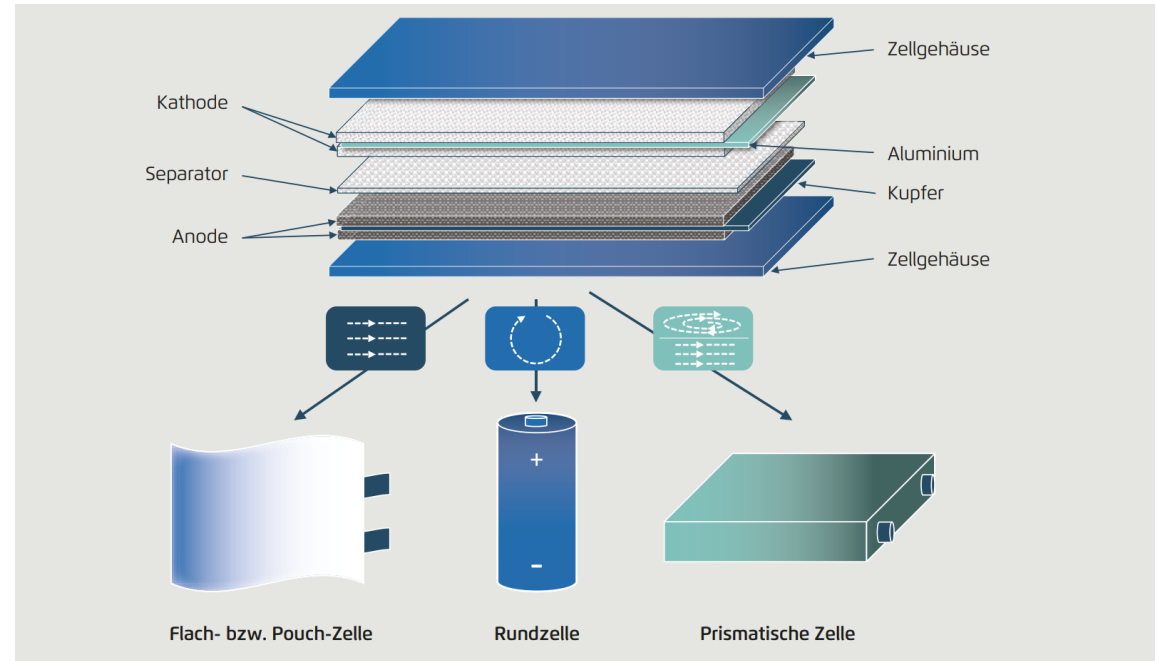
Der Begriff «**Batterie**» umfasst das ganze System, das sich aus den eigentlichen elektrochemischen Zellen, einem Batteriemanagementsystem, einer Kühlung und einer Verpackung und Kontaktierung zusammensetzt.

Batterien sind meist modular aufgebaut und wiegen zwischen 250 und 650 kg. Einzelne Zellen<sup>1</sup> werden zu **Modulen** zusammengeschaltet, die wiederum, zusammen mit einem Kühlsystem und einem integrierten Batteriemanagementsystem zu einem Batteriesystem kombiniert werden.



Aufbau eines Batteriesystems (RWTH Aachen, 2022b)

<sup>1</sup> Zum Beispiel enthält ein Tesla Model S insgesamt 7'104 Zellen.



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

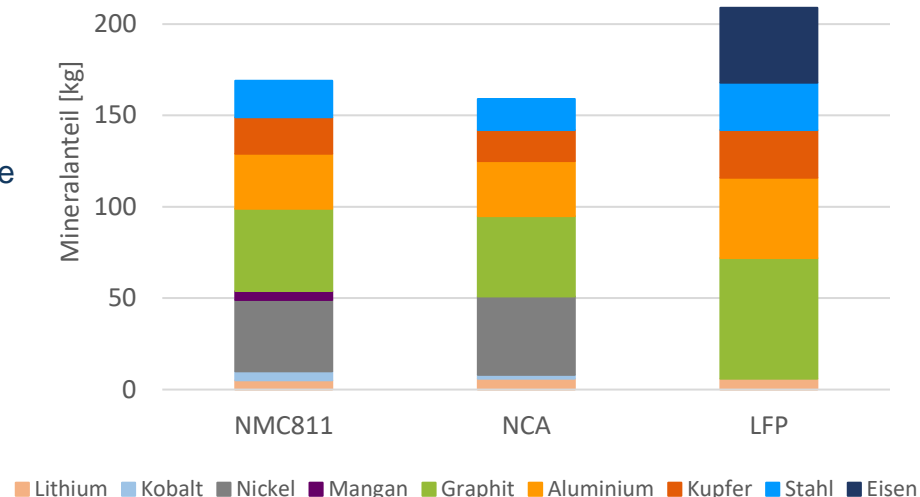
Das Herz einer Batterie ist die elektrochemische **Zelle**. Sie besteht aus zwei Elektroden und einem Elektrolyten. Die positive Elektrode wird **Kathode** genannt, die negative Elektrode **Anode**. Beide Elektroden können aus unterschiedlichen Materialien bestehen:

- Die Anode von Lithium-Ionen-Batterien besteht heute meist aus Graphit, kann aber auch aus Lithiumtitanat ( $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ; LTO) bestehen
- Die wichtigsten Kathoden bestehen aus Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxiden (**NMC**), Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxiden (**NCA**) sowie aus Lithiumeisenphosphat (**LFP**).

# 1. Aufbau von Lithium-Ionen-Batterien

## Chemische Zusammensetzung

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



Chemische Zusammensetzung verschiedener Batterietypen. Graphik INFRAS.

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

### Alternative Batterietypen

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

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

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

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

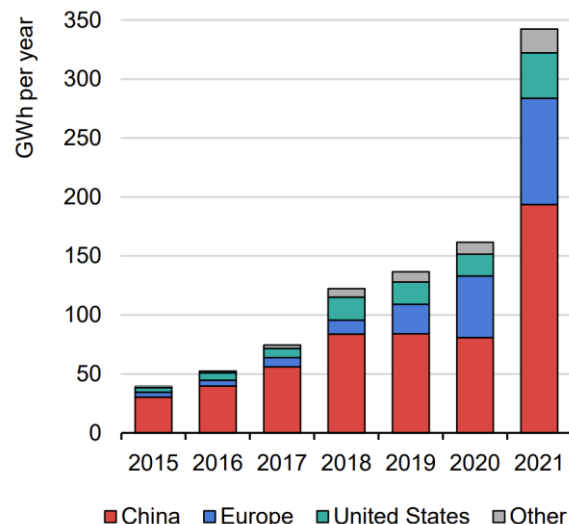
**Natrium-Ionen-Batterien** sind nicht entflammbar und funktionieren auch bei kalten Temperaturen zuverlässig. Jedoch weisen sie eine begrenzte Lebensdauer und eine geringere Energiedichte auf als die häufig verwendeten Batterietypen.

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

## 2. Globaler Markt

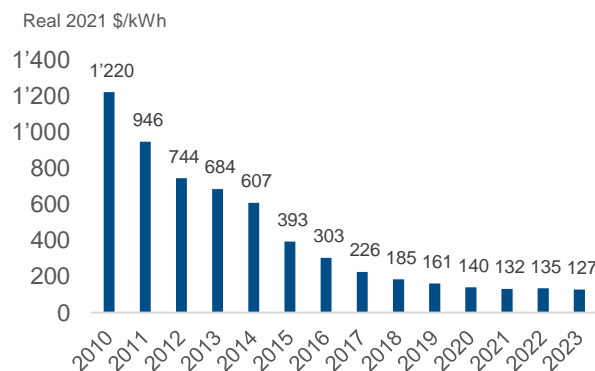
### Entwicklung bis heute

Im Jahr 2021 hat sich die **Nachfrage nach Batterien** verdoppelt und erreichte eine Gesamtkapazität von **340 GWh**. China weist die grösste Nachfrage auf mit **200 GWh**, gefolgt von Europa mit **80 GWh** und den USA mit **40 GWh**.



Globale Nachfrage nach Batterien (IEA, 2022)

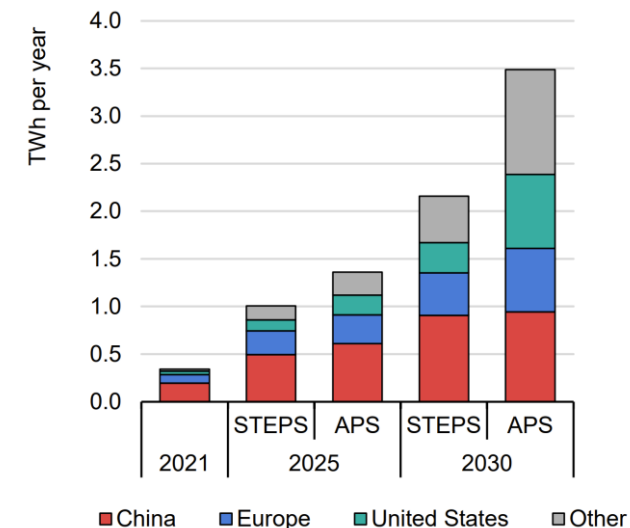
Die **Zellenpreise** sind im letzten Jahrzehnt stark gefallen und erreichten 2021 ein Minimum von **100\$/kWh**. Für das Jahr 2022 ist eine Trendwende zu beobachten mit einem Preisanstieg von **2%**, insbesondere aufgrund des massiven Anstiegs der Energie- und Rohstoffpreise.



Historische und prognostizierte Durchschnittspreise pro kWh für Packungen und Zellen (BloombergNEF, 2022b). Graphik INFRAS.

### Prognosen bis 2030

Bis 2030 wird eine stark wachsende Nachfrage nach Batterien erwartet, bis um einen **Faktor 10**. Je nach Szenario wird eine sechsfache bis zehnfache Steigerung der aktuellen Produktion nötig sein um die gesteigerte Nachfrage zu decken.



**Entwicklungsszenarien bis 2030:** STEPS basiert auf den tatsächlich umgesetzten Massnahmen und Initiativen. APS Szenario nimmt an, dass die Klimazusagen der Regierungen weltweit rechtzeitig umgesetzt werden (IEA, 2022).

#### Erwartete Entwicklungen

- Umstellung zu kostengünstigeren Kathodenchemien
- Reduzierung des Kobaltanteils zugunsten von Nickel
- Starke Zunahme an LFP Batterien (bis 35-60% der Nachfrage)

**Ausblick Preise:** Trotz temporären Fluktuationen der Rohstoffpreise dürfte damit der sinkende Trend der Batteriepreise auch langfristig gesichert sein.

# 3. Ökobilanz Batterien

## Ökobilanz von E-Autos und Rolle der Batterie

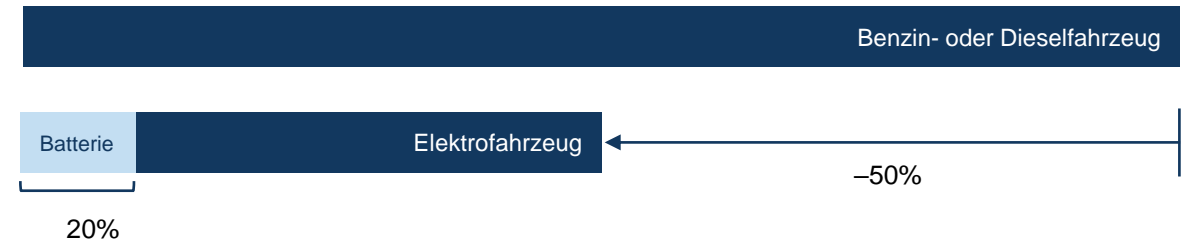
Die **Herstellung** von Elektrofahrzeugen verursacht rund **25–50% grössere Umweltwirkungen<sup>2</sup>** als die Herstellung konventioneller Fahrzeuge. Zwar benötigen sie keinen Katalysator mit Rhodium und Palladium, die zu den umweltschädlichsten Materialien überhaupt gehören, dafür benötigen Elektrofahrzeuge mehr **Kupfer und mehr (Leistungs-) Elektronik** als Verbrenner. Damit trägt insbesondere die Herstellung der Batterie zu den zusätzlichen Umweltwirkungen von Elektrofahrzeugen bei.

Im **Betrieb** verursachen Elektrofahrzeuge keine direkten Emissionen, ausser Reifen- und Bremsabrieb. Sie sind etwa **4-mal energieeffizienter** als vergleichbare Verbrenner. Zusätzlich zum geringeren Energieverbrauch, generiert ausserdem die Stromproduktion weniger Umweltwirkungen als die Produktion fossiler Treibstoffe. Dies ist auch der Fall wenn kein sauberer Strom verwendet wird. **Am Lebensende** können durch den Recyclingprozess neben den Materialien, die im Fahrzeug stecken, insbesondere auch Bestandteile der Batterie zurückgewonnen werden.

Über die **gesamte Lebensspanne** startet ein Elektroauto mit einem grösseren ökologischen Rucksack als ein Verbrenner, addiert aber mit jedem gefahrenen Kilometer weniger Umweltschäden dazu und generiert nach einer gewissen gefahrenen Distanz geringere Umweltwirkungen: ca. **25'000 km** für Kleinwagen, **30'000 km** für Mittelklasse-Wagen und **45'000 km** für Luxusklasse-Wagen.

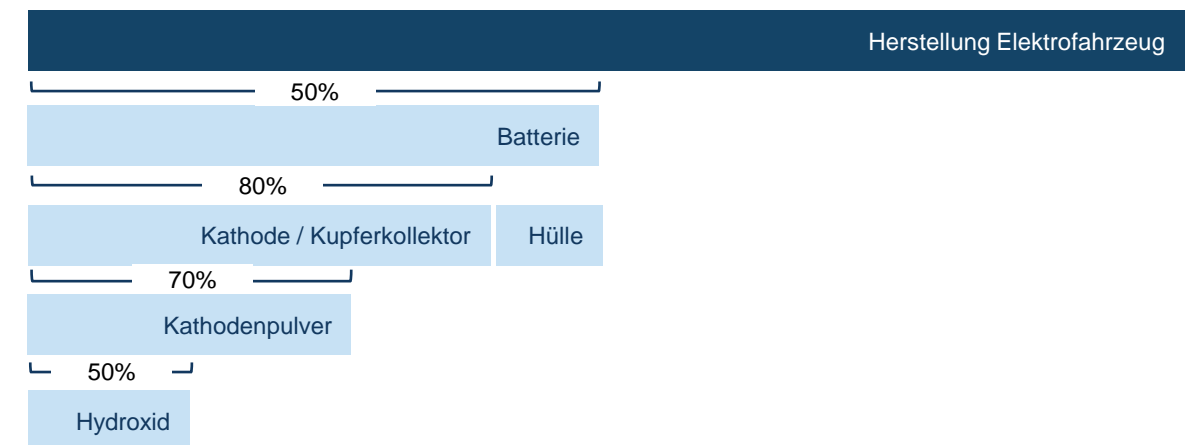
<sup>2</sup> Abhängig von den betrachteten Umweltwirkungen. Dazu zählen u.a. Treibhausgasemissionen, Primärenergieverbrauch, Wasserverbrauch, Landverbrauch, menschliche Toxizität, Mineralverbrauch, Feinstaub und Sommersmog.

Treibhausgasemissionen nach Lebensdauer von 200'000 km



Schematische Darstellung der Treibhausgasemissionen eines Mittelklassewagens mit etwa 400 km Reichweite. Die Herstellung der Batterie ist in diesem Beispiel für knapp 20% der Emissionen des Elektrofahrzeuges verantwortlich. Graphik INFRAS.

Wo entsteht die Umweltwirkung in der Batterieproduktion?

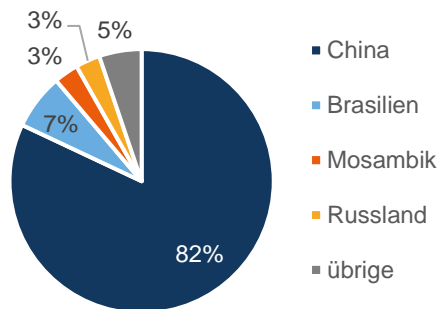


Schematische Darstellung der Umweltwirkungen in der Batterieherstellung. Graphik INFRAS.

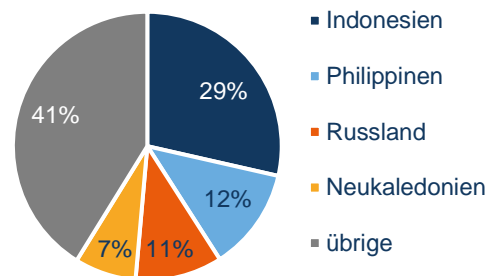
# 4. Rohstoffförderung

## Wichtigste Rohstoffexporteure für die Batterieproduktion

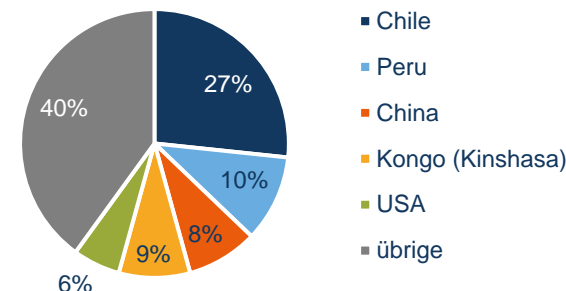
**Graphit (natürlich) [45 kg]**



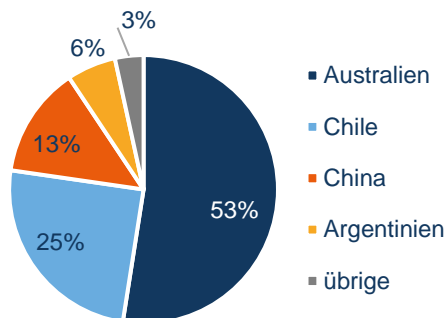
**Nickel [39 kg]**



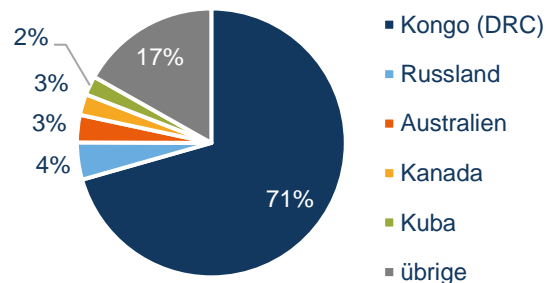
**Kupfer [20 kg]**



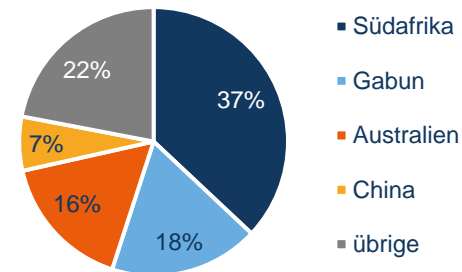
**Lithium [5 kg]**



**Kobalt [5 kg]**



**Mangan [5 kg]**



### Zukünftige Verfügbarkeit

- 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 kobalt-reduzierten und nickelreichen Batterien sehr wahrscheinlich entschärfen.
- Bei Lithium dürfte die Rohstoffverfügbarkeit weiterhin unkritisch bleiben, bzgl. Nickel bestehen noch Unsicherheiten.
- Für Lithium, Kupfer, Kobalt, und Nickel werden ausgereifte Recyclingverfahren im industriellen Massstab künftig relevanter.

Die wichtigsten Exportländer für Rohstoffe, die in der Batterieproduktion verwendet werden und ihre jeweiligen Anteile an der globalen Produktion. Aufgelistet sind die Metalle in absteigender Reihenfolge gemäss ihrer mengenmässigen Verwendung in einer Batterie Typ NMC811. Nicht dargestellt sind Aluminium und Stahl. Graphik INFRAS.

# 4. Rohstoffförderung

## Negative ökologische und soziale Auswirkungen

### Metall<sup>3</sup> Negative ökologische und soziale Auswirkungen

Kobalt	<ul style="list-style-type: none"><li>– Mangelnde Rekultivierung der Abbaugelände</li><li>– Frischwasserverbrauch und Kontamination von Gewässern</li><li>– Staub- und Schwefeldioxidemissionen</li><li>– Der Grossteil des Kobaltabbaus erfolgt industriell. Ein Teil des handwerklichen Abbaus ist mit dem Risiko von Kinderarbeit verbunden.</li></ul>
Lithium	<ul style="list-style-type: none"><li>– Absenkungen des Grundwasserspiegels und lokale Wasserknappheit bei der Gewinnung aus Sole</li><li>– Kontamination des Bodens und des Trinkwassers</li><li>– Zwei Drittel des Lithiums wird jedoch in Australien aus Festgestein gewonnen mit geringen ökologischen und sozialen Auswirkungen</li></ul>
Nickel	<ul style="list-style-type: none"><li>– Grosser Flächenverbrauch</li><li>– Grosser Grundwasserverbrauch und Kontamination durch Salzwasserintrusion</li><li>– Kontamination von Gewässern mit Schwermetallen</li><li>– Emissionen von schwermetallhaltigen Stäuben und Schwefeldioxid</li></ul>
Kupfer	<ul style="list-style-type: none"><li>– Hoher Wasserverbrauch</li><li>– Schwermetall-, Staub-, und SO<sub>x</sub>-Emissionen</li></ul>
Graphit	<ul style="list-style-type: none"><li>– Hoher Energieverbrauch</li></ul>
Mangan	<ul style="list-style-type: none"><li>– Hoher Wasserverbrauch, Kontamination von Wasser, Luft und Boden</li><li>– Die lokalen Gemeinden leiden unter Gesundheitsproblemen wie z.B. Lungenkrankheiten.</li></ul>

<sup>3</sup> Seltene Erden werden in Batterien nicht benutzt, sind aber teilweise in Elektromotoren enthalten (beispielsweise in Synchronmotoren mit Permanentmagneten).

## Lösungsansätze

Verschiedene Massnahmen werden unternommen, um die zukünftigen ökologischen und sozialen Auswirkungen der Rohstoffförderung im Rahmen der Batterieherstellung zu vermindern:

- Technologische Weiterentwicklung Rohstoffförderung
- Substitution kritischer Rohstoffe
- Staatliche Regulierung und Sorgfaltspflichten
- Förderung des Recyclings und transparente Lieferketten

### Bestehende Labels und Initiativen

- Global Battery Alliance (GBA): Nachhaltige Batterie-Wertschöpfungskette bis 2030
- Responsible Minerals Initiative (RMI): Verantwortungsvolle Mineralienproduktion und -beschaffung. Mitglied sind alle Batterieproduzenten ausser BYD und CATL.
- Responsible Mining Assurance (IRMA): Initiative für höhere Transparenz und umfangreiche soziale und ökologische Arbeitsbedingungen im Bergbausektor.
- Responsible Cobalt Initiative (RCI): Ziel ist es, die Zusammenarbeit mit der Demokratischen Republik Kongo und der Zivilgesellschaft zu fördern.

### Fokus auf Europa und Ausblick

Die Europäische Kommission im Jahr 2021 das «European Battery Innovation» Vorhaben zur Förderung von Forschung und Innovation in der Batterie-Wertschöpfungskette mit 2.9 Mrd. EUR an Finanzmitteln genehmigt.

Die neue **EU-Batterieverordnung** mit der Einführung des Batteriepasses inkl. QR-Code, sowie die neue **Nachhaltigkeitsberichterstattung** für Unternehmen und das geplante **Lieferkettengesetz** sollen die zukünftige Transparenz entlang der Batterielieferkette wesentlich verbessern.



# 5. Produktion Batteriezelle

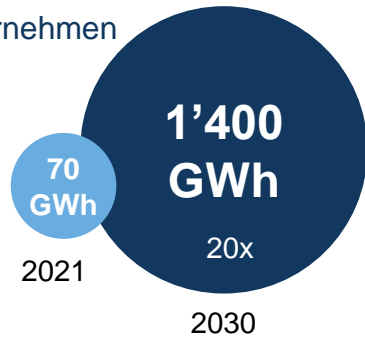
## Aktuelle Situation

Zu den fünf weltweit führenden Herstellern von Lithium-Ionen-Batteriezellen zählen die Unternehmen **CATL**, **BYD**, **Panasonic**, **LG** und **Samsung**.

Globale Aufteilung der Zellherstellung:

- **80%** asiatische Unternehmen
- **10%** europäische Unternehmen
- **6%** nordamerikanische Unternehmen

### Produktionskapazität Europa



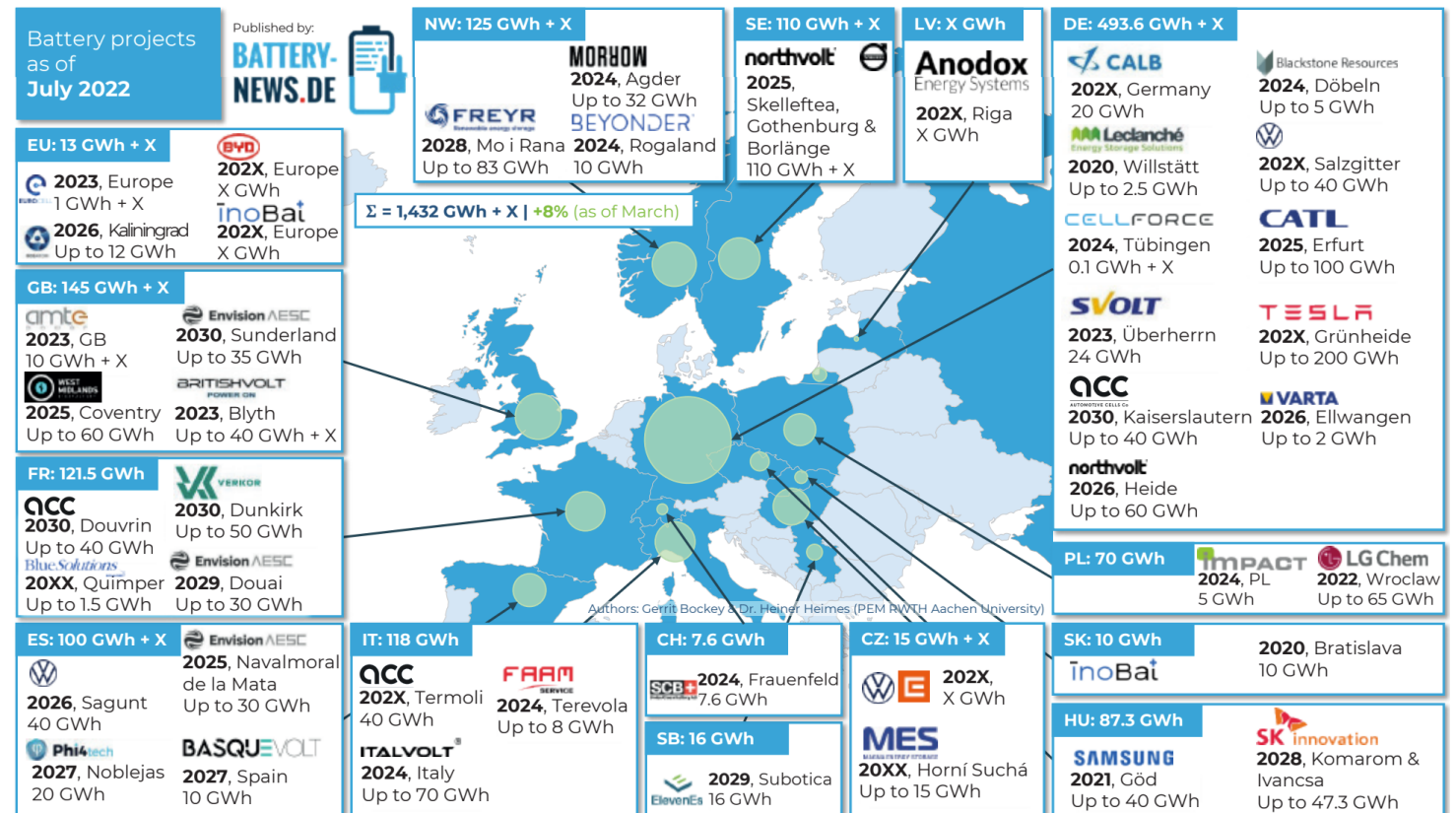
### Engpässe bei der Produktionskapazität

Um die Lieferabhängigkeiten der Industrie zu reduzieren, verfolgen die Unternehmen unterschiedliche Strategien:

- Diversifikation der Lieferanten
- Strategische Industriekooperationen entlang der Wertschöpfungskette
- Forschungsk Kooperationen, Joint Ventures und Eigenfertigung priorisieren
- Direkte Verträge mit Lieferanten von Batterierohstoffen

## Zukünftige Entwicklung

Sämtliche Hersteller planen, die Produktion deutlich zu erhöhen. Deutschland wird sich mit **500 GWh** zum Batterie-Hotspot entwickeln. Auf Deutschland folgen das Vereinigte Königreich und Norwegen.



Überblick über die bestehende und geplante Produktion von Batteriezellen in Europa, Stand Juli 2022 (RWTH Aachen, 2022a)

# 6. Nutzung der Batterie

## Dimensionierung der Batterie

In der Schweiz wird ein Personenwagen im Durchschnitt weniger als **25 km** pro Tag gefahren. Europaweit werden 80% der Fahrzeuge täglich weniger als 100km gefahren.

In der Schweiz erreichen die am häufigsten verkauften Elektrofahrzeuge eine Reichweite von **350-600 km**.

Der Mittelwert der Batteriekapazität aller angebotenen Elektrofahrzeugen liegt schweizweit bei **71 kWh** und 77% aller Modelle weisen eine Kapazität von > 56 kWh auf.

Anwendung	Empfohlene Batteriegrösse
Normale Pendlerdistanzen (< 40km pro Tag)	<b>30 kWh</b> (120-150 km Reichweite im Stadt- und Agglomerationsverkehr )
Gelegentliche Langstreckenfahrten (bis 400 km pro Tag)	<b>50 kWh</b> (200 Autobahnkilometer Reichweite)
Regelmässige Langstreckenfahrten (> 400 km pro Tag)	<b>70 kWh</b> (300 Autobahnkilometer Reichweite)

## Reichweite der Batterie

### Fahren bei Kälte

Die Reichweite einer Batterie verkürzt sich mit abnehmenden Temperaturen. Die Heizung muss mit der Batterie betrieben werden. Die Winterpneus tragen ebenfalls zu einem höheren Verbrauch von ca. 4% bei.

Der Mehrverbrauch in der kalten Jahreszeit bewegt sich zwischen zusätzlichen 10%–30% verglichen mit dem Verbrauch in warmen Jahreszeiten. Die durchschnittliche **Reduktion der Reichweite** liegt bei rund **30%** mit einer Bandbreite zwischen 9% und 50%. Bei hohen Temperaturen erhöht die Klimaanlage den Energieverbrauch, was die Reichweite um rund 20% reduziert.

### Laden bei Kälte

Die Kälte verringert auch die Energieaufnahmefähigkeit beim Laden und **reduziert die Ladegeschwindigkeit** bei kalten Temperaturen erheblich. Bei einer 30-minütigen Ladung reduziert sich die Rest-Kapazität der Batterie durchschnittlich um 22%–36%, wenn die Ladung bei kalten Temperaturen von 0 °C erfolgt, im Vergleich zu warmen Temperaturen von 25 °C. Allerdings sind Ladekurve und Temperaturmanagement je nach Modell sehr unterschiedlich.

### Empfohlene Massnahmen um den Effekt der Kälte zu dämpfen

- Der Innenraum des Fahrzeugs rund 15 Minuten vorheizen, während es noch an der Steckdose angeschlossen ist.
- Extremes Auskühlen verhindern, möglichst in Garage parken, was die Batterie vor extremem Auskühlen bewahrt.

# 6. Nutzung der Batterie

## Lebensdauer der Batterie

### Alterungsprozesse

- Kalendarische Alterung: Beschreibt die innere Degradierung der Batterie mit der Zeit, auch ohne Benutzung der Batterie.
- Zyklische Alterung: Beschreibt die Alterung aufgrund der Beanspruchung durch wiederholtes Laden und Entladen.

Der Alterszustand einer Batterie wird durch den «**State of Health**» (SOH) angegeben. Dieser beschreibt die vorhandene Rest-Kapazität einer Batterie-Zelle im Vergleich zu ihrer vom Hersteller angegebenen Nominalkapazität<sup>4</sup>.

Eine maximale Speicherkapazität weniger als 80%, d.h. **SOH < 80%** gilt allgemein als Grenze für die Lebensdauer einer Batterie und wird mit ca. 1'000 bis 1'500 Ladezyklen erreicht. Dies ergibt eine ungefähre Reichweite für die gesamte Lebensdauer von 300'000 bis 450'000 km. Die Lebensdauer kann jedoch stark variieren. In der Literatur gibt es keinen Konsens dazu, weil es an empirischen Daten mangelt. Publierte Werte variieren zwischen **12-20 Jahre**.

### Verhaltenstipps zur Verlängerung der Batterie-Lebensdauer

- Nutzung in einem Ladezustand zwischen ca. 20% und ca. 80% der angegebenen Nominalkapazität<sup>4</sup>. 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.

<sup>4</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.

## Brandrisiko der Batterien

Das Brandrisiko einer Lithium-Ionen-Batterie ist grundsätzlich erhöht, wenn sie beschädigt, unter ungünstigen Bedingungen gelagert oder falsch verwendet wird.

### Brandursachen

- Kurzschluss durch mechanische Beschädigung z.B. bei einem Unfall
- Qualitätsprobleme bei der Herstellung
- Überhitzung, sog. «Thermal Runaway»
- Zu hoher Stromfluss beim Laden / Entladen
- Vollständige Entladung mit anschliessendem Zellschaden
- Naturgefahren (z.B. Hochwasser)

### Brandbekämpfung

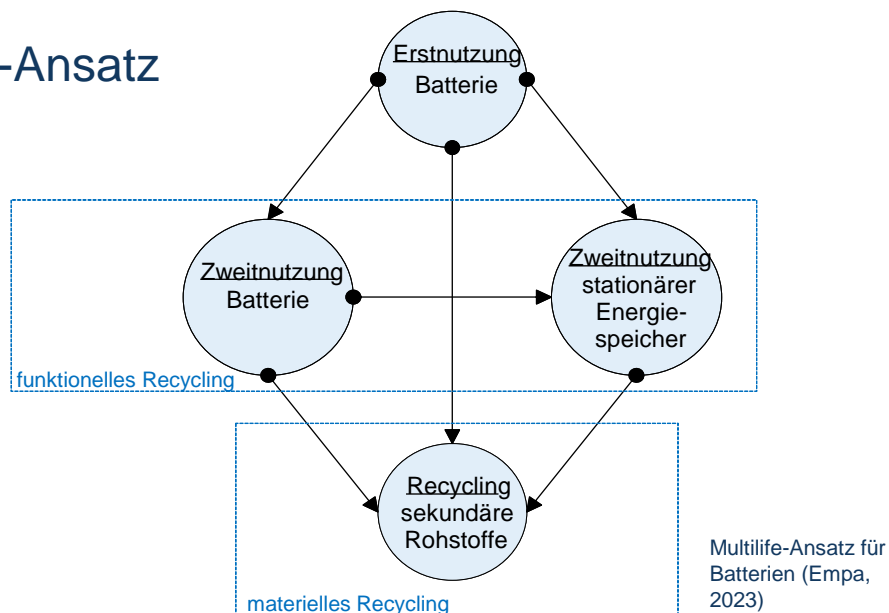
Brände von Lithium-Ionen-Batterien haben oft einen explosiven Charakter und eine langanhaltende Branddauer. Meist ist die Batterie im Fahrzeugboden verbaut und für Löschmittel schwer zugänglich. Eine brennende Batterie muss darum über längere Zeit mit Wasser gekühlt werden. Dies führt zu einem Wasserverbrauch von 3'000 bis 10'000 Liter Wasser.

### Brandrisiko Elektrofahrzeuge

Aktuell ist die Datenlage nicht aussagekräftig genug für eine akkurate Abschätzung des Brandrisikos von Elektrofahrzeuge im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren. Erste Auswertungen zeigen aber, dass Elektrofahrzeuge **kein signifikant überhöhtes Brandrisiko** im Vergleich zu Verbrennern aufweisen.

# 7. End-of-Life der Batterie

## Multilife-Ansatz



Nach dem Ausbau aus dem Fahrzeug kann die Batterie direkt materiell oder zunächst funktionell **recycelt** werden. Man spricht von einem sog. **«Multilife»-Ansatz**, wenn die Batterien nach dem ersten Lebenszyklus im Elektroauto einen **zweiten Lebenszyklus** erhalten können. Dieser Ansatz schwächt die Nachfrage nach kritischen Materialien ab und ermöglicht Marktlösungen für Altbatterien. Allerdings altern die Batterien in beiden Lebenszyklen und der **Kapazitätsverlust** gegenüber neuen Batterien wird immer drastischer.

Der rasche Fortschritt führt ausserdem dazu, dass bei gleichem Materialverbrauch, leistungsfähigere Batterien produziert werden können. Daher kann es aus ökologischer Sicht interessanter sein, die Rohstoffe durch **effizientes Recycling** wiederzugewinnen, um neue Batterien herzustellen, anstatt ihre Lebensdauer so lang wie möglich zu verlängern.

## Recycling im In- und Ausland

Die Schweizerische Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung beinhaltet eine Rücknahme- sowie Rückgabepflicht bei Batterien. Damit ist in der Schweiz für eine fachgerechte Entsorgung der Batterie gesorgt.

### Export von Elektrofahrzeuge

- Insgesamt werden in der Schweiz rund **80%** der Fahrzeuge am Ende ihrer Nutzungsphase ins Ausland exportiert und dort weiterverwendet oder recycelt.
- Das Recycling der Batterie in diesen Fahrzeugen kann nicht mehr durch schweizerische Institutionen kontrolliert werden, sondern erfolgt gemäss der lokal geltenden Gesetze und Regeln.
- Ein Rezyklieren der Batterie nach Schweizer Standards kann somit bei exportierten Fahrzeugen nicht mehr garantiert werden. Die meisten Fahrzeuge werden jedoch in EU-Mitgliedsstaaten exportiert, in denen die Anforderungen an Batterierecycling ähnlich sind.

### Richtlinien in der EU

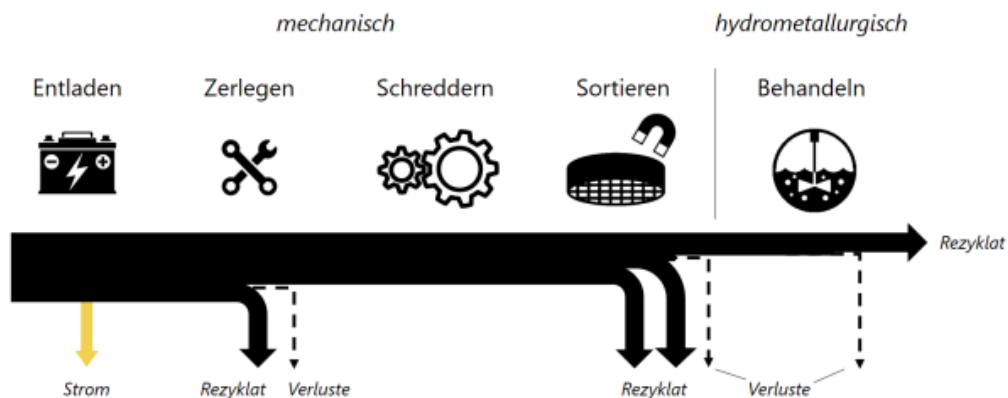
In der Europäischen Union gelten ähnliche Regelungen in Bezug auf die Entsorgung und das Recycling von Batterien. Es gilt länderübergreifend die Richtlinie 2006/66/EG. Es gilt eine Rücknahmepflicht und die Mitgliederländer müssen sicherstellen, dass die Hersteller ein System für eine kostenlose Rückgabe der Batterie durch den Endnutzer einrichten. Eine Rückgabepflicht hingegen besteht in der Europäischen Union nicht.

# 7. End-of-Life der Batterie

## Prognosen Recycling

Nach ca. 20 Jahren Gesamtlebenszeit, inklusive einer möglichen, aber nicht notwendigen Zweitnutzung, sind die Module so gealtert, dass sie materiell recycelt werden müssen. Die Rücklaufmenge von ausgedienten Lithium-Ionen-Batterien wird in den kommenden Dekaden ein **exponentielles Wachstum** zeigen, angetrieben durch den aktuellen Boom von Elektroautos. Das Batterierecycling wird immer wichtiger werden, denn durch das Recycling können wertvolle Materialien zurückgewonnen werden, wie z.B. Lithium, Graphit, Kobalt oder Nickel.

Der Recycling Prozess beinhaltet häufig eine Kombination aus **mechanischer, thermischer und chemischer Aufbereitung**. In der Schweiz hat sich noch kein eindeutiges Verfahren für das Recycling als Standard durchgesetzt. Häufig wird jedoch die Batterie mechanisch aufbereitet und die dabei entstehende Schwarzmasse hydrometallurgisch behandelt.



Schematische Darstellung eines mechanisch-hydrometallurgischen Recyclingverfahrens. Graphik Empa.

## Wirtschaftlichkeit des Recyclings

In der Schweiz ist das Recycling derzeit **nicht profitabel**. Hohe Anforderungen im Bereich Sicherheit, Überwachung und Umwelt- und Gesundheitsvorschriften führen zu hohen Kosten. Diese übersteigen die Erträge und fallen meist höher aus als die Kosten für die Primärrohstoffe.

Die von der Gebühr befreiten Hersteller und Importeure von Elektrofahrzeugen müssen eigenverantwortlich ein System für die umweltgerechte Entsorgung (Sammlung, Transport und stoffliche Verwertung) umsetzen und dessen Finanzierung sicherstellen.

### Ausblick

Die Recyclingkosten werden mit zunehmender Menge aufgrund von Skaleneffekten abnehmen. Die Entwicklung von Recyclingtechnologien wird es ermöglichen, einen zunehmenden Anteil an Batteriematerial in höherer Qualität zurückzugewinnen und damit die Erlöse aus dem Recycling zu steigern.

### Vorgesehen Recyclingrate mit der neuen EU-Verordnung

- Zielvorgaben für Lithium-Ionen-Batterien: **65%** bis 2025, **70%** bis 2030
- Verwertungsquoten von **90%** für Kobalt, Kupfer und Nickel sowie **50%** für Lithium bis Ende 2027
- Verwertungsquoten von **95%** für Kobalt, Kupfer und Nickel und **80%** für Lithium bis Ende 2030

Ein Recycling von Graphit aus Lithium-Ionen-Batterien findet derzeit aus wirtschaftlichen Gründen nicht statt, wird aber bereits erforscht. Bis 2025 wird mit einer Recyclingrate von Mangan von ca. 30% gerechnet (70% bis 2030).